

UNIVERZITET U BEOGRADU
TEHNOLOŠKO-METALURŠKI FAKULTET
Katedra za hemijsko inženjerstvo

doktorska disertacija

**SUŠENJE RASTVORA I SUSPENZIJA U
POKRETNOM SLOJU INERTNIH ČESTICA**

Mr Zorana Lj. Arsenijević, dipl.inž.tehnol.

Beograd, 2006

Mentor rada:

Dr Željko Grbavčić,
redovni profesor Tehnološko-metalurškog fakulteta

Komisija:

Dr Srđan Pejanović,
vanredni profesor Tehnološko-metalurškog fakulteta

Dr Vladimir Valent,
redovni profesor Tehnološko-metalurškog fakulteta

Dr Simeon Oka,
naučni savetnik u penziji, Institut "Vinča"

Kandidat:

Mr Zorana Lj. Arsenijević, dipl.inž.tehnol.

Datum odbrane:

IZVOD

Sušenje je operacija koja je veoma zastupljena u hemijskoj, prehrambenoj i farmaceutskoj industriji i kao takva predstavlja značajnog korisnika energije. Izbor adekvatnog sistema za sušenje je složen proces i zahteva potpuno poznavanje karakteristika polaznog materijala kao i očekivanih karakteristika finalnog praškastog proizvoda. Postupci sušenja se intenzivno istražuju u svetu sa ciljem povećanja energijske efikasnosti, razvoja što kompaktnije opreme, poboljšanja kontrole radnog režima procesa, održanja kvaliteta produkta i optimalnog kapaciteta, smanjenja emisije zagađivača. Sušenje vlažnih materijala u pokretnim slojevima inertnih čestica je relativno nova tehnologija i predstavlja ekonomičniju i efikasniju alternativu ostalim, trenutno najčešće korišćenim, metodama u cilju dobijanja visoko kvalitetnog osušenog praškastog produkta.

Istraživanja izvršena u okviru ovog rada su u potpunoj saglasnosti sa najnovijim svetskim trendovima, s obzirom da je poslednjih godina uočen znatan porast naučnih istraživanja posvećen sušenju materijala u pokretnim slojevima inertnih čestica. Prikazani su rezultati istraživanja procesa sušenja rastvora i suspenzija u sistemima sa pokretnim slojevima inertnih čestica, u fluidizovanom sloju i fontanskom sloju sa cevnom umetkom. Eksperimentalna ispitivanja su rađena na laboratorijskim aparaturama i na uvećanim laboratorijskim (poluindustrijskim) uređajima.

U radu su prikazani rezultati dobijeni pri tretmanu suspenzija različitih materijala. Ispitivan je uticaj operativnih uslova na performanse sistema za sušenje i na kvalitet praškastog produkta. Praćenjem akumulacije osušenog materijala u sloju inertnih čestica sa vremenom i promene fluido-dinamičkih parametara ispitivan je uticaj početnog sastava i vrste suspenzije kao i termičkih parametara sušenja na kontinualnost procesa. Izvršena je analiza efikasnosti sušenja i energijske efikasnosti u funkciji razlike temperatura između ulaznog i izlaznog vazduha u cilju boljeg sagledavanja performansi sistema za sušenje sa energijskog aspekta.

Izvršena su preliminarne ispitivanja naknadnog dosušivanja i hlađenja praškastog produkta iz primarne sušnice u cilju obezbeđivanja zahtevane rezidualne vlažnosti produkta i eliminisanja njenog naknadnog povećanja.

Ustanovljeno je da ukupni bilansi prenosa mase i toplote adekvatno predviđaju radni režim sistema za sušenje u fluidizovanom sloju inertnog materijala.

Razvijen je model za predviđanje performansi sušnice sa fontanskim slojem inertnih čestica i centralnom cevi. Model bazira na jednačinama kontinuiteta, bilansima količine kretanja za fluid i čestice i bilansima za prenos toplote i mase postavljenim za cevni umetak. Praktično korišćenje modela zahteva i korelacije za predviđanje koeficijentata trenja fluid-čestice, fluid-zid transportne cevi i čestice-zid transportne cevi. Predloženi model za sušenje suspenzija u sušnici sa fontanskim slojem i cevnom umetkom, pored izvesnih ograničenja, se može iskoristiti za određivanje optimalnih karakteristika ovakve sušnice i za

redukovanje broja eksperimentalnih proba. Razvijen je model za predviđanje brzine cirkulacije inertnih čestica, što je od izuzetnog značaja za projektovanje i kontrolu procesa sušenja u sušnici sa fontanskim slojem inertnih čestica i cevnom umetkom. Razvijena je i eksperimentalno verifikovana metoda za predviđanje brzine zagušenja i poroznosti u vertikalnom pneumatskom transportu inertnih čestica.

Ustanovljeno je da je sušenje suspenzija na inertnim česticama jednostavna i vrlo efikasna tehnika za sve materijale koji se neće slepiti za inertne čestice i na taj način izazvati sinterovanje sloja. Na osnovu poređenja performansi dva ispitivana sistema proizilazi da je sušenje u fluidizovanom sloju inertnih čestica efikasniji proces. Prednosti ovog sistema su i manja količina inertnih čestica, manji pad pritiska, jednostavnija regulacija procesa i znatno jednostavnije uvećanje razmera procesa. Sa druge strane, prednost sušenja na inertnim česticama u fontanskom sloju sa cevnom umetkom je vrlo kratko vreme boravka materijala u zoni sušenja. U ovom sistemu moguće je sušiti i neke materijale koji sadrže organske i biološke komponente, što predstavlja osnovnu prednost u odnosu na sušnicu sa fluidizovanim slojem inertnih čestica usled manjeg rizika od slepljivanja sloja.

Ključne reči: sušenje, suspenzija, fluidizovani sloj, fontanski sloj, cevni umetak, inertne čestice, modelovanje

ABSTRACT

Drying is one of the most involved process in the chemical, pharmaceutical and food processing industries and accordingly this unit operation is the most energy consuming industrial operation. The adequate dryer selection is a complex process and in that purpose it is necessary to completely know the feed characteristics as well as expected characteristics of final powdery product. The rapid investigations in drying technology are associated with the higher energy efficiency, enhanced drying rates, development of more compact dryers, better proces control, enhanced product quality and optimal capacity, emission reduction. Drying of wet materials in moving beds of inert particles is a relatively novel technology and it represents more economical and more efficient alternative to other most commonly used drying technologies to produce the high quality powdery materials.

The investigations performed in the scope of this work are in the full agreement with the latest world trends regarding to the significant progress in the researches of drying processes in the moving beds of inert particles, especially in the last few years. The results of solution and suspension drying in moving beds of inert particles, i.e. fluidized and draft tube spouted beds, are represented. The experimental investigations were conducted on laboratory and pilot scale.

The results obtained from drying experiments conducted with various suspensions are presented. The influence of operational conditions on drying system performance and powdery product quality are investigated. The effect of the initial moisture content, physical and rheological properties of the suspensions as well as the effect of thermal parameters on continuity and stability of drying proces were investigated concerning the dried product accumulation in the bed with time and fluid-dynamic parameters change. The analysis of drying and energy efficiencies as functions of temperature diference between inlet and outlet air were performed for deeper insight in dryer behavior and operation from an energy point of view.

The preliminary investigations of subsequent drying and cooling of powdery product from the primary drier were carried out in order to preserve the requested product residual moisture and to eliminate the possibility of residual moisture additional rise.

It was maintained that overall heat and mass balances predict the fluidized bed dryer performance quite well.

The model for predicting the draft tube spouted bed dryer performance were developed. The drying model are based on continuity equations, momentum equations for fluid and particles, heat and mass balances applied for draft tube. Practical applications of the model require relations for the fluid-particle interphase drag coefficient, the fluid-wall friction coefficient and the particle-wall friction coefficient. Some fluid mechanical and mass and heat transfer uncertainties limit model applicability, but predictions from proposed model seem to be useful for preliminary design and simulation and for reduction

of experimental trials. The model for predicting the inert particle circulation rate were developed, that is of great importance for design and control of drying process in draft tube spouted bed dryer. The method for predicting the choking velocity and porosity in vertical pneumatic transport were developed and experimentally verified.

It was maintained that drying of suspensions in moving beds of inert particles is a simple and very effective technique for non-sticky materials that do not adhere permanently to the inert particles. On the basis of comparison of two investigated drying systems follows that drying in fluidized bed of inert particles is more efficient process. The advantages of this system are also the lower pressure drop, the simpler process regulation and the significantly easier scale-up. On the other side, the advantage of drying on inert particles in draft tube spouted bed is the very short dried material residence time within drying zone. In comparison with fluidized bed dryer the main advantage of spouted bed dryer is that drying of some organic and biological materials can be conducted since the risk of bed sintering is much smaller.

Keywords: drying, suspension, powder, fluidized bed, spouted bed, draft tube, inert particles, modeling

SADRŽAJ

UVOD	1
1. PREGLED SISTEMA ZA SUŠENJE RASTVORA I SUSPENZIJA	
I PREGLED LITERATURE	5
1.1. OPŠTE KARAKTERISTIKE SISTEMA ZA SUŠENJE RASTVORA I SUSPENZIJA	5
1.2. SUŠENJE NA INERTNIM ČESTICAMA I PREGLED LITERATURE	11
1.2.1. Fluidizovani sloj i njegove modifikacije	12
1.2.2. Ispitivanje interakcija između vlažnih inertnih čestica u sloju	15
1.2.3. Fontanski sloj i njegove modifikacije	16
1.2.4. Pregled modela sušenja	23
2. TIPIČNI SISTEMI ZA KONTAKT FLUID-ČESTICE	
U POKRETNOM SLOJU	29
2.1. OPŠTE KARAKTERISTIKE FLUIDIZOVANIH SLOJEVA	36
2.1.1. Tipovi fluidizacije	36
2.1.2. Pad pritiska u sloju i minimalna brzina fluidizacije	38
2.1.3. Ekspanzija partikulativno fluidizovanog sloja	40
2.1.4. Koeficijent trenja fluid-čestice u homogenoj disperziji i njegova veza sa koeficijentom otpora	41
2.1.5. Brzina odnošenja čestica	44
2.1.6. Kretanje čestica	44
2.1.7. Fluidizovani sistemi gas-čestice	44
2.1.7.1. Modeli fluidizovanog sloja gas-čestice	45
2.1.7.2. Mešanje gasa i čestica u fluidizovanom sloju gas-čestice	49
2.1.7.3. Prenos toplote u fluidizovanom sloju gas-čestice	49
2.1.7.4. Empirijske korelacije za određivanje koeficijenta prelaza toplote između gasa i čestica u fluidizovanom sloju	50
2.2. OPŠTE KARAKTERISTIKE DVOFAZNOG VERTIKALNOG TOKA FLUID-ČESTICE	51
2.2.1. Režimi vertikalnog toka gas-čestice	51
2.2.2. Model za izračunavanje osnovnih fluido-dinamičkih parametara “retkog” dvofaznog toka gas-čestice u zoni ubrzavanja	57
2.2.3. Model za izračunavanje osnovnih fluido-dinamičkih parametara retkog dvofaznog toka gas-čestice van zone ubrzavanja (stacionarno strujanje)	60
2.2.4. Predviđanje brzine zagušenja i poroznosti u stanju zagušivanja dvofaznog toka gas-čestice	63
2.2.5. Veza između protoka čestica, protoka fluida i poroznosti	65
2.3. OPŠTE KARAKTERISTIKE FONTANSKIH I FONTANSKO- FLUIDIZOVANIH SLOJEVA SA CEVNIM UMETKOM	67
2.3.1. Stabilnost sloja	69
2.3.2. Kretanje čestica i ukupna cirkulacija čestica	70
2.3.3. Raspodela fluida	71
2.3.4. Pad pritiska	73
2.3.4.1. Pad pritiska u anularnom delu sloja	73
2.3.4.2. Pad pritiska u cevnom umetku	74
2.3.5. Hidrodinamički modeli	75

3. SUŠENJE U FLUIDIZOVANOM SLOJU INERTNIH ČESTICA	79
3.1. MEHANIZAM SUŠENJA U FLUIDIZOVANOM SLOJU INERTNIH ČESTICA	79
3.2. OPIS EKSPERIMENTALNIH SISTEMA	81
3.2.1. Laboratorijski sistem sa fluidizovanim slojem inertnih čestica, kapaciteta isparavanja 1.5 dm³_{H₂O}/h	82
3.2.2. Uvećani laboratorijski sistem (poluindustrijski uređaj) sa fluidizovanim slojem inertnih čestica, kapaciteta isparavanja 15-20 dm³_{H₂O}/h	84
3.3. MODELOVANJE PROCESA U SUŠNICI SA FLUIDIZOVANIM SLOJEM INERTNIH ČESTICA	88
3.3.1. Bilansi prenosa toplote i mase	88
3.4. PRELIMINARNA ISPITIVANJA SUŠENJA SUSPENZIJA NA LABORATORIJSKOM UREĐAJU KAPACITETA 1.5 dm³_{H₂O}/h	92
3.4.1. Izbor adekvatnog sistema za doziranje suspenzija	92
3.4.2. Rezultati preliminarnih ispitivanja sušenja suspenzija na laboratorijskom uređaju	94
3.5. ISPITIVANJA SUŠENJA SUSPENZIJA NA UVEĆANOM LABORATORIJSKOM (POLUINDUSTRIJSKOM) UREĐAJU KAPACITETA 15-20 dm³_{H₂O}/h	100
3.5.1. Maksimalni protok suspenzije	101
3.5.2. Temperatura u sloju	102
3.5.3. Opšte karakteristike sušenja suspenzija i analiza rezultata	104
3.5.4. Efikasnost procesa	108
3.5.5. Efekat mlevenja i habanje inertnih čestica	111
3.5.6. Zadržavanje produkta u sloju (“hold-up”)	114
3.5.7. Srednje vreme zadržavanja produkta u sloju	116
3.5.8. Poređenje eksperimentalnog i izračunatog kapaciteta isparavanja	118
3.5.9. Sušenje lepljivih materijala	119
3.5.10. Uticaj prisustva tečne faze na pad pritiska u sloju inertnih čestica	121
3.6. DOSUŠIVANJE PRAHA	123
3.6.1. Dosušivanje u fluidizovanom sloju inertnog materijala	123
3.6.2. Dosušivanje u fluidizovanom sloju materijala	125
3.6.3. Dosušivanje u koloni sa ciklonskim strujanjem praha (ciklonski dosušivač)	130
3.7. HLAĐENJE PRAHA	133
3.7.1. Hlađenje u režimu pneumatskog transporta	133
3.7.2. Hlađenje u fluidizovanom sloju	135
3.7.3. Hlađenje u ciklonskom hladnjaku	135
3.7.4. Hlađenje u pužnom transporteru sa duplikatorom	136
3.8. IZDVAJANJE OSUŠENIH ČESTICA PRODUKTA	138
4. SUŠENJE U FONTANSKOM SLOJU INERTNIH ČESTICA SA CEVNIM UMETKOM	141
4.1. MEHANIZAM SUŠENJA U FONTANSKOM SLOJU INERTNIH ČESTICA SA CEVNIM UMETKOM	141
4.2. UVEĆANI LABORATORIJSKI SISTEM SA FONTANSKIM SLOJEM INERTNIH ČESTICA I CEVNIM UMETKOM	142

4.3. MODELOVANJE PROCESA U SUŠNICI SA FONTANSKIM SLOJEM INERTNIH ČESTICA I CEVNIM UMETKOM.....	145
4.3.1. Hidrodinamičko modelovanje vertikalnog dvofaznog toka u cevnom umetku.....	145
4.3.1.1. Koeficijenti trenja fluid-čestice, fluid-zid i čestice-zid.....	148
4.3.1.2. Početni uslovi na ulazu u transportnu cev	149
4.3.1.3. Eksperimentalna verifikacija modela dvofaznog vertikalnog toka.....	153
4.3.2. Predviđanje poroznosti i brzine zagušivanja u cevnom umetku.....	155
4.3.2.1. Eksperimentalni sistem za određivanje koncentracije čestica i brzine zagušenja u vertikalnom transportu gas-čestice	155
4.3.2.2. Eksperimentalno određivanje brzine zagušenja	157
4.3.2.3. Model za predviđanje poroznosti i brzine zagušivanja	161
4.3.2.4. Protok čestica pri zagušivanju (granični kapacitet)	165
4.3.3. Bilansi prenosa toplote i mase u cevnom umetku.....	166
4.3.4. Algoritam modela sušenja suspenzija u fontanskom sloju inertnih čestica sa cevnom umetkom	170
4.4. ISPITIVANJA SUŠENJA SUSPENZIJA U FONTANSKOM SLOJU INERTNIH ČESTICA SA CEVNIM UMETKOM.....	172
4.4.1. Opšte karakteristike sušenja suspenzija i analiza rezultata	172
4.4.2. Uslovi za stabilan rad i uticaj prisustva suspenzije na cirkulaciju inertnih čestica	177
4.4.3. Efikasnost procesa i kapacitet isparavanja.....	180
4.4.4. Indirektna verifikacija predloženog modela	183
4.4.5. Simulacije uticaja radnih uslova na performanse sušnice	184
4.4.6. Predviđanje brzine cirkulacije inertnih čestica.....	186
4.4.7. Ograničenja modela sušenja suspenzija u sušnici sa fontanskim slojem inertnih čestica i cevnom umetkom.....	189
5. POREĐENJE SUŠNICA SA FLUIDIZOVANIM SLOJEM INERTNIH ČESTICA I FONTANSKIM SLOJEM INERTNIH ČESTICA I CEVNIM UMETKOM.....	191
6. ZAKLJUČCI	201
LITERATURA	209
PRILOZI	219
Prilog 1. Pregled sušenih materijala.....	219
Prilog 2. Sušenje suspenzija u fluidizovanom sloju inertnih čestica.....	225
Prilog 3. Sušenje suspenzija u fontanskom sloju inertnih čestica sa cevnom umetkom.....	245
Prilog 4. Numerički program za sušenje suspenzija u sušnici sa fontanskim slojem inertnih čestica i cevnom umetkom.....	291
SPISAK SLIKA	301
SPISAK TABELA	309
SPISAK UPOTREBLJENIH SIMBOLA.....	311

UVOD

Osnovni cilj termičkog sušenja rastvora i suspenzija je dobijanje suvog praškastog produkta sa zadržanim funkcionalnim karakteristikama pogodnog za korišćenje. Generalno, da bi postupak sušenja bio efikasan, a postrojenje racionalno i kompaktno, mora biti ispunjeno nekoliko uslova: potrebno je ostvariti visoke koeficijente prelaza mase i toplote, potrebno je ostvariti veliku površinu kontakta, potrebno je obezbediti visok specifičan unos agensa za sušenje, potrebno je obezbediti ravnomernu raspodelu temperature unutar uređaja i izbeći rizik lokalnog pregrevanja i eventualne termičke degradacije produkta, poželjno je raditi sa što koncentrovanijim suspenzijama, poželjno je raditi sa što većom razlikom temperatura agensa za sušenje na ulazu i izlazu iz sušnice. Poslednja dva uslova odlučujuće utiču na efikasnost procesa. U praktičnoj realizaciji postrojenja, osnovni problem je što se većina navedenih uslova međusobno isključuje. Većinu navedenih uslova ispunjavaju postupci sušenja rastvora i suspenzija na inertnim česticama u pokretnom sloju. Postoji niz načina da se kontakt između čvrstih čestica i fluida ostvari u pokretnom sloju, uz relativno kretanje i čvrste i fluidne faze. Tipični sistemi su fluidizovani sloj, fontanski sloj, fontansko-fluidizovani sloj, fontanski i fontansko-fluidizovani sloj sa cevnom umetkom. Svaki od njih našao je primenu u različitim tehnološkim operacijama i procesima. Svaki sistem karakterišu određene specifičnosti, kao i prednosti i nedostaci.

Imajući u vidu navedeno, predmet ovog rada je ispitivanje termičkog sušenja rastvora i suspenzija različitih materijala u pokretnim slojevima inertnih čestica, odnosno u fluidizovanom sloju i fontanskom sloju sa cevnom umetkom, sa atmosferskim vazduhom kao agensom za sušenje. Eksperimentalno su ispitivani uticaji fluido-dinamičkih i termičkih parametara na termičko sušenje rastvora i suspenzija u navedenim sistemima sa inertnim punjenjem u cilju utvrđivanja prednosti i nedostataka jednog u odnosu na drugi ispitivani sistem, sa aspekta proizvodnog kapaciteta, efikasnosti iskorišćenja energije i kvaliteta suvog praškastog produkta, kao i njihove primenljivosti za sušenje različitih vrsta vlažnih materijala. Osnovni cilj rada je određivanje efekata pomenutih parametara na radni režim oba tipa sušnica, uspostavljanje osnova za optimizaciju i uvećanje razmera procesa i razvoj modela za adekvatno predviđanje radnih režima sušnica.

Na osnovu dobijenih rezultata ustanovljene su efikasnosti uređaja u odnosu na zahtevani sadržaj vlage i aktivne materije produkta, optimalni parametri procesa (protok vazduha, ulazna temperatura vazduha i temperatura sloja) koji obezbeđuju reproduktivnost zahtevanog kvaliteta produkta kao i stabilan rad sušnice. Dobijeni rezultati su tretirani sa aspekta primenljivosti ispitivanih uređaja u realnim uslovima eksploatacije i predstavljaju podlogu za razvoj poluindustrijskih i industrijskih sistema. Razvijeni su matematički modeli za predviđanje karakteristika termičkog sušenja rastvora i suspenzija na inertnim česticama u fluidizovanom sloju i fontanskom sloju sa cevnom umetkom, koji omogućuju prenos dobijenih rezultata u praksu i uvećanje razmera procesa. Primenom postignutih rezultata u

praksi omogućio bi se razvoj efikasnijih, ekonomičnijih, sigurnijih i ekološki prihvatljivijih tehnologija i postrojenja znatno manjih dimenzija u odnosu na one sisteme koji su trenutno u primeni u domaćoj industriji.

Rad je koncipiran u šest poglavlja. Prva dva poglavlja se odnose na teorijske osnove i pregled dosadašnjih ispitivanja iz oblasti kojima se bavi ova teza. U sledeća tri poglavlja predstavljeni su eksperimentalni sistemi za sušenje suspenzija u pokretnim slojevima inertnih čestica, prikazani su i analizirani dobijeni rezultati i zaključci na osnovu izvršenih eksperimentalnih ispitivanja, kao i postavljeni matematički modeli za oba postupka termičkog sušenja. U poslednjem poglavlju su sumirani najvažniji zaključci proistekli iz ovih ispitivanja.

U prvom poglavlju su navedene opšte karakteristike konvektivnih metoda termičkog sušenja rastvora i suspenzija, pri čemu je veći deo posvećen sistemima za sušenje u pokretnim slojevima inertnih čestica i pregledu rezultata dosadašnjih ispitivanja ovih sistema u svetu.

S obzirom da je osnovna karakteristika sistema koji su ispitivani u ovom radu intenzivni kontakt čvrstih čestica sa gasovitim agensom za sušenje (vazduhom) u pokretnim slojevima, u drugom poglavlju su predstavljene opšte hidrodinamičke karakteristike i pregled dosadašnjih istraživanja tipičnih sistema za kontakt fluid-čestice, odnosno fluidizovanog sloja, dvofaznog vertikalnog toka gas-čestice, fontanskog sloja i fontansko-fluidizovanog sloja sa cevnom umetkom.

U trećem poglavlju su prikazani rezultati istraživanja postupka termičkog sušenja u fluidizovanom sloju inertnih čestica od laboratorijskog do poluindustrijskog nivoa izvođenja procesa. Analiziran je uticaj različitih parametara (maksimalni protok suspenzije, temperatura sušenja, osobine sušenog materijala, zadržavanje sušenog materijala u sloju inertnih čestica i raspodela vremena zadržavanja, prisustvo tečne faze vlage u sloju inertnih čestica, itd.) na efikasnost, stabilnost i kontinualnost procesa. Predstavljen je jednostavan model sušenja, baziran na ukupnim bilansima toplote i mase, koji veoma dobro predviđa performanse sušnice. Prikazani su rezultati preliminarnih ispitivanja naknadnog dosušivanja i hlađenja praškastog produkta iz primarne sušnice u nekoliko sistema u cilju obezbeđivanja zahtevanog kvaliteta.

U četvrtom poglavlju su prikazani rezultati eksperimentalnih ispitivanja procesa sušenja u fontanskom sloju inertnih čestica sa cevnom umetkom na poluindustrijskom nivou i analiza uticaja operativnih uslova na performanse sušnice i na kvalitet dobijenog osušenog produkta. Predstavljen je model za predviđanje radnog režima sušnice, baziran na jednodimenzionom hidrodinamičkom modelu vertikalnog dvofaznog toka gas-čvrste čestice, u koji je uključen model za određivanje brzine i poroznosti u stanju zagušivanja dvofaznog toka, dopunjenog bilansima prenosa mase i toplote u cevnom umetku u cilju predviđanja promene sadržaja vlage u gasovitoj fazi tokom sušenja, kao i promene temperatura gasne faze i čvrste faze. Prikazani su rezultati ispitivanja režima strujanja u vertikalnom toku gas-čestice, sa aspekta uslova koji mogu dovesti do zagušivanja dvofaznog toka u cevnom umetku i predložena je metoda za predviđanje brzine zagušenja i poroznosti dvofaznog sistema gas-čvrste čestice pri vertikalnom transportu. Predstavljen je i

model za predviđanje brzine cirkulacije inertnih čestica u fontanskom sloju sa cevnim umetkom. Rezultati proračuna prema navedenim modelima su upoređeni sa eksperimentalno dobijenim rezultatima.

U petom poglavlju je izvršena uporedna analiza sistema za sušenje rastvora i suspenzija u fluidizovanom sloju inertnih čestica i fontanskom sloju inertnih čestica sa cevnom umetkom sa aspekta utvrđivanja prednosti i nedostataka jednog u odnosu na drugi ispitivani sistem, u pogledu proizvodnog kapaciteta, efikasnosti iskorišćenja energije i kvaliteta suvog praškastog produkta, kao i njihova primenljivost za sušenje različitih vrsta vlažnih materijala.

U šestom poglavlju rada su predstavljeni zaključci i rezultati izvedeni na osnovu rezultata eksperimentalnih ispitivanja sušenja rastvora i suspenzija, zaključci o praktičnoj primeni predloženih modela, kao i preporuke za dalja istraživanja.

U Prilogu 1 su dati trivijalni nazivi, hemijske formule, CAS oznake i neke osnovne karakteristike većine sušenih materijala. U Prilogu 2 su dati eksperimentalni uslovi i rezultati sušenja u fluidizovanom sloju inertnih čestica na laboratorijskom i poluindustrijskom nivou. U Prilogu 3 su navedeni eksperimentalni uslovi i rezultati numeričkog proračuna prema predloženom modelu za sušenje u sušnici sa fontanskim slojem inertnih čestica i cevnom umetkom. Numerički program je dat u Prilogu 4.

Na kraju rada dat je spisak slika i tabela i spisak upotrebljenih simbola.

Ova teza predstavlja pregled obavljenih proučavanja i postignutih rezultata u navedenim sistemima za termičko sušenje rastvora i suspenzija u pokretnom sloju inertnih čestica u periodu od 1995. do 2005. godine. Istraživanja obuhvaćena ovom tezom obavljena su kroz nekoliko diplomskih radova. Veći deo postignutih rezultata objavljen je u vidu radova u inostranim i domaćim časopisima, zbornicima, ili je saopšten na međunarodnim i domaćim skupovima.

Najveći deo eksperimentalnih istraživanja obuhvaćenih ovim radom je obavljen u Institutu za hemiju, tehnologiju i metalurgiju (IHTM) - Centru za katalizu i hemijsko inženjerstvo u Beogradu i na Katedri za hemijsko inženjerstvo Tehnološko metalurškog fakulteta (TMF) u Beogradu. Deo eksperimenata izvedenih na poluindustrijskoj sušnici sa fluidizovanim slojem inertnih čestica, kao i karakterizacija osušenih produkata je obavljen u HI ŽUPA, Kruševac u periodu mart-septembar 2000. godine. Demonstrirano je sušenje suspenzija niza preparata iz proizvodnog programa HI ŽUPA, Kruševac, a ostvaren je kontakt i urađeni demonstracioni ogledi za niz preparata od interesa za druge radne organizacije (HI ZORKA-Zaštita bilja, Šabac; HIP AZOTARA, Pančevo; RTB BOR-Topionica i rafinacija, Bor i Institut za tehnologiju nuklearnih i drugih mineralnih sirovina (ITNMS), Beograd).

U finansiranju istraživanja obuhvaćenih ovim radom učestvovalo je delimično Ministarstvo za nauku, tehnologiju i razvoj Vlade Republike Srbije kroz projekte osnovnih istraživanja: "02E08: Fenomeni prenosa u višefaznim sistemima, podprojekat Pp2: Fenomeni prenosa u višefaznim sistemima fluid-čestice" (TMF-IHTM, 1996-2000) i "1700:

Istraživanje fenomena prenosa relevantnih za razvoj procesa i opreme u oblasti kontaktora fluid-čestice i separacionih procesa” (TMF-IHTM, 2001-2005) i kroz inovacioni projekat: “I5.1827: Razvoj postupka i poluindustrijskog postrojenja za sušenje suspenzija u fluidizovanom sloju inertnog materijala” (TMF-IHTM-HI ŽUPA, 1998-1999). Takođe je u finansiranju istraživanja obuhvaćenih ovim radom učestvovala delimično HI ŽUPA iz Kruševca kroz stručne projekte: “Ispitivanje mogućnosti sušenja suspenzija u fluidizovanom sloju” (TMF-IHTM, 1996), “Idejni tehnološki projekat poluindustrijskog postrojenja za sušenje suspenzija i pasta u fluidizovanom sloju inertnog materijala” (TMF-IHTM, 1999) i “Glavni tehnološki projekat industrijskog postrojenja za sušenje suspenzija i pasta u fluidizovanom sloju inertnog materijala kapaciteta 600 kg/h” (TMF-IHTM-NESTING d.o.o. Beograd, 2001).

1. PREGLED SISTEMA ZA SUŠENJE RASTVORA I SUSPENZIJA I PREGLED LITERATURE

1.1. OPŠTE KARAKTERISTIKE SISTEMA ZA SUŠENJE RASTVORA I SUSPENZIJA

Sušenje čvrstih i zrnastih materijala, rastvora ili suspenzija u cilju dobijanja suvog produkta sa zadržanim funkcionalnim karakteristikama pogodnog za korišćenje, odlaganje i dugotrajno skladištenje ili u cilju smanjenja troškova transporta, je jedna od najstarijih i najčešće korišćenih tehnoloških operacija. Danas se tehnološko različiti postupci sušenja koriste u skoro svim granama industrije. Pored unapred postavljenog zahteva u smislu svojstava i kvaliteta proizvoda, pri izboru odgovarajućeg načina sušenja mora se uzeti u obzir i njegova ekonomska i energijska efikasnost, kao i zahtevi tržišta. Tako je došlo do ekspanzije istraživanja novih postupaka sušenja i njihovog modelovanja, što potvrđuju naučni radovi u specijalizovanim časopisima i međunarodni skupovi posvećeni isključivo problematici sušenja.

Pod termičkim sušenjem se podrazumeva proces uklanjanja vlage iz nekog materijala putem isparavanja te vlage. Ovaj proces može se shvatiti i kao separacioni proces u kome se jedna od faza izdvaja faznom transformacijom vlage. Svaki proces sušenja praćen je sa dva istovremena fenomena: prostiranjem toplote i prenošenjem mase isparljive komponente u okolnu atmosferu. Pod vlažnim materijalom se podrazumeva dvofazni ili višefazni sistem sa vlagom, koji može biti čvrstog, tečnog ili gasovitog agregatnog stanja. Kada je materijal koji se suši čvrstog agregatnog stanja, u obliku nerastvorljivih čestica raspodeljen u tečnoj fazi vlage (najčešće je to voda), takav sistem se označava kao suspenzija. Suspenzije mogu egzistirati od vrlo razblaženih do relativno gustih vodenih disperzija čvrstih čestica, takozvanih pasta (suspenzije sa malim sadržajem tečnosti).

Izdvajanje vlage iz čvrstog materijala u principu ne bi trebalo da predstavlja veliki problem. Međutim, sve se drastično komplikuje ako vlagu treba ukloniti sa ciljem da se dobije produkt sa tačno određenim karakteristikama pri zadatom kapacitetu prerade materijala koji se suši. Problem postaje još složeniji ako se uzmu u obzir različita ograničenja pod kojima treba izvesti ovaj proces: zdravstveni i bezbedonosni propisi, racionalno iskorišćenje energije, redukcija emisije zagađivača, itd. Iako je sušenje jedna od najstarijih tehnoloških operacija, još uvek je neophodan eksperimentalan pristup za projektovanje i optimizaciju industrijskih sistema za sušenje. Ovi procesi su generalno kompleksni; to je posledica velikog broja različitih konfiguracija sušnica i uslova izvođenja procesa. Mogao bi se steći utisak da je skoro nemoguće u potpunosti shvatiti proces sušenja, pogotovo sa aspekta kvantitativnog definisanja procesa. Vлага može biti sastavni deo interne gasne faze, i/ili tečne faze i/ili može biti vezana za čvrstu fazu. Ove interakcije u kompleksnim sistemima treba definisati preko termodinamičkog ravnotežnog ponašanja, kinetike sušenja i mnogobrojnih kvantitativnih parametara. Takođe je potrebna i sofisticiranija eksperimentalna oprema radi dobijanja što

preciznijih podataka, kao i aproksimativni modeli opisa termičkog sušenja koji se mogu lakše eksploatirati u svakodnevnoj industrijskoj praksi. Uzimajući u obzir iskustva iz industrijske prakse, potrebno je razvijati tehnološke inovacije i elegantnije pristupe radi praćenja novih trendova u intenzifikaciji procesa.

Mnogobrojni procesi u hemijskoj, farmaceutskoj i prehrambenoj industriji uključuju postupak sušenja rastvora, suspenzija i pasta u cilju dobijanja praškastog produkta. U ovu svrhu se mogu primeniti različite tehnike sušenja, u zavisnosti od početnog sadržaja vlage materijala koji se suši, kao i njegovih fizičkih i reoloških osobina. S obzirom da je sušenje veoma zastupljena operacija u hemijskoj, prehrambenoj i farmaceutskoj industriji, ovaj proces predstavlja značajnog korisnika energije. Generalno, trendovi u istraživanjima tehnologija termičkog sušenja su tesno povezani sa povećanjem energetske efikasnosti, povećanjem brzine sušenja, razvojem što kompaktnije opreme, boljom kontrolom procesa u cilju održavanja optimalnog kvaliteta produkta i optimalnog proizvodnog kapaciteta, smanjenjem emisije zagađivača, razvojem integrisanih procesnih sistema (na pr.: filter-sušnica), itd. Mujumdar /1990/ je naveo da postoji veliki broj novih ili poboljšanih tehnologija sušenja koje su u različitim fazama razvoja. Takođe je naveo da je u tehničkoj literaturi citirano preko 400 različitih tipova sušnica, dok se u praktičnoj primeni može naći samo oko 50 tipova. Izbor tipa sušnice je kompleksan proces s obzirom da se ne zasniva isključivo na naučnim principima, već uključuje subjektivnu procenu kao i veliki udeo empirizma. Iz uporednog pregleda podataka o odabranim tipovima sušnica sa konvektivnim načinom sušenja /Valent, 2001/ proizilazi potreba o neophodnosti korišćenja iskustava proizvođača opreme, uz dodatna eksperimentalna određivanja kinetike sušenja i dinamike ostalih učesnika procesa. Prethodna praktična primena nekog tipa sušnice definitivno može biti od pomoći, međutim to ne sme biti jedini kriterijum pri izboru sistema za sušenje. Mujumdar /2000/ je izvršio klasifikaciju konvencionalnih i najčešće korišćenih tipova sušnica, kao i pregled osnovnih principa i zahteva pri izboru sušnice. Takođe je naveo primer da je preko 80% važnijih hemijskih kompanija u Evropi, od kojih svaka već koristi preko 1000 različitih sušnica u svojim proizvodnim pogonima, samo u toku jedne godine (1999. god.) napravilo grešku pri izboru novih sušnica. S obzirom da sušnica čini samo deo postrojenja za sušenje, treba naglasiti da postupci koji prethode i koji se nastavljaju na sam proces sušenja takođe imaju značajan uticaj na izbor odgovarajućeg tipa sušnice za konkretnu primenu. Benali i Kudra /2002/ su predstavili koncept "onion-skin" modela u kome sušenje razmatraju kao integrisani proces, tj. sušnica čini jezgro sistema, a ostala oprema i procesi su raspodeljeni po nivoima. Ovaj koncept su predložili u cilju optimizacije sušenja i pratećih procesa. Svaki tip sušnice karakterišu određene specifičnosti izvođenja procesa, što je čini pogodnom ili nepogodnom za konkretnu aplikaciju /Mujumdar, 1995/. U poslednje vreme su sve češći pokušaji razvoja veštačke inteligencije kao pomoć u izboru sušnice. Tako su Kraslawski i Kudra /2001/ predložili programski paket baziran na ekspertskoj bazi podataka, koji generiše rešenje za postavljeni problem, tj. nudi optimalan tip sušnice, procenjuje vreme sušenja i sadržaj vlage

izlaznog produkta. U fazi razvoja su, uglavnom na laboratorijskom nivou, i sasvim novi koncepti sušenja koji baziraju na korišćenju mikrotalasne ili ultrazvučne tehnike.

Od svih postupaka sušenja, u ovom pregledu, pažnja će biti posvećena sušenju suspenzija, s obzirom na značajnu zastupljenost ove operacije u hemijskoj industriji. Pored toga, pažnja će biti posvećena samo konvektivnom načinu sušenja, s obzirom da je to još uvek dominantan način sušenja. Ono se ostvaruje posredstvom gasovitog agensa za sušenje, čijim se strujanjem oko vlažnog materijala obezbeđuje transport toplote i prenošenje mase vlage iz vlažnog materijala u agens za sušenje. Atmosferski vazduh je medijum koji se najčešće koristi kao agens za sušenje, ne samo kao primalac vlage već i kao nosioc potrebne energije za isparavanje vlage.

Osobine pastoznih materijala (paste, suspenzije, muljevi, emulzije) prvenstveno utiču na izbor postupka sušenja i odgovarajuće opreme. Sušenje suspenzija se danas vrši na nekoliko osnovnih načina: sušenje u tavama; kontaktno sušenje na traci; sušenje u sprej sušnicama; sušenje u fluidizovanom sloju ili fontanskom sloju koga čine suve čestice produkta, koje predstavljaju osnovu za granulisanje; integrisani sistemi, na primer kombinovanje sprej sušnice i fluidizacionog uređaja za dosušivanje praha.

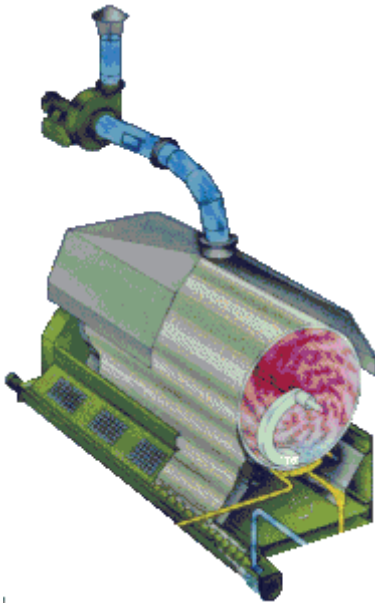
Pored navedenih, u manjoj meri se koriste i drugi sistemi sušenja, na primer trakaste sušnice, sušnice sa doboš filtrima, sušnice sa ugrađenim mlinovima za drobljenje vlažnih agregata, itd. /Valent, 2001; Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry, 1988; Perry's Chemical Engineer's Handbook, 1984; Mujumdar, 1984/.

Postupak sušenja u tavama se vrši na taj način što se prethodno ugušćena suspenzija (dekantiranjem, centrifugiranjem, filtriranjem) razliva po tavama, koje se zatim ubacuju u komore (tunele) kroz koje struji zagrejan vazduh. Sušenje u tavama je dugotrajan proces, koji traje najčešće do 24 h, zbog toga što je samo površinski sloj suspenzije u neposrednom kontaktu sa agansom za sušenje. Relativno mala dodirna površina i relativno velika debljina sloja suspenzije u tavi predstavljaju osnovno ograničenje prenosu vlage i toplote. Budući da je sve vreme agens za sušenje potrebno zagrevati, ovakav sistem je energetski izrazito nepovoljan. Pored toga, osušeni produkt je u obliku čvrste pogače koju je potrebno mleti radi postizanja zahtevane granulacije praškastog proizvoda. Sve ovo čini navedeni postupak veoma neefikasnim i skupim i u pogledu korišćenja energije i u pogledu održavanja čitave linije. Međutim, ovakav način sušenja je najrasprostranjeniji u domaćoj hemijskoj industriji.

U pokušaju zamene postupka sušenja u tavama razvijen je postupak sušenja na pokretnim valjcima (slika 1.1.), koji se svodi na razlivanje suspenzije u vidu tankog filma na zagrejane valjke, kroz koje protiče grejni fluid. Tokom spore rotacije valjaka, film suspenzije se suši i na određenoj poziciji se strugalicama skida sa površine valjaka. Na ovakav način se suši suspenzija pivskog kvasca u industriji. Najčešće granulacija produkta nije zadovoljavajuća, pa se vrši njegova dorada mlevenjem ili granulacijom.

Sušenje sa raspršavanjem (sprej sušnica) je do sada najrasprostranjeniji postupak sušenja tečnih materijala u svetu. Postupak se zasniva na tretmanu raspršenog tečnog materijala (kapi) unutar komore, koji je u kontaktu sa zagrejanom vazduhom ili u

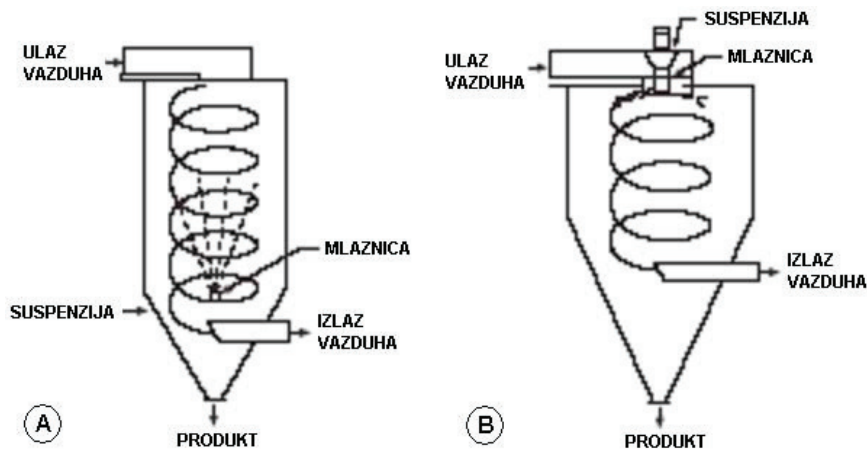
suprotnostrujnom ili u istostrujnom toku, pri čemu nastaje prah koji obično zadovoljava zahtevani kvalitet (slika 1.2.). Sušenje sa raspršavanjem ima određene prednosti ali i nedostatke /Shaw, 1994; Ozmen i Langrish, 2003/.



Slika 1.1. Prikaz sušenja pastastih materijala na pokretnim valjcima

Moguće je dizajnirati praškasti produkt u pogledu granulometrijskog sastava izborom sistema za atomizaciju i temperature u komori. Usled male veličine raspršenih kapi, kontaktna površina sa agensom za sušenje je velika, što pogoduje intenzivnom prenosu toplote i vlage. Zapremina komore treba da je dizajnirana tako da se kapi osuše pre dodira sa zidovima komore. Ovaj način sušenja je veoma pogodan za tretiranje vrlo lepljivih rastvora, pod uslovom da se suva čestica koja pada na zid ili dno komore može pneumatski izuzeti iz uređaja. Kada je uređaj dobro projektovan, nema potrebe za doradom dobijenog praškastog produkta (mlevenjem, granulisanjem). Osnovni nedostatak sprej sušnice je relativno mala

količina isparene vlage po jedinici zapremine komore. Pored toga, nedostaci sprej sušnice su nefleksibilnost uređaja na promenu operativnih parametara i teško održavanje projektovane veličine kapi.



Slika 1.2. Prikaz sušnice sa raspršavanjem suspenzije u suprotnostrujnom A i istostrujnom B toku sa vazduhom

Postrojenja u kojima se vrši sušenje raspršivanjem u sprej su zapreminski glomazna i skupa usled male produktivnosti po jedinici zapremine uređaja. Razlog za to je moguće sagledati iz mehanizma uklanjanja vlage iz putujuće kapi, koji preovlađuje u sprej sušnicama. Kap koja se formira na atomizeru mora biti osušena tokom njenog kretanja do zida komore, a potrebna putanja kapi i rastojanje do zida su određeni brzinom sušenja.

Kako su kapi sitne, to je njihova brzina kretanja bliska brzini agensa za sušenje, što znači da je relativna brzina između faza mala. Kako vrednosti koeficijenta prelaza toplote i mase zavise od relativne brzine, to je putanja na kojoj se sušenje odvija srazmerno velika, a to prouzrokuje veliki prečnik, odnosno volumen uređaja. Investicioni i operativni troškovi su najčešće veliki, što je naročito značajno sa aspekta proizvoda niske tržišne vrednosti.

U sprej sušnicama je, po pravilu, vrlo teško postići rezidualnu vlažnost produkta ispod 5%. Iz tih razloga se često /Mujumdar, 1984; Ashizawa i Masters, 1984/ sprej sušnica kombinuje sa uređajem za dosušivanje praha. Na slici 1.3 prikazano je jedno rešenje u kome se dosušivanje praha vrši u vibro-fluidizovanom sloju postavljenom ispod sprej sušnice.



Slika 1.3. Prikaz koničnog dna sušnice sa raspršavanjem na koji se nastavlja sekundarna sušnica sa vibro-fluidizovanim slojem

U domaćoj hemijskoj industriji, pored sušenja u tunelskim sušnicama, drugu dominantnu tehniku predstavlja i sušenje u sprej sušnicama.

Sušenje u fluidizovanom ili fontanskom sloju se najčešće koristi za sušenje različitih zrnastih materijala /napr. Mujumdar, 1987; Kiranoudis i dr., 1996; Viswanathan i dr., 1986; Chen i dr., 1999; Wiriyumpaiwong i dr., 2003; Soponronnarit i dr., 2001; Jenkins i dr., 2002; Topuz i dr., 2004/. U primeni ovih sistema za sušenje rastvora i suspenzija u sloju formiranom od suvih čestica produkta, pokazalo se da se ovakvi tipovi sušnica mogu koristiti za relativno male proizvodne kapacitete, jer je umesto sušenja i dobijanja praškastog produkta ovo pre postupak oblaganja tečnošću (rastvor/suspenzija) prisutnih čestica u sloju. Stoga su ovakvi sistemi našli široku primenu u procesima granulacije (sloj sačinjavaju suve čestice produkta, tzv. pelcer) i kotiranju (sloj sačinjavaju različiti nosači). Najčešće se primenjuju u farmaceutskoj i prehrambenoj industriji /na primer: Qimin i dr., 1996; Becher i Schlunder, 1998; Dewettinck i Huyghebaert, 1999; Teunou i Poncelet, 2002; Rambali i dr., 2003; Duarte i dr., 2004/. Poslednjih godina je sve veći trend i proizvodnja granuliranih, i naknadno lako rastvorljivih, proizvoda i u hemijskoj industriji /napr. Edwards i Instone, 2001; Kimoto i dr., 2000; Hemati i dr., 2003/.

Imajući u vidu složene reološke karakteristike pastoznih materijala i veoma širok opseg fizičkih formi vlažnih materijala nemoguće je preporučiti "univerzalni" tip sušnice. Istraživanja u ovoj oblasti teže ka razvoju efikasnih sušnica koje bi se koristile za dobijanje različitih vrsta proizvoda. Generalno, da bi sušenje bilo efikasno, a postrojenje racionalno i kompaktno, mora biti ispunjeno nekoliko uslova:

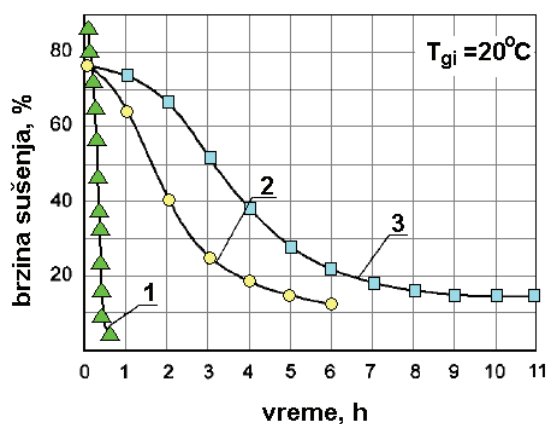
- a) potrebno je ostvariti visoke koeficijente prelaza mase i toplote, što je moguće postići samo ako postoji velika relativna brzina između agensa za sušenje i čestice ili kapljice koja se suši;
- b) potrebno je ostvariti veliku površinu kontakta; što je površina kontakta veća po jedinici volumena uređaja, to će za dati proizvodni kapacitet postrojenje biti manje;
- c) potrebno je obezbediti visok specifičan unos agensa za sušenje;
- d) potrebno je obezbediti ravnomernu raspodelu temperature unutar uređaja i izbeći rizik lokalnog pregrevanja sušenog materijala i eventualne termičke degradacije produkta;
- e) poželjno je raditi sa što koncentrovanijim suspenzijama, na taj način što bi se deo vlage uklonio mehaničkim operacijama (filtriranjem ili centrifugiranjem) i
- f) poželjno je raditi sa što većom razlikom temperatura ulaznog i izlaznog vazduha iz sušnice.

Poslednja dva uslova odlučujuće utiču na efikasnost procesa. Na primer, za sušenje vodene suspenzije sa 50% čvrstih dispergovanih čestica materijala koji se suši, u sprej sušnici svakih 1% sniženja sadržaja vode u suspenziji rezultira smanjenjem zapremine uređaja od 3%. Sa druge strane, pri istom sadržaju vode u ulaznoj suspenziji, u odnosu na ulaznu temperaturu vazduha od 200°C i izlaznu temperaturu od 100°C ($\Delta T=100^\circ\text{C}$), povećanje razlike temperatura smanjuje zapreminu uređaja i to približno 2% na svakih 10°C povećanja razlike temperatura /Shaw, 1994/.

Pri praktičnoj realizaciji postrojenja, osnovni problem je što se većina napred navedenih uslova međusobno isključuje. Na primer, veliku kontaktnu površinu moguće je obezbediti boljim dispergovanjem suspenzije u što manje kapljice, što ima za posledicu nemogućnost ostvarivanja velike relativne brzine između agensa za sušenje i čestice (kapljice). Istovremeno, povećanje koncentracije suve materije u suspenziji ograničava mogućnosti finog dispergovanja u kapi. Sa druge strane, povećavanje razlike temperatura praktično znači povećanje ulazne temperature vazduha, budući da je izlazna temperatura vazduha najčešće limitirana termičkom stabilnošću produkta. Međutim, što je veća ulazna temperatura vazduha to je rizik neravnomerne raspodele temperatura unutar uređaja veći, a neujednačenost brzine parcijalnih procesa sušenja je posledica nehomogenosti polja i temperature i vlage unutar materijala koji se suši.

Na osnovu analize parametara sušenja, odnosno termičke efikasnosti, volumetrijskog kapaciteta isparavanja, specifične potrošnje toplote, itd., kao i drugih faktora kao što su kvalitet produkta, vreme sušenja ili mogućnost kontrole procesa, dolazi se do zaključka da su najpogodnije takve sušnice u kojima je svaki element sušenog materijala u struji agensa za sušenje. Takva sušnica obezbeđuje veliku kontaktnu površinu

između agensa za sušenje i sušenog materijala i pospešuje proces usled smanjenja termičkih i difuzionih otpora.



Slika 1.4. Kinetika sušenja R-soli

1-sušnica sa inertnim česticama, 2-rotaciona cilindrična sušnica, 3-vakuum sušnica sa lopaticama /Leontieva i dr., 2002/

uporedili eksperimentalne podatke za tri tipa sušnica dobijene pri sušenju vodene suspenzije veoma sitnih čestica pigmenata, odnosno suspenzije tzv. R-soli (slika 1.4). Razmatrajući brzinu sušenja i krajnji sadržaj vlage u osušenom materijalu evidentno je da je sušenje na inertnim česticama najefikasnija metoda. Mnogo kraće vreme zadržavanja sušenog materijala u zoni sušenja, samim tim i smanjeno izlaganje povišenim temperaturama, umanjuje opasnost od degradacije produkta.

1.2. SUŠENJE NA INERTNIM ČESTICAMA I PREGLED LITERATURE

Sušenje suspenzija nanošenjem na inertne čestice u cilju dobijanja praškastog produkta je relativno nova tehnologija. Mada je tehnologija sušenja pastoznih materijala na inertnim nosačima razvijena još pre 40 godina u bivšem SSSR-u, nije bila rasprostranjena u drugim zemljama uglavnom zbog nepoznavanja tog postupka i jezičke barijere. Ovakav postupak sušenja je originalno razvijen za sušenje pigmenata, hemikalija i nekih biomaterijala. U poslednjoj dekadi sušenje na inertnim česticama je ponovo postalo predmet interesovanja velikog broja istraživača usled izuzetnih prednosti koje prevazilaze ograničenja konvencionalnih načina sušenja u sprej sušnicama, doboš sušnicama i sušnicama sa lopaticama ("paddle-dryer"). Klasični fluidizovani, vibrofluidizovani, fontanski i modifikovani fontanski slojevi predstavljaju najraširenije i najpopularnije sisteme u kojima se primenjuje sušenje na inertnim česticama /Reger i dr., 1967; Romankov, 1971; Pham, 1983; Hadžismajlović, 1989; Kudra i dr., 1989; Kudra i Mujumdar, 1995; Grbavčić i dr., 1998; Povrenović, 1998; Pallai i dr., 2001; Pan i dr., 2001; Leontieva, 2002; Kudra i Mujumdar, 2002; Taruna i Jindal, 2002; Osorio-Revilla i dr., 2004; Passos i dr., 2004; Zhao i dr., 2004; i dr./ . Za sve navedene sisteme, nezavisno od hidrodinamičkih

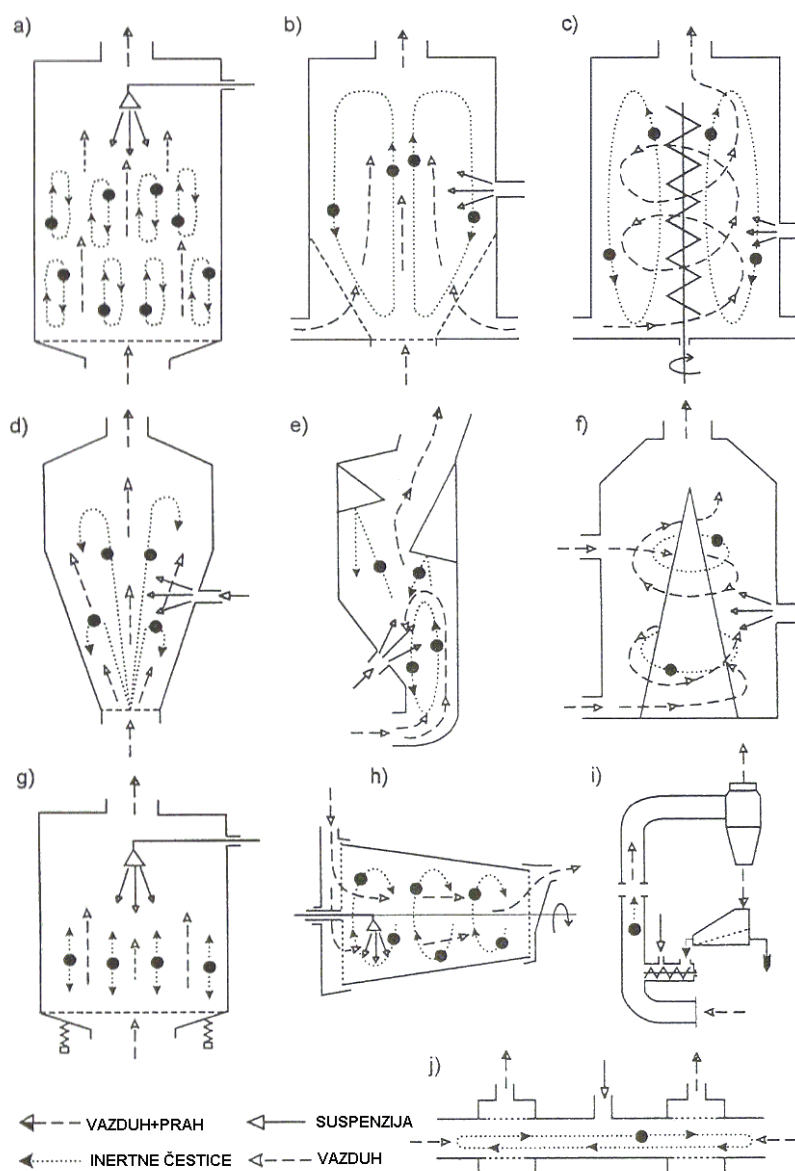
Imajući u vidu potrebu povećanja ukupne efikasnosti procesa, kao i povećanja njegove intenzivnosti u cilju razvoja što kompaktnije opreme i uslove koje treba da zadovolji efikasan sistem, u svetu i kod nas se sve više istražuje postupak sušenja sa nanošenjem rastvora/suspenzija na inertne čestice u pokretnom sloju. Smatra se /Mujumdar, 2004/ da će ova tehnologija sušenja suspenzija/pasta i rastvora biti široko industrijski primenjena u narednim godinama. Ovakvi sistemi ispunjavaju većinu navedenih zahteva za realizaciju efikasne sušnice. Leontieva i dr. /2002/ su

karakteristika, princip sušenja na inertnim česticama je isti i zasniva se na odvijanju dva simultana procesa: oblaganju površine inertnih čestica tankim filmom suspenzije i istovremenom sušenju tog filma. U zavisnosti od tipa sušnice, inertne čestice se mogu dovesti u vibrirajuće, fluidizovano ili fontanovano stanje pomoću zagrejanog vazduha ili u kombinaciji sa mehaničkom agitacijom unutar sušnice, korišćenjem mešalice, pužnog transportera, pokretnih nosača i slično. Inertne čestice takođe mogu biti fluidizovane spoljnim magnetnim poljem, ako poseduju feromagnetna svojstva, napr. barijum ferit /Kovalev i dr., 1989; preuzeto iz /Kudra i Mujumdar, 2002//. U navedenim tipovima sušnica inertne čestice nemaju ulogu samo pokretnog medijuma, već njihovo prisustvo poboljšava prenos toplote /Reyes i dr., 2001/. Uopšteni pregled tehnika sušenja na inertnim česticama su dali Kudra i Mujumdar, /2002/. Na slici 1.5 su prikazane osnovne konfiguracije sušnica sa inertnim česticama /Kudra i Mujumdar, 2002, Fig. 4.1/.

1.2.1. Fluidizovani sloj i njegove modifikacije

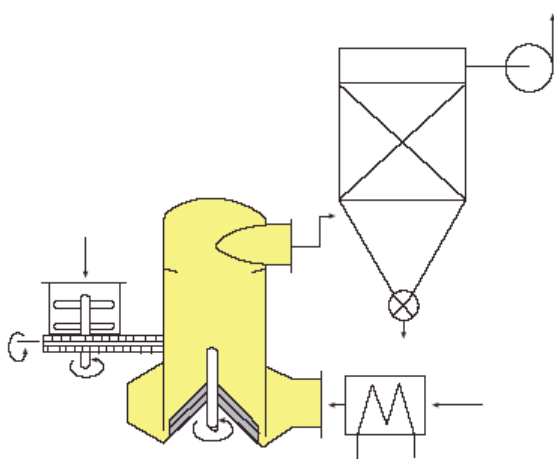
Primena fluidizovanih slojeva je veoma zastupljena u hemijskoj procesnoj industriji usled ostvarivanja visokih koeficijenata prelaza mase i toplote i dobijanja proizvoda uniformnog kvaliteta. Kao što je već rečeno, sušnice sa fluidizovanim slojem su rasprostranjene u hemijskoj i prehrambenoj industriji za sušenje zrnastih i komadnih materijala. Međutim, u ovakvoj konvencionalnoj sušnici sa fluidizovanim slojem ne mogu se efikasno sušiti suspenzije i pastozni materijali. Ovi materijali se mogu tretirati samo ako se za fluidizacioni medijum upotrebe inertne čestice. Na ovaj način je moguće suspenzije i paste prevesti direktno u praškast proizvod, bez odvijanja faza očvršćavanja produkta, filtracije i dodatnog mlevenja. Usled turbulentnog mešanja fluidizovanih inertnih čestica pastozni materijali se mogu efikasno ravnomerno raspodeliti unutar sloja. Sušnice sa fluidizovanim slojem inertnih čestica su kompaktni uređaji usled velikog kapaciteta za prenos toplote i za isti proizvodni kapacitet njihova zapremina može iznositi i manje od 10% od zapremine sprej sušnice ili sušnice sa turbulentnim vrtložnim strujanjem gasa koje nastaje usled tangencijalnog uvođenja gasa i rotacije konične mešalice na dnu komore ("spin flash dryer") prikazane na slici 1.6 /Pan i dr., 2001/.

Iako su praktično realizovane mnogobrojne industrijske sušnice sa fluidizovanim slojem inertnih čestica, još uvek ne postoji pouzdan kriterijum za uvećanje dimenzija uređaja i kontrolu procesa /Hatamipour i Mowla, 2003a/. Intezivna primena fluidizacije u procesima sušenja potiče od nekoliko principijelnih prednosti. U odnosu na osnovne kriterijume efikasnosti sistema za sušenje, tj. specifičnu brzinu isparavanja vode (vlage), specifičnu potrošnju toplote i specifičnu potrošnju vazduha (agensa za sušenje), sušnica sa fluidizovanim slojem inertnih čestica predstavlja atraktivnu alternativu ostalim tehnologijama sušenja u slučaju relativno gustih suspenzija (kada je nemoguće doziranje raspršavanjem). Visoka efikasnost sušenja proističe iz velike kontaktne površine i iz velike razlike temperatura ulaznog (zagrejanog) i izlaznog vazduha.



Slika 1.5. Šematski prikaz osnovnih konfiguracija sušnica sa inertnim česticama
a-fluidizovani sloj, **b**-fontansko-fluidizovani sloj, **c**-fluidizovani sloj sa centralno postavljenim pužnim transporterom (ili sloj sa mehaničkim fontanovanjem), **d**-fontanski sloj, **e**-rotirajući ("vortex") sloj, **f**-spiralni, vrtložni ("swirling") sloj, **g**-vibrofluidizovani sloj, **h**-rotaciona sušnica, **i**-pneumatska sušnica, **j**-sušnica sa dve suprotno orijentisane struje gasa velikih brzina ("impinging stream") /Kudra i Mujumdar, 2002, Fig. 4.1/

Lee i Kim /1993, 1999/ su ispitivali uticaj brzine gasa, ulazne temperature gasa i masenog udela skroba prema inertnim česticama na brzinu sušenja u fluidizovanom sloju inertnih čestica. Ustanovili su da se brzina sušenja povećava i sa povećanjem ulazne temperature gasa i sa povećanjem brzine gasa. Međutim, sa povećavanjem odnosa skroba prema inertnim česticama zapazili su blago opadanje brzine sušenja, koje je izraženije što su temperatura i brzina ulaznog gasa niže. Brzina sušenja ima maksimalnu vrednost pri poroznosti sloja inertnih čestica od 0.6. Postavili su model koji je u dobroj saglasnosti sa



Slika 1.6. Šematski prikaz standardne konfiguracije "spin-flash" sušnice

eksperimentalnim podacima i koji se može upotrebiti za predviđanje temperature sloja, vlažnosti izlaznog gasa i sadržaja vlage u produktu.

Osnovni nedostatak sušenja u fluidizovanom sloju inertnih čestica je moguća pojava sinterovanja (slepljivanja) inertnih čestica pri sušenju nekih materijala. Stoga je primena klasičnog fluidizovanog sloja za sušenje materijala koji sadrže ugljene hidrate, masnoće i visoku koncentraciju šećera praktično nemoguća s obzirom da lepljivost tih materijala prouzrokuje nestabilnost procesa, osim u slučajevima gde se dodaju razni aditivi /Benali i

Amazouz, 2002/ koji smanjuju adhezivnost sušenog materijala. Neki od pokušaja prevazilaženja ovog nedostatka klasičnog fluidizovanog sloja jesu izvesne modifikacije kojima se postižu bolje fluidizacione karakteristike i veći zapreminski koeficijenti prenosa toplote, kao što je korišćenje vibracija pri sušenju sojinog mleka /Pan i dr., 2001/ ili tangencijalno uvođenje gasa pri sušenju protein hidrolizata, obranog mleka, surutke, sojine pulpe, sojinog mleka /Kutsakova i Utkin, 1987; Taruna i Jindal, 2002; Zhao i dr., 2004/. Taruna i Jindal /2002/ su imali problem održavanja uniformnog protoka suspenzije sojine pulpe (nerastvorljivi nusprodukt u proizvodnji tofu sojinog sira), koja je veoma lepljiva i vlaknaste strukture. Pokazalo se da čestice teflona imaju prednost u odnosu na staklene čestice usled većih koeficijenata prenosa toplote, većih vrednosti maksimalnih protoka suspenzije pri kojima je rad sistema stabilan i niži procenat zadržavanja produkta u sloju ("hold-up") /Pan i dr., 2001/.

Kutsakova i Utkin /1987/ su ispitivali sušenje suspenzija protein hidrolizata, obranog mleka i surutke u rotirajućem ("vortex") sloju čeličnih sfera sa tangencijalnim uvođenjem vazduha. Pretpostavljajući da je sušenje relativno tankog filma suspenzije na inertnim česticama kontrolisano spoljnim prenosom mase, predložili su izraz za kinetiku procesa. Postavili su poluempirijsku zavisnost za parametar koji kvantifikuje distribuciju vlažnog materijala na površini inertnih čestica, definisan kao masa produkta koji je zadržan po jedinici površine inertne čestice. Na osnovu eksperimentalnih rezultata ustanovili su da se na inertnim česticama formira više slojeva produkta pre nego što dođe do njihovog konačnog pucanja i otiranja sa površine čestica i formirali nomogram za identifikaciju uslova za stabilan rad sušnice. Taruna i Jindal /2002/ su sušili sojinu pulpu u rotirajućem ("vortex") sloju teflonskih čestica. Ustanovili su da specifična brzina isparavanja vode pri sušenju sojine pulpe raste sa povećanjem protoka suspenzije, sa sniženjem izlazne temperature vazduha i sa povećanjem mase sloja inertnih čestica, ali se dobija produkt većeg sadržaja vlage. Takođe su ustanovili da specifična potrošnja toplote opada sa povećanjem protoka suspenzije i da je 3 do 4 puta veća

nego u slučaju doziranja tečne faze vode. Hatamipour i Mowla /2002, 2003a, 2003b/ su ispitivali kinetiku sušenja i uticaj radnih uslova na fizičke i strukturne promene pri sušenju uronjenih uzoraka komada šargarepe, graška i kukuruza u fluidizovanom sloju staklenih sfera. Postavili su matematički model koji predviđa brzinu sušenja komada šargarepe u fluidizovanom sloju inertnih čestica. Pan i dr. /2001/ su sušili suspenziju sojinog mleka u vibrofluidizovanom sloju inertnih čestica. Došli su do zaključka da je sušenje sojinog mleka tehnički ostvarljivo i u klasičnom i u vibro fluidizovanom sloju, ali samo pod uslovom da parametri procesa obezbeđuju stabilan rad sistema. Dobili su zapreminske kapacitete isparavanja vode u opsegu od 340 do 860 kg_{H2O}/m³, što je slično ili nešto više od objavljenih vrednosti za klasične fluidizovane i fontanske slojeve. Zhao i dr. /2004/ su vršili sušenje sojinog mleka u modifikovanom fluidizovanom sloju inertnih čestica sa rotirajućim strujanjem (“revolving flow”) vazduha pomoću specijalno konstruisanog distributora na dnu kolone. Dobili su bolje fluidizacione karakteristike i veće zapreminske koeficijente prenosa toplote u odnosu na vibro-fluidizovani sloj. Ustanovili su da se u ovakvom sistemu zapreminski koeficijent prenosa toplote povećava sa povećanjem brzine gasa i protoka suspenzije, ali da opada sa porastom temperature ulaznog gasa, povećanjem statičke visine sloja inertnih čestica i povećanjem početnog sadržaja vlage u suspenziji.

1.2.2. Ispitivanje interakcija između vlažnih inertnih čestica u sloju

Sušenje pastoznih materijala u slojevima inertnih čestica je veoma kompleksna operacija, uglavnom usled velike raznolikosti pastoznih materijala sa različitim karakteristikama, i pored toga što je veliki broj istraživača demonstrirao tehničku izvodljivost sušenja različitih organskih i neorganskih suspenzija i pasta u tim slojevima. Kompleksnost proističe od kohezivnih sila između vlažnih inertnih čestica, koje utiču na fluido-dinamičke karakteristike sloja, što na kraju rezultuje nekontrolisanom aglomeracijom inertnih čestica i lošim kontaktom između gasa i čestica. Efekti interakcija između inertnih čestica na koje je naneta suspenzija u dvofaznom toku gas-čestice su još uvek dosta nejasni i o tome nema mnogo podataka u literaturi. Poslednjih godina intenzivno se vrše istraživanja uticaja prisustva fluida (najčešće glicerola, zatim vode, raznih alkohola, ulja, polimernih suspenzija, itd.) kao i vrste inertnih čestica na fluido-dinamičke karakteristike slojeva inertnih čestica /Link i Schlünder, 1996; Daleffe i Freire, 2004; McDougall i dr., 2005; Passos i Mujumdar, 2000; Trinidad i dr., 2004; Vieira i dr., 2004/.

Link i Schlünder /1996/ su ispitivali mehanizam rasta granula u fluidizovanim slojevima. Analizirali su efekat temperature, protoka gasa i kohezivnih sila na brzinu rasta čestica. Njihovi rezultati su ukazali na značaj međučestičnih sila na brzine sušenja. Daleffe i Freire /2004/ su ukazali da su krive standardne devijacije fluktuacija gradijenta pritiska veoma korisne za sagledavanje promena u fluido-dinamičkim karakteristikama vibrofluidizovanog sloja, koje se ne mogu uočiti samo na osnovu analize zavisnosti gradijenta pritiska od brzine vazduha. Takođe su ustanovili da se analizom standardnih devijacija fluktuacija gradijenta

pritisaka mogu dobiti preciznije vrednosti za minimalne brzine fluidizacije za konvencionalni fluidizovani sloj. McDougall i dr. /2005/ su postavili empirijsku korelaciju za kvantifikaciju promena kvaliteta fluidizacije u funkciji fluktuacija dinamičkog pritiska i relaciju koja povezuje indekse deaeracije sloja, kvaliteta fluidizacije i aglomeracije. Trinidade i dr. /2004/ su uveli korekcije koje uzimaju u obzir efekat međučestičnih sila u prisustvu ne-Njutnovskih fluida u numerički program, koji su Passos i dr. /2004/ iskoristili za simulaciju sušenja eukaliptusovog i bambusovog ulja u laboratorijskoj sušnici sa fontanskim slojem. Vieira i dr. /2004/ su utvrdili da inertne čestice sa velikim kontaktnim uglom (čestice polistirena, polipropilena, polietilena niske gustine) ne zadržavaju suspenziju na svojoj površini, odnosno da se dobija praškasti produkt koji biva iznešen iz sloja.

Ova istraživanja su veoma važna za one aplikacije kad treba izbeći aglomeraciju, a povećati trenje između inertnih čestica, odnosno otiranje produkta sa njihove površine u cilju postizanja većeg kapaciteta produkcije suvog praha.

Međutim, u svim pomenutim sistemima da bi se izbegli problemi usled aglomeracije vlažnih inertnih čestica i adhezije vlažnog materijala koji se suši na zidovima kolone, tj. da bi se održali uslovi stabilnog rada sušnice, uglavnom je neophodna rigorozna kontrola optimalnih radnih parametara.

Za sušenje lepljivih materijala u najširoj komercijalnoj upotrebi su sprej sušnice /Masters, 1985/. Kao alternativa sprej sušnici može se koristiti sušnica sa fontanskim slojem inertnih čestica, koja u izvesnim aplikacijama ima bolje performanse od sprej sušnice /Oliveira i Passos, 1997/.

1.2.3. Fontanski sloj i njegove modifikacije

U literaturi se mogu naći rezultati i analize brojnih ispitivanja fluido-dinamičkih karakteristika i postupaka sušenja suspenzija u fontanskom sloju inertnih čestica /Reger i dr., 1967; Pham, 1983; Schneider i Bridgwater, 1988; Markowski, 1992, Tia i dr., 1995; Spitzner i Freire, 1998a; itd. (videti spisak literature)/. Fontanski slojevi su uspešno primenjeni za sušenje emulzija, kao što je obrano mleko /Barrett i Fane, 1988/; rastvora, kao što su životinjska krv /Pham, 1983; Re i Freire, 1988; Markowski, 1992; Spitzner-Neto i Freire, 1998a; Spitzner-Neto i dr., 2002/, voćni ekstrakti /Re i Freire, 1988/ i natrijum hlorid /Schneider i Bridgwater, 1988/; suspenzija, kao što su alumina dispergovana u vodi /Schneider i Bridgwater, 1988, 1993; Correa i dr., 2004/, pirinčano brašno dispergovano u vodi /Tia i dr., 1995/ i homogenizovano sirovo jaje /Spitzner-Neto i dr., 2002; Correa i dr., 2002/; pasta, kao što su voćne kaše /Reyes i dr., 1996, 1998, 2001/, itd.

Efikasnost sušenja suspenzija u fontanskom sloju inertnih čestica, sa aspekta uklanjanja vlage i produkcije suvog produkta, zavisi od brzine parcijalnih procesa, tj. od brzine sušenja filma suspenzije i od brzine uklanjanja osušenog filma sa površine inertnih čestica. Na brzinu sušenja pre svega utiču temperatura i protok ulaznog vazduha. Ovi parametri određuju koeficijente prenosa mase (vlage) i brzinu cirkulacije inertnih čestica.

Protok suspenzije i masa inertnih čestica u sloju utiču na efikasnost uklanjanja suvog produkta iz sloja.

Sušnica sa fontanskim slojem inertnih čestica je prvi put razvijena u bivšem SSSR-u za sušenje rastvora boja, lakova, šećera i soli /Mathur i Epstein, 1974/. Nakon toga je Pham /1983/ razvio industrijsku sušnicu sa fontanskim slojem inertnih čestica za sušenje životinjske krvi, kao alternativu sprej sušnici, sa kapacitetom $1 \text{ m}^3_{\text{ž.krvi}}/\text{h}$. Ovaj sistem se mogao primeniti i za sušenje drugih proteinskih suspenzija malog viskoziteta i niskog sadržaja masnoća. Na osnovu analize fluido-dinamičkih karakteristika i radnog režima sistema tokom sušenja Pham /1983/ je predložio jednostavni model za predviđanje operativnih parametara. Intenzivna ispitivanja sušenja različitih vrsta materijala ukazala su na neka ograničenja konvencionalnog fontanskog sloja. Mala brzina cirkulacije inertnih čestica i relativno dugo vreme zadržavanja vlažnog materijala u sloju znatno utiču na efikasnost sušenja i osobine materijala koji se suši, naročito ako se radi o termoosetljivim produktima. U velikom broju slučajeva je prekomerna akumulacija sušenog materijala u sloju prouzrokovala blokiranje sloja inertnih čestica. Većinu ovih ograničenja Markowski /1992/ je prevazišao smanjenjem visine sloja inertnih čestica i povećanjem brzine gasa za fontanovanje. U ovakvom fontanskom sloju sa "plitkim slojem i brzim režimom fontanovanja" ("jet spouted bed") je poboljšana cirkulacija inertnih čestica i Markowski /1992/ je na osnovu rezultata dobijenih pri sušenju krvne plazme postavio model u kome je efektivna pogonska sila za termičko sušenje, bazirana na temperaturi površine inertnih čestica, dobijena iz Fourier-ove jednačine za nestacionarni prenos toplote. Sa aspekta kvaliteta produkta njegovi rezultati su takođe bili uporedivi sa sprej sušnicom. Barrett i Fane /1988/ su analizirali mehanizam prenosa toplote i efikasnost uklanjanja suvog produkta sa površine inertnih čestica pri sušenju obranog mleka u fontanskom sloju. Ustanovili su da se prenos toplote i isparavanje vlage uglavnom odvijaju pri dnu kolone, u slučaju kada se suspenzija dozira na dno sloja inertnih čestica. Schneider i Bridgwater /1988/ su objavili eksperimentalne rezultate sušenja neorganskih suspenzija na različitim inertnim česticama. Na osnovu analize stabilnosti fontanskog sloja inertnih čestica u prisustvu suspenzija u funkciji vlažnosti vazduha došli su do zaključka da sloj prestaje da egzistira kada relativna vlažnost vazduha dostigne vrednost od 70% do 80%. Schneider i Bridgwater /1993/ su prethodna istraživanja proširili ispitivanjima uticaja prisustva vode, glicerola i suspenzije alumine na brzinu fontanovanja, visinu fontane, gradijent pritiska u sloju i stabilnosti režima fontanovanja u sloju različitih inertnih čestica. Ustanovili su da su ključni faktori sadržaj tečnosti u sloju inertnih čestica i prisustvo kohezivnih sila između vlažnih inertnih čestica. Na osnovu dobijenih rezultata napravili su dijagram zavisnosti maksimalnog sadržaja tečnosti, pri kome je fontanovanje stabilno, od odnosa inercionih sila koje deluju na inertnu česticu i viskoznih (ili kohezivnih) sila kojima tečni film deluje na površinu inertne čestice ($Q_p d_p u_{s,\text{suv-sloj}}/\mu_f$, gde je u_s brzina gasa u razvijenom fontanovanju). Ovaj dijagram može da posluži za određivanje režima stabilnog fontanovanja. Uvođenjem pomenutog odnosa sila i dinamičkog pritiska ($0.5 \rho_g u_s^2$) u

analizu pokušali su da razjasne mehaniku fontanskog sloja vlažnih inertnih čestica. Re i Freire /1988/ su pri sušenju termoosetljivih materijala u klasičnom fontanskom sloju staklenih ili plastičnih čestica dobili prah koji svojim kvalitetom zadovoljava većinu komercijalnih kriterijuma. Ochoa-Martinez i dr. /1993/ su analizirali uticaj protoka suspenzije, protoka vazduha i ulazne temperature vazduha na ukupni zapreminski koeficijent prenosa toplote u fontanskom sloju polipropilenskih čestica. Ustanovili su da zapreminski koeficijent prenosa toplote raste sa porastom protoka suspenzije, a opada sa povećanjem ulazne temperature vazduha i visine sloja inertnih čestica. Na osnovu analize uticaja raznih surfaktanata dodatih u vodu na koeficijent prenosa toplote, ustanovljeno je da je samo oko 10% površine inertnih čestica u sloju okvašeno tečnošću, odnosno da aktivno učestvuje u sušenju. Tia i dr. /1995/ su sušili vodenu suspenziju pirinčanog brašna na keramičkim kuglicama u fontanskom sloju u “režimu brzog fontanovanja u plitkom sloju”. U zavisnosti od operativnih uslova dobili su vrednosti zapreminskog kapaciteta isparavanja vlage od 30 do 70 kg/m³, što je 60 do 80% više nego u klasičnom cilindričnom fontanskom sloju i 60 do 90% više nego u sprej sušnici. Međutim, termička efikasnost je relativno niska i kreće se u intervalu od 6 do 20%. Predložili su jednostavan model baziran na ukupnim bilansima prenosa mase (vlage) i toplote. Brereton i Lim /1993/ su uspešno sušili otpadni mulj (smeša gvožđe(II)-hidroksida i cink(II)-hidroksida) iz postrojenja za preradu otpadnih voda u polukoloni sa fontanskim slojem krupnog peska. Dobili su prah zadovoljavajućeg kvaliteta. Zapazili su posle 12 časova kontinualnog rada uređaja da se formirao tanak uniformni sloj produkta na inertnim česticama, međutim, nisu zapazili nestabilnosti u toku rada sušnice. Boizan i dr. /1996/ su rad Brereton-a i Lim-a /1993/ proširili ispitivanjem uticaja operativnih parametara na sadržaj vlage u produktu, kao i ispitivanjem uticaja na radni režim pri sušenju bez inertnih čestica. Sušenje mulja oksida metala su vršili u istoj aparaturi kao u prethodnom radu, s tim što su inertne čestice bile staklene sfere različitih prečnika. Stepenu sušenja, odnosno sadržaj vlage u osušenom produktu, su grubo korelisali u funkciji prečnika inertnih čestica, statičke visine sloja inertnih čestica, protoka mulja, protoka vazduha i temperature ulaznog vazduha. Ustanovili su da je, za opseg ispitivanih uslova, dominantni kontrolni parametar procesa ulazna temperatura vazduha. Tokom sušenja mulja sa i bez inertnih čestica nisu zapazili bitne razlike u radnom režimu, osim kasnije pojave praha na izlazu sušnice u slučaju sušenja bez inertnih čestica. Na osnovu toga su zaključili da u ovom slučaju ulogu inertnih čestica u mehanizmu sušenja preuzimaju suve grudvice produkta. Oliveira i Passos /1997/ su razvili model za simulaciju sušenja razblaženih suspenzija u koničnom fontanskom sloju inertnih čestica i dobili su dobro slaganje sa eksperimentalnim podacima Pham-a /1983/. Passos i dr. /1997/ su analizirali performanse koničnog fontanskog sloja sa različitim inertnim česticama pri sušenju različitih pasta (koristili su eksperimentalne podatke drugih autora) u odnosu na dimenzije kolone, fluido-dinamičke karakteristike i osobine pastoznih materijala. U radu su prikazali eksperimentalne podatke i podatke dobijene na osnovu modela Oliveira-e i Passos-a /1997/. Spitzner-Neto i Freire /1998a/ i Spitzner-Neto i dr. /2002/

su ispitivali uticaj prisustva različitih pastoznih materijala (homogenizovano jaje, životinjska krv, suspenzija ksantan gume) na promene radnog režima sušnice sa fontanskim slojem staklenih kuglica na osnovu analize gradijenta pritiska, minimalne brzine fontanovanja i zadržavanja sušenog materijala u sloju u odnosu na protok suspenzije. Ustanovili su da u prisustvu suspenzije gradijent pritiska opada a minimalna brzina fontanovanja raste sa povećanjem protoka suspenzije, osim u slučaju doziranja vode, koju su koristili kao referentnu "idealnu" suspenziju. Pri većim protocima suspenzija minimalna brzina fontanovanja počinje da opada. Njihovi rezultati pokazuju da različite reološke karakteristike suspenzija prouzrokuju različite promene ispitivanih parametara. Reyes i dr. /1996, 1998/ su upoređivali fluido-dinamičke karakteristike i kapacitete isparavanja vlage za nekoliko suspenzija (voda-"idealna suspenzija", smeša vode i karbohidrata i kaša jabuke) za tri tipa sušnica sa inertnim česticama: sušnica sa fontanskim slojem, sušnica sa fluidizovanim slojem i pneumatska sušnica. Najveći kapacitet isparavanja vlage su dobili u fluidizovanom sloju inertnih čestica, a najmanji u pneumatskoj sušnici. U slučaju sušenja voćne kaše kapacitet isparavanja vlage drastično opada u sušnicama sa fluidizovanim i fontanskim slojem inertnih čestica usled značajne akumulacije sušenog materijala na površini inertnih čestica. Da bi prevazišli probleme prilikom sušenja suspenzija koje imaju veliki viskozitet ili koje tokom sušenja generišu viskozno-elastične filmove, Reyes i Vidal /2000/ i Reyes i dr. /2001/ primenjuju mehaničko mešanje fluidizovanog i fontanskog sloja inertnih čestica. Ustanovili su da mehanička agitacija značajno povećava otiranje suvog produkta iz sloja, a samim tim i kapacitet isparavanja vlage. U sušnici sa fontanskim slojem inertnih čestica uvođenjem mehaničke agitacije se gube karakteristične zone sloja, čime fontanski sloj prelazi u pseudofluidizovani sloj /Reyes i Vidal, 2000/. Reyes i dr. /2001/ su ustanovili znatno veće povećanje kapaciteta isparavanja vlage u fluidizovanom sloju nego u fontanskom u odnosu na slojeve bez agitacije. U oba tipa sušnica sa mehaničkom agitacijom su zapazili znatno manje zadržavanje sušenog materijala u sloju. Međutim, u slučaju voćne kaše nisu postigli bitnija poboljšanja, jer je usled lepljivosti suspenzije (visoka koncentracija šećera) zadržavanje produkta u sloju ("hold-up") bilo značajno, a termička efikasnost sušenja mala. Benali i Amazouz /2002/ su ispitivali mogućnost primene fontanskog sloja sa teflonskim česticama ("režim brzog fontanovanja u plitkom sloju") za sušenje kašastog otpada iz mesnoprerađivačke industrije u cilju dobijanja komercijalno upotrebljivog praškastog produkta. S obzirom da se kaša sastoji uglavnom od proteina i masnoća, za smanjenje lepljivosti kaše su dodavali aditive i analizirali njihov uticaj na stabilnost fontanskog sloja inertnih čestica. Zapazili su da bez aditiva do slepljivanja inertnih čestica u sloju dolazi nakon samo nekoliko minuta. Ustanovili su da dodatak kalcijum(II)-karbonata bitno smanjuje lepljivost kaše i povećava produktivnost sušnice za 65 do 70%, pri čemu je dobijen produkt zadovoljavajućeg kvaliteta. U istom sistemu sa "režimom brzog fontanovanja u plitkom sloju" teflonskih čestica Benali i Amazouz /2005/ su ispitivali efikasnost sušenja rastvora voćnog skroba kao i kvalitet dobijenog produkta. Ustanovili su da je izlazna temperatura vazduha ključni

kontrolni faktor za dobijanje produkta optimalnog kvaliteta i visoku efikasnost sušenja. Da bi postigli ovakve uslove (efikasnost oko 90% i optimalan kvalitet praha) zaključili su da za ispitivani materijal temperatura ulaznog vazduha ne sme preći 180°C, a početni sadržaj suve materije u rastvoru voćnog skroba treba da iznosi oko 36%.

Osnovni problem koji se javlja kod ovih sušnica je aglomeracija i nestabilnost fontanskog sloja inertnih čestica usled prevelikog protoka suspenzije i neefikasne cirkulacije inertnih čestica, naročito u slučaju izuzetno lepljivih suspenzija. Da bi se ovaj problem prevazišao od izuzetnog je značaja predviđanje optimalnih radnih uslova za svaki pojedini materijal koji se suši.

Pored izvesnih prednosti klasičan fontanski sloj ima nekoliko nedostataka: relativno veliki pad pritiska kroz sloj, probleme pri startovanju sistema, ograničene promene dimenzija sloja usled hidrodinamike sistema, protoci fluida i čestica su fiksirani u zavisnosti od ukupnog protoka fluida na ulazu u sloj i geometrije sistema, protok vazduha neophodan za fontanovanje je veći od protoka koji je potreban za prenos mase i toplote. U konvencionalnim sušnicama sa fluidizovanim, fontanskim ili uskovitlanim slojem inertnih čestica fluidizovano stanje inertnih čestica se postiže strujom vazduha relativno velike brzine, koja je iznad minimalne brzine fluidizacije. Stoga je za ovakve sušnice karakteristično značajno korišćenje energije i značajan pad pritiska u sloju. Prema Kudra i dr. /1989/, sa aspekta ekonomske efikasnosti sušenja ova dodatna energija potrebna za dovođenje inertnih čestica u stanje intenzivnog kretanja predstavlja trošak. Jedno od rešenja koje prevazilazi ova ograničenja pri sušenju suspenzija je sušnica sa mehanički fontanovanim slojem, koji zadržava prednosti sušnica sa fluidizovanim i fontanskim slojem inertnih čestica, sa smanjenim korišćenjem energije. Karakteristična cirkulacija inertnih čestica u fontanskom sloju je obezbeđena sa centralno postavljenim pužnim transporterom (tzv. mehanička fontana). Vazduh se tangencijalno uvodi na dnu sloja čime se poboljšava kontakt između gasa i inertnih čestica. Usled mehaničkog transporta cirkulacija inertnih čestica je nezavisna od protoka ulaznog vazduha, koji se može podesiti na optimalnu vrednost potrebnu za efikasno sušenje sa aspekta iskorišćenja energije i proizvodnosti.

Kudra i dr. /1989/ su ispitivali efikasnost sušenja nekoliko suspenzija (CaCO_3 , krvna plazma, ZnO i Zn(OH)_2) u sušnici sa mehanički fontanovanim slojem inertnih čestica (sa centralno postavljenim pužnim transporterom). Generalno je ovaj tip sušnice pokazao bolje karakteristike u odnosu na konvencionalni fontanski sloj sa aspekta specifične potrošnje toplote, zapreminskog kapaciteta isparavanja vlage i specifične potrošnje vazduha (agensa za sušenje). Međutim, ovi autori su ustanovili da je stabilan rad sušnice i intenzivno kretanje inertnih čestica izvodljivo do neke maksimalne vrednosti protoka suspenzije, koja zavisi od osobina sušenog materijala, osobina inertnih čestica, uslova za prenos toplote i mase, cirkulacije inertnih čestica, itd. U slučaju sušenja suspenzije CaCO_3 zapazili su da pri ulaznom protoku suspenzije iznad 310 kg/(m³h), i pored kontinualnog rada pužnog transportera, dolazi do skoro potpunog prestanka kretanja inertnih čestica i naglog porasta sadržaja vlage u produktu. Szentmarjay i dr. /1996a/ su

razvili softverski sistem za kontrolu i regulaciju procesa sušenja u mehanički fontanovanom sloju kuglica poliformaldehida (sa centralno postavljenim pužnim transporterom) na bazi hidrodinamičkih karakteristika sistema i ukupnih bilanasa mase i toplote za sušnicu. Uspešno testiranje numeričkog modela i kontrolnog sistema su izvršili sa suspenzijama pivskog kvasca i skroba. Szentmarjay i dr. /1996b/ su prikazali eksperimentalne rezultate sušenja termoosetljivih i bioaktivnih suspenzija (pekarski kvasac i paradajz pire) u laboratorijskoj sušnici sa mehanički fontanovanim slojem staklenih ili plastičnih kuglica. Ustanovili su da je sušenje ovih suspenzija izvodljivo ako je ulazni protok suspenzije takav da se obezbedi formiranje vrlo tankog filma na površini inertnih čestica. U tom slučaju otpor unutrašnjoj difuziji je zanemarljiv i sušenje se odvija u režimu “kvazi-konstantne” brzine sušenja. Na osnovu analize procesa došli su do optimalnih operativnih uslova “brzog sušenja” (oko nekoliko sekundi) za dobijanje prahova zadovoljavajućeg kvaliteta. Szentmarjay i Pallai /2000/ su uspešno sušili suspenziju $AlO(OH)$ u laboratorijskoj sušnici sa mehanički fontanovanim slojem kuglica poliformaldehida (sa centralno postavljenim pužnim transporterom). Na osnovu laboratorijskih ispitivanja su došli do optimalnih parametara za izvođenje procesa u stabilnom radnom režimu koje su upotrebili za uvećanje razmera procesa i realizaciju industrijskog postrojenja za sušenje suspenzije $AlO(OH)$ kapaciteta isparavanja $100 \text{ kg}_{H_2O}/h$. Pallai i dr. /2001/ su analizirali uticaj i značaj parcijalnih procesa tokom sušenja suspenzija na inertnim česticama na kvalitet produkta. Sušnicu koju su koristili u prethodnim radovima /Kudra i dr., 1989; Szentmarjay i dr., 1996a, 1996b; Szentmarjay i Pallai, 2000/ su u ovom radu modifikovali na taj način što su gornji deo pužnog transportera postavili u kućište, tj. cevni umetak, sa ciljem da poboljšaju kontrolu parcijalnih procesa sušenja (oblaganje inertnih čestica suspenzijom, sušenje filma suspenzije i otiranje osušenog filma sa površine inertnih čestica). Veličina čestica produkta se može kontrolisati brzinom i dužinom transporta inertnih čestica kroz “mehaničku fontanu”, tj. brzinom rotiranja i dužinom vertikalnog pužnog transportera. Navedenom modifikacijom su postigli mogućnost povećanja dužine pužnog transportera nezavisno od visine sloja. Demonstrirali su bolje karakteristike ovog sistema pri sušenju krompir kaše u odnosu na nemodifikovani sistem (bez cevnog umetka) i sa aspekta granulometrijskog sastava osušenog produkta i sa aspekta kontrole pada pritiska u sloju inertnih čestica. Kutsakova /2004/ je pokušala da poboljša performanse sušnice nešto drugačijom modifikacijom od prethodnih. Specijalni tip distributora vazduha na dnu kolone formira fontanski sloj inertnih čestica koje se u vidu vrtloga kreću oko umetka u obliku kupe. Da bi se povećalo efektivno otiranje osušenog produkta sa površine inertnih čestica u gornji deo aparature je postavljen drugi distributor vazduha koji formira sekundarni fontanski sloj koji se vrtložno kreće u suprotnom smeru u odnosu na prethodni. Ovakva geometrija i odnos protoka vazduha omogućavaju formiranje takvih vrtložnih suprotno-strujnih tokova u kojima inertne čestice dobijaju maksimalnu kinetičku energiju u zoni interakcije uz minimalnu potrošnju energije. U ovom radu autor samo predstavlja princip rada i osnovne karakteristike sušnice, koristeći poluempirijsku zavisnost za “hold-up” produkata u sloju,

koja je data u radu Kutsakova-e i Utkin-a /1987/. Autor tvrdi da se u ovakvom tipu sušnice mogu uspešno sušiti različiti materijali, od termički nestabilnih mikrobioloških materijala do termički otpornih rastvora soli, međutim, u radu nema eksperimentalnih podataka, tj. eksperimentalne verifikacije navedenih tvrdnji.

Razvoj fontanskog i fontansko-fluidizovanog sloja sa kontrolisanim strujanjem faza takođe je uslovljen nedostacima fontanskog i fontansko-fluidizovanog sloja. I pored velike specifične površine u sloju inertnih čestica u konvencionalnoj sušnici sa fontanskim slojem samo se mala frakcija efektivno koristi u toku sušenja /Ochoa-Martinez i dr., 1993/ i to od 2 do 10% ukupne površine u zavisnosti od operativnih uslova. Maksimalna frakcija okvašenog sloja inertnih čestica koja se može ostvariti pri datoj ulaznoj temperaturi vazduha, brzini fontanovanja i protoku suspenzije je ograničena stabilnošću fontane. Osnovna modifikacija je upotreba cevnog umetka postavljenog u osi sloja inertnih čestica na određenom rastojanju od dna kolone, tj. mlaznice, što značajno snižava pad pritiska u sloju. Na ovaj način sloj je fizički podeljen na dve zone: vertikalni transport inertnih čestica u cevnom umetku i pokretan pakovani sloj inertnih čestica u anularnom prostoru. Ovako modifikovani sistemi su vrlo fleksibilni u odnosu na karakteristike procesa koji se u njima izvodi, s obzirom da je veoma lako podešavati i regulisati protok gasa u mlaznom toku, protok gasa u anularnom prostoru i brzinu cirkulacije inertnih čestica. Cevni umetak stabilise sloj, onemogućava penetraciju fluida iz centralnog dela sloja u anularni deo i primorava sve inertne čestice da pređu isti put.

U literaturi nema mnogo informacija o sušenju suspenzija i rastvora nanošenjem na inertne čestice u fontansko-fluidizovanom sloju i u fontanskom sloju sa cevnom umetkom. Pored ispitivanja fluido-dinamičkih karakteristika i prenosa toplote u ovim sistemima, najčešće su vršena ispitivanja sušenja zrnastih materijala od kojih je sloj i obrazovan.

Fontansko-fluidizovani sloj inertnih čestica sa cevnom umetkom su koristili Hadžismajlović i dr. /1989/, Povrenović i dr. /1992/ i Povrenović /1998, 2003/ za sušenje različitih rastvora i suspenzija. Hadžismajlović i dr. /1989/ i Povrenović i dr. /1992/ su uspešno sušili različite suspenzije i rastvore na polipropilenskim česticama: obrano i punomasno mleko, životinjsku krv, sok paradajza, sok limuna, belance, sojino mleko, kvasac i čaj i neke njihove kombinacije. Rezultati njihovih ispitivanja su pokazali da je prisustvo cevnog umetka poboljšalo performanse sušnice u odnosu na konvencionalni fontanski sloj i da ovaj tip sušnice ima znatno veći zapreminski kapacitet isparavanja vlage u odnosu na sprej sušnicu. Dodatna aeracija anularnog prostora povećava kapacitet isparavanja i cirkulaciju inertnih čestica. Ponovno kvašenje inertnih čestica u zoni naprskavanja je izbegnuto upotrebom cevnog umetka. Dobijen je isti kvalitet dobijenih produkata kao u sprej sušnici. Povrenović /1998/ je objavio eksperimentalne rezultate sušenja suspenzija neorganskih preparata za zaštitu bilja na bazi bakra: bordovska čorba (smeša kalcijum(II)-hidroksida i bakar(II)-tetra-okso-sulfata), bakar(II)-hidroksid, bakar-oksi-hlorid, i sl.) u poluindustrijskoj sušnici sa fontansko-fluidizovanim slojem inertnih čestica i cevnom umetkom, koji su bili osnova za realizovanu industrijsku sušnicu u HI

ZORKA, Šabac. Rezultati su pokazali da se ovakav sistem može koristiti za efikasno sušenje suspenzija u stabilnom hidrodinamičkom režimu. Povrenović /2003/ je ispitivao sušenje suspenzija različitih bioloških materijala i funkcionalnih hranljivih produkata u sušnici sa fontansko-fluidizovanim slojem inertnih čestica i cevnom umetkom. Dobijeni su prahovi zadovoljavajućih karakteristika pri sušenju životinjske krvne plazme, smeša pivskog kvasca sa fermentisanim sokom cvekle i fermentisanog sojinog mleka. Osorio-Revilla i dr. /2004/ su koristili fontansko-fluidizovani sloj polipropilenskih čestica sa uronjenim cevnom umetkom za sušenje rastvora maltodekstrina. Analizirali su hidrodinamičke karakteristike sušnice određivanjem vertikalnog profila anularnog protoka vazduha pri različitim brzinama fontanovanja. Ispitivali su performanse sušnice pomoću karakterističnih parametara: sadržaja vlage u osušenom produktu i zapreminskog kapaciteta isparavanja vlage. Ove parametre su uporedili sa parametrima dobijenim u konvencionalnoj sušnici sa fontanskim slojem inertnih čestica i sprej sušnici pri sušenju rastvora maltodekstrina pod istim operativnim uslovima. U odnosu na sprej sušnicu zapreminski kapacitet isparavanja vlage je 56 puta veći u fontanskom sloju, a 59 puta veći u fontansko-fluidizovanom sloju sa uronjenim cevnom umetkom.

1.2.4. Pregled modela sušenja

Uslov za razvoj i projektovanje industrijskih sistema za sušenje na inertnim česticama je postojanje modela koji na zadovoljavajući način opisuju sušenje suspenzija i koji imaju mogućnost kvantitativnog predviđanja radnih parametara. I pored intenzivnih istraživanja postupaka sušenja rastvora i suspenzija na inertnim česticama, pa čak i komercijalizacije nekoliko tipova sušnica, u literaturi nema još uvek dovoljno informacija o fizičkom modelovanju procesa, bez kojih su projektovanje i praktična realizacija uređaja za sušenje komplikovani. S obzirom da se ova tehnologija može realizovati u različitim hidrodinamičkim režimima oni će uticati na mehanizam sušenja, a samim tim i na matematički model procesa /Leontieva i dr., 2002/. Pored ovoga, na mehanizam sušenja, samim tim i na matematički model sušenja u konkretnom tipu sušnice, bitno utiču i karakteristike materijala koji se suši. Adekvatno modelovanje sušenja treba da obuhvati dobru procenu kinetike sušenja, koeficijente prenosa mase (vlage) i toplote i vreme zadržavanja čvrste faze tokom sušenja /Correa i dr., 2002/. Ovi parametri se mogu proceniti na osnovu velikog broja jednačina, od fenomenoloških modela do empirijskih korelacija, zavisno od uređaja i operativnih uslova sušenja. Bitna karakteristika sušenja je njegova spora dinamika, odnosno kad se proces poremeti, tj. izvede iz stacionarnog stanja, sistem sporo dolazi u novo stacionarno stanje. Pored toga, sušenje često ima dug vremenski odziv. Modeli sušenja koji uključuju fenomene prenosa mase (vlage) i toplote su uglavnom prikazani nelinearnim izrazima. Predviđanje procesnih parametara nije u potpunosti pouzdano usled kompleksnosti zakona fenomena prenosa. Stoga, identifikacija postupka sušenja nije lak zadatak jer se ovi parametri ne mogu lako odrediti.

U literaturi se može naći veliki broj modela sušenja zrnastih materijala u fluidizovanom i fontanskom sloju i njihovim modifikacijama. Takođe, postoji veliki broj radova koji se bavi ispitivanjem kinetike sušenja različitih suspenzija na pojedinačnim inertnim česticama /napr. Konovalov i dr., 2003; Leontieva i dr., 2004/, kao i u šaržnim procesima u fluidizovanom sloju inertnih čestica /napr. Lee i Kim, 1999; Heinrich i dr., 2003/. Modela za kontinualno sušenje suspenzija u fluidizovanom sloju inertnih čestica ima vrlo malo, i uglavnom se baziraju na ukupnim bilansima mase i toplote /napr. Taruna i Jindal, 2002/.

Konovalov i dr. /2003/ su predložili metod za određivanje kinetike sušenja za konvektivno sušenje pljosnatih tankih slojeva različitih vrsta pastoznih materijala (uglavnom termoosetljivih). Metoda je zasnovana na fenomenološkoj analizi zavisnosti temperature od sadržaja vlage sa vremenom i identifikaciji temperaturnih platoa u zavisnosti od uslova sušenja. Takođe su predložili matematički model koji se bazira na diferencijalnim bilansima prenosa mase i toplote i dali analitička rešenja modela za višeslojnu ravnu ploču, sferu i cilindar. Predloženi model su verifikovali eksperimentalnim podacima dobijenim pri sušenju 12 različitih organskih i neorganskih pasta nanetih na ravnu pločicu.

Leontieva i dr. /2004/ su vršili teorijska i eksperimentalna ispitivanja kinetike sušenja pastoznih pigmenta nanetih na inertnu keramičku sferu. Analizirali su uticaj temperature i brzine vazduha na kinetiku prenosa mase (vlage) i toplote, kao i na otpadanje (ljuštenje) sloja osušenog materijala sa površine inertne sfere. Predložili su matematički model baziran na bilansima prenosa mase i toplote pod pretpostavkom da nema gradijenata temperature i gradijenata sadržaja vlage kroz sloj vlažnog materijala koji oblaže inertnu sferu. Validaciju predloženog modela su izvršili upoređenjem sa eksperimentalno utvrđenim kinetikama prenosa mase (vlage) i toplote pri sušenju paste R-soli (gusta vodena suspenzija veoma sitnih čestica pigmenta) nanete na nepokretnu inertnu sferu i sa eksperimentalnim rezultatima dobijenim pri sušenju paste R-soli vazduhom u industrijskoj sušnici sa fontanskim slojem fluoroplastičnih čestica. Odstupanja modela od eksperimentalnih vrednosti su između 7 i 9%.

Lee i Kim /1999/ su predložili model za predviđanje temperature sloja, vlažnosti izlaznog gasa, sadržaja vlage u produktu za šaržno sušenje pastoznih materijala u fluidizovanom sloju inertnih čestica. Fluidizovani sloj su razmatrali kao trofazni sistem, koji se sastoji od faze mehura ($U > U_{mf}$), čvrste faze iz emulzije i gasovite faze iz emulzije ($U = U_{mf}$). U model su uključeni izrazi za ukupne koeficijente prenosa mase i toplote između međučestične gasne faze i čvrstih faza (sitne vlažne čestice i inertne čestice), koje su isti autori postavili za predloženi mehanizam sušenja: adhezija sitnih vlažnih čestica na površinu inertnih čestica, isparavanje vode i otiranje i odnošenje sitnih čestica produkta iz sloja inertnih čestica. Dobili su dobro slaganje sa eksperimentalnim rezultatima dobijenim pri sušenju sitnih vlažnih čestica skroba u fluidizovanom sloju staklenih sfera.

Heinrich i dr. /2003/ su razvili komplikovan trodimenzioni matematički model prenosa mase i toplote u fluidizovanom sloju inertnih čestica u koji se naprskava tečnost u cilju simulacije kotiranja i granulacije. Model sistem je bio pilot uređaj sa fluidizovanim slojem staklenih ili poroznih drvenih sfera u koji se naprskava tečna faza vode. Predloženi model omogućava predviđanje efikasnosti kvašenja i efikasnosti raspodele raspršenih kapi tečnosti unutar fluidizovanog sloja, pri čemu je uzeto u obzir i isparavanje tečnosti sa površine inertnih čestica. Vizualizacija procesa je izvršena pomoću programskog paketa Matlab. Verifikacija modela je izvršena na osnovu izmerenih profila temperatura u pilot uređaju.

Na osnovu izloženog pregleda literature može se uočiti da je najveći broj ispitivanja posvećen sušenju suspenzija u konvencionalnom fontanskom sloju inertnih čestica. S obzirom da je dinamika otiranja suvog produkta sa površine inertnih čestica kritična za hidrodinamičku stabilnost rada sušnice, konični fontanski sloj je konfiguracija koja se preferira pošto omogućuje intenzivno kretanje inertnih čestica koje utiče na otiranje osušenog produkta usled trenja i sudara. Takođe se pokazalo da konični fontanski sloj ima veću energetska efikasnost u odnosu na cilindrični fontanski sloj. Usled toga se u literaturi može naći najviše modela za predviđanje radnog režima pri sušenju u konvencionalnom koničnom fontanskom sloju inertnih čestica.

Spitzner-Neto i Freire /1998b/ su dali pregled sedam modela iz literature za predviđanje radnog režima sušnice sa fontanskim slojem inertnih čestica. Analizirali su hipoteze i pretpostavke prezentovane u tim modelima, njihova ograničenja i praktičnu primenljivost. Izvršili su kvalitativno poređenje nekoliko modela na bazi literaturnih podataka dobijenih pri sušenju životinjske krvi i aluminijum(III)-hidroksida u koničnom fontanskom sloju inertnih čestica.

Pham /1983/ je predložio jednostavan model za sušnicu sa klasičnim fontanskim slojem inertnih čestica sa jasno razdvojenim zonama fontane i anulusa. Razvoj ovog modela je baziran na hidrodinamičkim karakteristikama fontanskog sloja i eksperimentalnim rezultatima dobijenim pri sušenju životinjske krvi. Postavljajući energetske bilanse za inertne čestice i vazduh dobio je zavisnost maksimalnog protoka suspenzije od temperature izlaznog vazduha i sadržaja vlage ulaznog vazduha. Mada nije pretpostavljena interakcija između ovih zona, tj. pretpostavljeno je da se sušenje odvija isključivo u anularnoj zoni sloja, i zanemareni su toplotni gubici, Pham /1983/ je dobio zadovoljavajuće slaganje između eksperimentalnih podataka i podataka dobijenih na osnovu postavljenog modela.

Barret i Fane /1988/ su predložili realniji model u kome je fontanski sloj inertnih čestica podeljen u tri zone: anulus, fontanu i spoljnu fontanu, i koji uzima u obzir interakcije između gasa i čestica. Pretpostavili su da se konvektivni prenos mase i toplote odvija na dnu sloja i u fontani. Međutim, za ovaj kvalitativni model baziran na njihovim zapažanjima nije data matematička formulacija.

Markowski /1992/ je postavio model baziran na ispitivanjima sušenja krvne plazme u fontanskom sloju inertnih čestica sa "režimom brzog fontanovanja u plitkom sloju". Pri formulisanju svog modela Markowski /1992/ je pretpostavio da se sušenje u "režimu brzog

fontanovanja u plitkom sloju” odvija na sličan način kao što su predložili Barret i Fane /1988/, sa tom razlikom što je pretpostavio: da toplota za isparavanje vlage potiče i od inertnih čestica (kondukcija) i od vazduha (konvekcija), da se sušenje odvija samo u fontani, da se povećava razlika između temperature površine inertnih čestica i srednje temperature sloja pošto temperaturni gradijent unutar čestice raste usled velike brzine cirkulacije čestica. Matematička formulacija modela obuhvata ukupne bilanse prenosa mase i toplote i konvencionalni izraz za brzinu sušenja, pri čemu je pogonska sila za sušenje bazirana na temperaturi površine inertnih čestica, dobijena iz Fourier-ove jednačine za nestacionarni prenos toplote.

Tia i dr. /1995/ su predložili jednostavan model za sušenje suspenzija u sušnici sa “režimom brzog fontanovanja u plitkom sloju”, koji se bazira na konceptu tri zone iz modela Markowski-og /1992/ i ukupnim bilansima prenosa mase i toplote. Pretpostavili su: da je sloj inertnih čestica u režimu brzog fontanovanja, gde je poroznost u fontani i anulusu približno ista, da tečnost uniformno oblaže inertne čestice, da su gasovita i čvrsta faza dobro izmešane, da do uklanjanja filma suspenzije sa inertne čestice dolazi kad vlaga unutar filma dostigne ravnotežnu vrednost i da je temperatura suvog produkta jednaka izlaznoj temperaturi vazduha. Ravnotežni sadržaj vlage materijala koji se suši su korelisali na osnovu svojih eksperimentalnih podataka. Za ovaj model nisu potrebni podaci o prenosu toplote i brzini sušenja, tako da se može primenjivati za približnu procenu performansi sušnice.

Oliveira i Freire /1996/ su razvili model koji se zasniva na zapažanjima da sušenje pastoznih materijala nije striktno ograničeno na jednu zonu, već da se sušenje odvija u sve tri zone sloja inertnih čestica (anulus, fontana i spoljna fontana). Uopštena pretpostavka ovog modela je da svaka pojedina zona sloja učestvuje u isparavanju vlage u proporciji koja je određena koeficijentima prenosa mase i toplote za svaku zonu, vremenima zadržavanja u svakoj od zona i lokalnim gradijentima temperature i sadržaja vlage u vazduhu. U ovom modelu je zanemaren uticaj prisustva suspenzije na hidrodinamičko ponašanje sloja inertnih čestica, a koji evidentno postoji na osnovu ispitivanja ovih uticaja u radovima koji su ranije prikazani. Takođe, za rešavanje ovog modela je potreban veliki broj ulaznih parametara koji se moraju eksperimentalno odrediti, što predstavlja ograničenje za širu praktičnu primenu.

Oliveira i Passos /1997/ su razvili numerički model sa n cilindričnih segmenata za konični fontanski sloj inertnih čestica za koji je bezdimenzioni parametar $A = \frac{(q_f \cdot U_t \cdot U_{mf})}{[(q_p - q_f) \cdot g \cdot D_n]} < 0.014$. Svaki od segmenata se ponaša kao fontansko-fluidizovani sloj, osim prvog, koji se ponaša kao konvencionalni fontanski sloj. Bilanse za prenos mase i toplote za vazduh, inertne čestice i suspenziju su postavili za svaki segment, i za anulus i za fontanu. Pretpostavili su da do isparavanja vlage dolazi samo u anularnoj zoni sloja. Korišćenjem odgovarajućih korelacija za predviđanje fluido-dinamičkih parametara i koeficijenata prenosa mase i toplote ovaj model može predvideti vlažnost

vazduha i temperaturu kao i njihove aksijalne profile. Oliveira i Passos /1997/ su dobili dobro slaganje modela sa eksperimentalnim podacima Pham-a /1983/.

Correa i dr. /2002/ su prezentovali sistem za softversku "on-line" regulaciju sušenja suspenzija u fontanskom sloju inertnih čestica, koji se samo-ažurira simultano sa promenama u procesu. U ovu svrhu su razvili adaptivni algoritam sa višeparametarskom kontrolom koji je testiran sa vodom, kao idealnom suspenzijom. Pokazali su da sušnica sa fontanskim slojem uz predloženi višeparametarski regulacioni sistem može da održava zadovoljavajući kvalitet produkta, tj. pri sušenju suspenzije jaja rezidualna vlaga u prahu je iznosila do 4%. Correa i dr. /2004/ su primenili višeparametarski regulacioni sistem na industrijskoj sušnici sa fontanskim slojem inertnih čestica u cilju automatizacije procesa sušenja suspenzije Al_2O_3 . Regulacioni sistem vrši kontrolu produkcije praha i rezidualne vlage praha pomoću "on-line" praćenja nekoliko procesnih parametara: produkcije praha, gradijenta pritiska u sloju, protoka vazduha i temperature unutar sloja. Na osnovu vrednosti ovih parametara se podešavaju dve promenljive veličine sistema: ulazni protok suspenzije i snaga grejača za zagrevanje vazduha. U slučaju suspenzija složenijih reoloških karakteristika u odnosu na Al_2O_3 (napr. punomasno mleko) autori preporučuju i podešavanje ulaznog protoka vazduha u cilju sprečavanja blokiranja sloja inertnih čestica.

Costa i dr. /2001/ su razvili numerički program za simulaciju sušenja suspenzija, kao što su organski i biološki materijali, u koničnom fontansko-fluidizovanom sloju inertnih čestica. Model kombinuje modele strujanja gasa i cirkulacije inertnih čestica sa jednačinama kinetike sušenja i bilansima prenosa mase i toplote za tri faze: vazduh, inertne čestice i suspenziju. U model je uključen i efekat kohezivnih sila između inertnih čestica usled prisustva suspenzije. Korelacije za parametre u stanju minimalnog fontanovanja se određuju eksperimentalno, da bi se uključio i efekat prisustva suspenzije. Hidrodinamičko modelovanje se bazira na modelu Oliveira-e i Passos-a /1997/. Model se rešava po n cilindričnih segmenata sloja. Na osnovu ukupnih bilanasa mase i toplote postavljenih za sušnicu određuju se temperatura i vlažnost izlaznog vazduha. Predloženi model daje dobro slaganje sa eksperimentalnim podacima dobijenim pri isparavanju tečne faze vode, kao i sa eksperimentalnim podacima Pham-a /1983/ dobijenih pri sušenju životinjske krvi.

Szentmarjay i dr. /1996a/ su razvili softverski sistem za kontrolu i regulaciju sušenja u mehanički fontanovanom sloju kuglica poliformaldehida (sa centralno postavljenim pužnim transporterom) na bazi hidrodinamičkih karakteristika sistema i ukupnih bilansa mase i toplote za sušnicu. Na osnovu "on-line" praćenja nekoliko procesnih parametara i proračuna na osnovu modela vrši se korekcija ulazne temperature vazduha. Uspešno testiranje numeričkog modela i kontrolnog sistema su izvršili sa suspenzijama pivskog kvasca i skroba.

Littman i dr. /2000/ su postavili model za isparavanje vode u režimu pneumatskog transporta krupnih staklenih sfera, odnosno u cevnom umetku fontansko-fluidizovanog sloja. Hidrodinamičko modelovanje retkog dvofaznog vertikalnog toka se zasniva na bilansima prenosa količine kretanja za pojedinačne faze u zoni ubrzavanja inertnih čestica.

Littman i dr. /2000/ su zanemarili trenje inertne čestice-zid cevi, koeficijent trenja fluid-zid cevi su određivali za turbulentno strujanje fluida kroz cev bez prisustva inertnih čestica, a efektivni koeficijent trenja fluid- inertne čestice su određivali iz njihove korelacije za staklene sfere prečnika 1 mm u zoni ubrzavanja čestica. Postavili su jednodimenzione bilanse mase i toplote za gasovitu fazu, inertne čestice i vodu u cevnom umetku. Pretpostavili su da se formira uniformni tanki film tečnosti na površini inertnih čestica. U model su uključili i temperaturni gradijent unutar inertnih čestica. Pretpostavili su da je opravdano za redak dvofazni tok izračunavati koeficijente prenosa mase i toplote iz odgovarajućih korelacija za usamljenu česticu u beskonačnom fluidu. Predloženi model kao rešenje daje promenu hidrodinamičkih parametara, temperatura i sadržaja vlage duž cevnog umetka. Autori nisu u okviru rada dali eksperimentalnu verifikaciju predloženog modela.

Blasco i dr. /1996/ su predstavili model za predviđanje procesnih parametara sušenja suspenzija na inertnim česticama u pneumatskoj sušnici. Postavili su jednodimenzione bilanse količine kretanja, mase i toplote za diferencijalni segment cevi. Osnovne pretpostavke ovog modela su da se gasovita faza može posmatrati kao idealan gas, da je uniformna radijalna distribucija inertnih čestica, da je vertikalni transport u režimu retkog toka, da su inertne čestice uniformne veličine i da je film suspenzije na inertnim česticama konstantne debljine. Upotrebom odgovarajućih korelacija za koeficijente trenja, prenosa mase i toplote model daje profile temperatura, sadržaja vlage i brzina duž cevi. U radu su autori prikazali zadovoljavajuće slaganje podataka koje predviđa model sa eksperimentalnim podacima dobijenim pri sušenju kaše jabuke i suspenzije kukuruznog skroba.

Analiza literaturnih podataka pokazuje da je sušenje u pokretnim slojevima inertnih čestica sve popularnija tehnologija, što se može zaključiti na osnovu ekspanzije objavljenih radova u poslednjih nekoliko godina, a naročito posle 2003. godine. Međutim, mehanizam ovakvog načina sušenja, kao i fluido-dinamičke karakteristike sistema u kojima se ono primenjuje, su još uvek nedovoljno razjašnjeni, tj. još uvek se projektovanje i realizacija ovakvih sušnica više bazira na iskustvu i akumuliranim empirijskim saznanjima nego na fundamentalnim principima. Ove okolnosti kao i činjenica da u našoj zemlji postoji potreba za ovakvim uređajima, bile su razlog da naša istraživanja usmerimo ka razvoju postupaka sušenja suspenzija na inertnim česticama, kao i što realnijem modelovanju procesa. Na osnovu pregleda raspoložive literature proizilazi da je sušenje suspenzija u fluidizovanom sloju inertnih čestica najracionalniji sistem za materijale koji nisu lepljivi i ne menjaju drastično reološke osobine tokom procesa i da je uvećanje razmera ovog sistema jednostavnije u odnosu na ostale sisteme kontakta u pokretnom sloju, a da su različite modifikacije fontanskih slojeva dobra alternativa sprej sušnici za materijale koji poseduju adhezivne karakteristike. Stoga su predmet istraživanja u okviru ovog rada sistemi za sušenje rastvora i suspenzija u fluidizovanom sloju inertnih čestica i u fontanskom sloju inertnih čestica sa cevnom umetkom.

2. TIPIČNI SISTEMI ZA KONTAKT FLUID-ČESTICE U POKRETNOM SLOJU

Osnovna karakteristika sistema koji će biti razmatrani u ovom radu je intenzivni kontakt čvrstih čestica sa fluidom koji se ostvaruje u pokretnim slojevima. Razvoj sistema sa pokretnim slojem proizašao je iz potrebe za prevazilaženjem ograničenih mogućnosti klasičnih uređaja sa nepokretnim slojem čestica za ostvarivanje kontakta faza.

Dvofazni sistemi sa pokretnim slojem fluid-čvrste čestice prema načinu ostvarivanja kontakta između faza, odnosno načinu uvođenja fluida u sloj čestica, mogu biti: a) fluidizovani sistemi, b) fontanski sistemi, c) fontansko-fluidizovani sistemi, d) fontanski sistemi sa kontrolisanim strujanjem faza, e) fontansko-fluidizovani sistemi sa kontrolisanim strujanjem faza i f) transportni sistemi sa vertikalnim dvofaznim tokom fluid-čvrste čestice.

Uvođenjem fluida u sloj čestica, pri dovoljno velikim protocima, uspostaviće se relativno kretanje čestica i fluida. Svi navedeni sistemi, prikazani na slici 2.1, mogu se ostvariti u cilindričnoj koloni na čijem dnu je centralno ugrađena mlaznica i anularni raspodeljivač fluida pri određenim geometrijskim karakteristikama kolone i mlaznice, definisanim osobinama čestica i fluida, kao i odabranim opsezima protoka fluida. Različitim kombinacijama protoka fluida kroz mlaznicu i anularni raspodeljivač, kao i njihovih inteziteta može se ostvariti niz različitih stanja strujanja fluida i kretanja čestica u koloni, uključujući i dva krajnja stanja, mirovanje i odnošenje čestica iz sloja. Uslov pri kome ne dolazi do vertikalnog transporta čestica fluidom je da je zbirni protok fluida kroz mlaznicu i anularni raspodeljivač manji od protoka fluida pri kome dolazi do odnošenja čestica iz kolone.

Proučavanja navedenih sistema su obuhvatila utvrđivanje uslova za njihovu egzistenciju, određivanje fluido-dinamičkih karakteristika, određivanje parametara neophodnih za procenu primenljivosti pojedinačnih sistema u procesima prenosa mase i toplote i određivanja parametara za uvećanje razmera sistema i moguću industrijsku primenu. Svaki od njih je našao primenu u različitim tehnološkim operacijama i procesima /Kunii i Levenspiel, 1969; Mathur i Epstein, 1974/. Svaki sistem karakterišu određene specifičnosti, kao i prednosti i nedostaci.

Osnovne prednosti sistema sa fluidizovanim slojem (slika 2.1-a) u odnosu na sisteme sa nepokretnim slojem su značajno povećanje efikasnosti procesa po jedinici zapremine uređaja, dobijanje boljeg i ujednačenijeg kvaliteta proizvoda, smanjena potrošnja energije i mogućnost relativno lakog podešavanja optimalnih procesnih parametara. Zahvaljujući intenzivnom mešanju čestica i gasa, agregativno fluidizovani sloj je veoma pogodan način ostvarivanja kontakta između faza, i kao takav je našao široku praktičnu primenu:

- u procesima prenosa mase i toplote: hlađenje i zagrevanje čestica, sušenje zrnastih materijala, sušenje rastvora i suspenzija nanošenjem na inertne čestice, granulacija, kotiranje;

- u procesima gde sloj ima mehaničku funkciju: smešavanje praškastih i zrnastih materijala, klasifikacija čestica, transport čestica fluidizacionim kanalima, mlevenje čestica;
- u procesima sa hemijskom reakcijom: katalitičke reakcije gas-čvrsto, proizvodnja gasova (napr. CS₂), sagorevanje uglja i biomase, gasifikacija uglja, krekovanje teških ulja za proizvodnju olefina, kalcinacija krečnjaka, kultivacija mikroorganizama.

Međutim, iako je fluidizacija razvijena i uvedena u industrijsku primenu kao prvi sistem sa pokretnim slojem čestica u fluidu, nije omogućila da se na zadovoljavajući način ostvari kontakt između relativno krupnih čestica ($d_p > 1.5-2$ mm, po pravilu ovakve čestice pripadaju D grupi prema Geldart-ovoj /1973/ klasifikaciji fluidizacionih osobina materijala) i gasa. Korišćenje fluidizacije u ovom slučaju nije racionalno, a često nije ni moguće zbog same prirode sistema, kao što je pojava mehura gasa i klipova čestica, što u velikoj meri smanjuje efikasnost kontakta između faza.

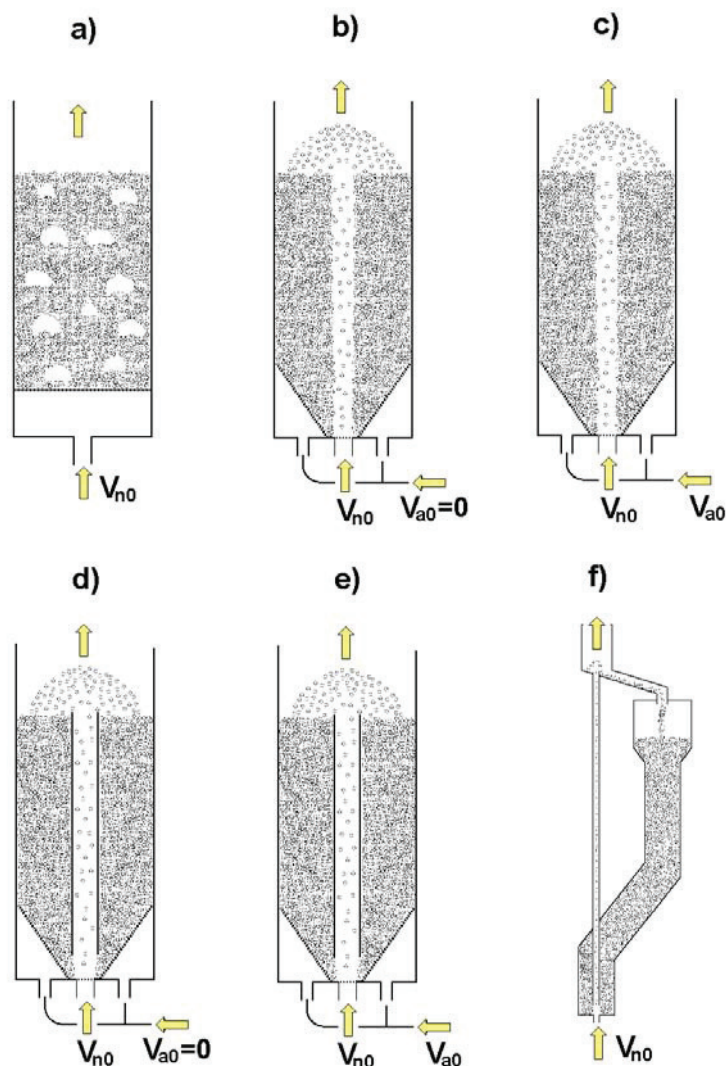
U cilju prevazilaženja nedostataka fluidizacije, razvijeni su fontanski /Mathur i Gishler, 1955/ i fontansko-fluidizovani slojevi /Vuković, 1983/.

Fontanski sloj (slika 2.1-b) predstavlja pokretni sloj čestica koji nastaje pri takvom protoku fluida kroz mlaznicu kojim se obezbeđuje vertikalni transport čestica naviše u obliku fontane, a kao posledica ovoga pojavljuje se i kretanje čestica naniže u anularnom prostoru, u vidu pakovanog pokretnog sloja. Na ovaj način se ostvaruje uređeno ciklično kretanje čestica u relativno razređenom centralnom delu sloja naviše, a u anularnoj zoni sloja naniže.

Pored opisanog kretanja čestica postoji i njihovo radijalno kretanje iz anularnog dela u centralni deo sloja (fontanu), najviše izraženo na dnu, odnosno na vrhu sloja. Brzina čestica u fontani opada sa aksijalnim rastojanjem, sem početnog perioda ubrzavanja. Na vrhu fontane (spoljna fontana) čestice gube kinetičku energiju i padaju na vrh anularnog prostora. Brzine strujanja fluida u centralnom delu sloja su veće od brzine odnošenja čestica i opadaju sa kretanjem od dna ka vrhu. Pri protoku fluida kroz mlaznicu koji odgovara protoku u minimalnom fontanskom stanju, brzina fluida na vrhu fontane približno je jednaka minimalnoj brzini fluidizacije, što je ujedno i neophodan uslov za postojanje fontanskog sloja. Brzina fluida u anularnom delu, koji penetrira iz fontane u anularni deo sloja, usled razlike pritiska, raste sa aksijalnim rastojanjem od dna i u stanju minimalnog fontanovanja dostiže graničnu vrednost na vrhu anularnog dela, koja odgovara minimalnoj brzini fluidizacije, što je istovremeno i granični uslov postojanja slojeva ove vrste. Osnovna prednost ovog sistema je mogućnost kontakta gasa i čestica koje se ne mogu fluidizovati. Praktična primena ovih materijala obuhvata slične operacije koje su navedene za fluidizovane slojeve:

- u procesima prenosa mase i toplote: hlađenje i zagrevanje čestica, sušenje zrnastih materijala, sušenje rastvora i suspenzija na inertnim česticama, granulacija, kotiranje;
- u procesima gde sloj ima mehaničku funkciju: smešavanje praškastih i zrnastih materijala, mlevenje čestica;

- u procesima sa hemijskom reakcijom: katalitičke reakcije gas-čvrsto, krekovanje nafte, sagorevanje uglja i biomase, gasifikacija uglja, piroliza uljnog škriljca.



Slika 2.1. Tipični sistemi za kontakt fluid-čestice u pokretnom sloju

a) fluidizovani sloj, b) fontanski sloj, c) fontansko-fluidizovani sloj, d) fontanski sloj sa cevnom umetkom, e) fontansko-fluidizovani sloj sa cevnom umetkom, f) transportni sistem

Međutim, osnovni nedostaci fontanskog sloja su:

- visok pad pritiska usled velike zapremine fluida koji se potiskuje kroz relativno malu mlaznicu na dnu sloja, tj. usled nagle ekspanzije fluida i trenja u mlaznici /He i dr., 1992; Krzywanski i dr., 1992/. Ovo se delimično može umanjiti primenom fontansko-fluidizovanog sloja, s obzirom da je manji protok fluida kroz mlaznicu /He i dr., 1992/;
- za dati sistem fluid-čestice i datu geometriju sistema, u fontanskom sloju se ne mogu bitno menjati osnovne fluido-dinamičke karakteristike, pre svega brzina fluida u anularnoj zoni i način kretanja čestica, kao i brzina cirkulacije čestica. Ipak postoje brojne operacije u kojima nije potrebna velika brzina fluida u anulusu, koja je karakteristična za klasični fontanski sloj. Jedna od njih je sušenje zrnastih materijala, gde je brzina ukupnog procesa ograničena brzinom difuzije vlage iz unutrašnjosti ka spoljnoj površini zrna, tako da brzina

fluida iznad određene vrednosti ne doprinosi brzini procesa. Pretpostavka da unutrašnja difuzija dominira u procesu sušenja, tako da se otpor spoljnjem konvektivnom prenosu mase može zanemariti, proizilazi iz velikih vrednosti Biot-ovog broja (otpor unutrašnje difuzije/otpor spoljnjem prenosu mase) za sušenje zrna žitarica /Zahed i Epstein, 1992/;

- raspodela vremena boravka pojedinačnih čestica je neravnomerna, tj. čestice iz anulusa mogu dospeti u fontanu na svim pozicijama duž granice fontana-anulus tako da je kretanje čestica dosta proizvoljno /Larachi i dr., 2003/. Claflin i Fane /1983/ su raspodelu boravka čestica u anulusu definisali kao odnos vremena boravka čestice koja se kreće uz zid kolone i vremena boravka čestice na nekoj radijalnoj poziciji u anulusu i pokazali su da je vrednost tog koeficijenta manja od 1.5 za fontanski sloj sa cevnom umetkom, dok za klasičan fontanski sloj može biti i do 100;
- maksimalna visina sloja koja se može fontanovati, što je jedna od najvažnijih karakteristika ovog sistema, ograničava visinu sloja u nekom realnom sistemu;
- nestabilnost sloja, odnosno pojave fluidizacije u anularnom delu, zagušivanje fontane klipovima čestica i mehurovima gasa, nestabilnost granice fontana-anularni deo, pulzacija brzine i pritiska u sloju, što sve zajedno utiče na prestanak uređenog cikličnog kretanja čestica.

Ispitivanja fluido-dinamičkih karakteristika fontanskih i fontansko-fluidizovanih slojeva peska u procesu sagorevanja uglja su ukazala da stabilan fontanski sloj egzistira u ograničenom opsegu brzina vazduha pri povišenim temperaturama za datu visinu sloja. Takođe, maksimalna visina koja se može fontanovati opada sa povećanjem temperature, i to brže ako su u pitanju sitnije čestice /Ye i dr., 1992; Berruti i dr., 1988/.

Fontansko-fluidizovani sloj (slika 2.1-c) poseduje slične karakteristike kao i fontanski sloj, s tom razlikom što fontansko-fluidizovani sloj nastaje istovremenim uvođenjem fluida u sloj čestica kroz mlaznicu i anularni raspodeljivač. Brzina fluida na vrhu anularne zone je manja ili najviše jednaka minimalnoj brzini fluidizacije čestica. Maksimalni anularni protok fluida u minimalnom fontansko-fluidizovanom stanju, dovodi čestice na vrhu anularnog dela sloja u stanje minimalne fluidizacije. Ovom protoku odgovara minimalni protok fluida kroz mlaznicu, odnosno u minimalnom fontansko-fluidizovanom stanju zbir maksimalnog protoka u anularnom delu i minimalnog protoka kroz mlaznicu je jednak protoku potrebnom za početak fluidizacije čestica. Da bi se omogućila egzistencija fontansko-fluidizovanog sloja, pri ukupnom protoku fluida većem od minimalnog, moraju se zadovoljiti uslovi da protok fluida kroz mlaznicu bude veći od minimalne vrednosti, a zadati anularni protok fluida bude manji od maksimalne vrednosti. Fontansko-fluidizovani sloj prevazilazi većinu ograničenja i nedostataka i fluidizovanog i fontanskog sloja. Fontansko-fluidizovani sistemi imaju znatno niži pad pritiska u odnosu na klasičan fontanski sloj, s obzirom da ukupni protok fluida ne prolazi samo kroz mlaznicu.

Razvoj fontanskog i fontansko-fluidizovanog sloja sa kontrolisanim strujanjem faza (slika 2.1-d,e) uslovljen je navedenim nedostacima fontanskog i fontansko-fluidizovanog sloja. Osnovna modifikacija je upotreba cevnog umetka postavljenog u osi sloja na

određenom rastojanju od dna kolone, tj. mlaznice, što značajno snižava pad pritiska u sloju. Na ovaj način sloj je fizički podeljen na dve zone: vertikalni transport čestica u cevnom umetku i pokretan pakovani sloj čestica u anularnom prostoru. Prečnik cevnog umetka je približno isti kao i prečnik prirodne šupljine, odnosno fontane, u klasičnom fontanskom i fontansko-fluidizovanom sloju. Brzina cirkulacije čestica i minimalna brzina fluida za cirkulaciju su manje nego u klasičnom fontanskom i fontansko-fluidizovanom sloju, usled čega je pad pritiska manji. U konvencionalnom fontanskom sloju, protoci fluida i čestica su fiksirani u zavisnosti od ukupnog protoka fluida na ulazu u sloj i geometrije sistema. Upotreba cevnog umetka u pokretnim dvofaznim sistemima povećava efikasnost cirkulacije čestica i do pet puta /Grbavčić, 1989/. Takođe je prevaziđen problem maksimalne visine sloja koja se može fontanovati. Uvođenjem dodatnog protoka fluida u anularni prostor proširuje se opseg veličine čestica sa kojima se može operisati. Glavne prednosti fontansko-fluidizovanog sloja sa cevnom umetkom su: nema ograničenja visine sloja za fontanovanje, minimalna brzina fontanovanja je manja u sloju sa cevnom umetkom, cevni umetak stabilise sloj, onemogućava penetraciju fluida iz centralnog dela sloja u anularni deo i primorava sve čestice da pređu isti put /Grbavčić i dr., 1992/. Ovako modifikovani sistemi su vrlo fleksibilni, odnosno njihove karakteristike se mogu uskladiti sa karakteristikama procesa, s obzirom da je veoma lako podešavati i regulisati protok gasa u mlaznom toku, protok gasa u anularnom prostoru i brzinu cirkulacije čestica. Brzina fluida u anularnom delu sloja raste sa povećanjem ulaznog anularnog protoka fluida, a neznatno opada sa povećanjem protoka fluida kroz mlaznicu za fiksiranu geometriju kolone /Grbavčić i dr., 1992/. U tabeli 2.1 su prikazane karakteristike klasičnog fontanskog sloja i fontanskog sloja sa cevnom umetkom /Ishikura i dr., 2003/, a u tabeli 2.2 je dat uporedni prikaz nekoliko karakterističnih parametara za klasični fontanski sloj, fontanski sloj sa cevnom umetkom i fontansko-fluidizovani sloj sa cevnom umetkom, koji ilustruje fleksibilnost sistema sa kontrolisanim kretanjem čestica /Grbavčić, 1989/.

Fontanski sloj sa cevnom umetkom ima sve osobine izuzetno dobrog dozera čvrstih čestica, jer obezbeđuje ravnomerni protok čestica koji se može kontrolisati podešavanjem rastojanja cevnog umetka od dna kolone i/ili podešavanjem protoka fluida kroz mlaznicu. Detaljne informacije o fontanskim slojevima i njihovim modifikacijama se mogu naći u referenci Mathur i Epstein /1974/.

Na osnovu dugogodišnjeg ispitivanja prikazanih sistema, pokazalo se da je upotreba koničnog dna optimalna konstrukcija za većinu procesa, sa aspekta izbegavanja pojave "mrtvih zona" u sloju, nepoželjnih u većini procesa (napr. smešavanje čestica, aktivacija uglja, kotiranje čestica), koje su se javljale kod konstrukcija sa ravnim dnom /Grbavčić, 1989/. Međutim, kod fontanskih i fontansko-fluidizovanih slojeva u kolonama velikih prečnika i koničnim dnom se mogu pojaviti zone u kojima su čestice u mirovanju, koje su veće što je veća statička visina sloja. Pored toga aktivni deo anularnog prostora zavisi i od vrste čestica i veći je (tj. "mrtve zone" su manje) što su čestice glatkije i pravilnijeg oblika /He i dr., 1992/.

Tabela 2.1. Karakteristike fontanskog sloja sa i bez cevnog umetka /Ishikura i dr., 2003/

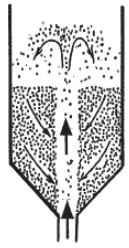
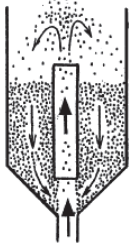
	projektni parametri	prednosti	nedostaci	primena
klasični fontanski sloj 	- prečnik kolone D_c - prečnik mlaznice D_n - ugao koničnog dna θ - prečnik fontane D_s - maksimalna visina sloja H	- uređena cirkulacija čestica - dobro mešanje krupnih čestica - mali pad pritiska - dobra fluidizacija lepljivih i grumenastih materijala	- geometrijska i operativna ograničenja - ograničenje visine sloja - uniformnija raspodela veličine čestica - loše fontanovanje sitnih čestica	- smešavanje čestica - sušenje suspenzija i zrnastog materijala - kotiranje čestica - granulacija čestica - prečišćavanje gasova - gasifikacija uglja - hemijske reakcije
fontanski sloj sa cevnom umetkom 	- prečnik cevnog umetka D_d - rastojanje cevnog umetka od mlaznice L	- nema ograničenja u visini sloja i uniformnosti veličine čestica - veća fleksibilnost pri radu - niži pad pritiska i manji protok gasa - uži opseg raspodele vremena boravka pojedinačnih čestica - veća kontrola cirkulacije čestica	- komplikovano projektovanje - redukovano mešanje - zagušenje cevnog umetka - smanjen kontakt između gasa i čestica - manji prenos toplote i mase	- smešavanje čestica - sušenje suspenzija i zrnastog materijala - kotiranje čestica - granulacija čestica - prečišćavanje gasova - gasifikacija uglja - sagorevanje - piroliza ugljovodonika - pneumatski transport

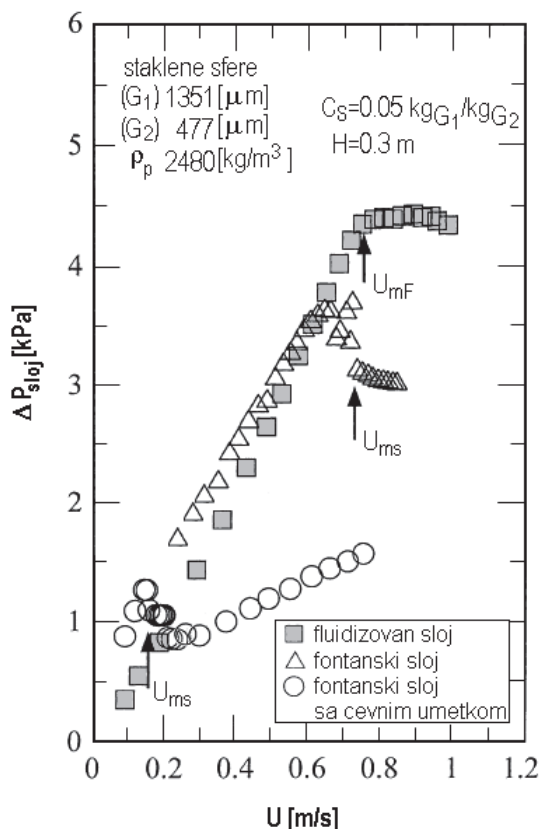
Tabela 2.2. Uporedni prikaz osnovnih karakteristika fontanskog i fontansko-fluidizovanog sloja sa i bez cevnog umetka /Grbavčić, 1989/

V_n m ³ /h	V_{a0} m ³ /h	ΔP_{nb} kPa	ΔP_n kPa	G_p/G_f G_f meren na mlaznici	$G_p/(G_f \Delta P_{nb})$ 1/kPa	U_a/U_{mF} na $z/H=0.5$	
320	0	10.00	1.70	10.78	1.08	0.57	fontanski sloj
163	0	1.96	0.36	3.95	2.01	0.16	fontanski sloj sa cevnom umetkom
132	84	1.84	0.78	5.49	2.98	0.36	fontansko-fluidizovani sloj sa cevnom umetkom
117	119	1.96	0.97	7.25	3.70	0.44	
102	154	2.11	1.18	10.59	5.02	0.52	

sistem: vazduh-kukuruz u polukoloni poprečnog preseka 0.4x0.2 m, $D_n=50$ mm, $D_d=80$ mm, $d_p=8.08$ mm, $\rho_p=1287$ kg/m³, $\psi=0.755$, $H=600$ mm

Na slici 2.2 su prikazane tipične zavisnosti pada pritiska u sloju, koga čini smeša sitnijih i krupnijih staklenih sfera, od brzine fluida za fluidizovani, klasični fontanski i fontanski sloj sa cevnom umetkom /Ishikura i dr., 2003/.

Na osnovu istraživanja fluido-dinamičkih parametara dvofaznih kontaktnih sistema može se zaključiti da se ispitivanja naizgled različitih sistema zasnivaju na karakteristikama dvofaznog vertikalnog toka (slika 2.1-f). Tipičan primer su brza fluidizacija, fontanski i fontansko-fluidizovani slojevi sa kontrolisanim strujanjem faza i recirkulacioni fluidizacioni slojevi.



Slika 2.2. Tipične zavisnosti gradijenta pritiska u sloju od površinske brzine fluida za fluidizovani, klasični fontanski i fontanski sloj sa cevnom umetkom /Ishikura i dr., 2003/

Fluidizovani, vibrofluidizovani, fontanski i modifikovani fontanski slojevi predstavljaju najraširenije i najpopularnije sisteme u kojima se primenjuje sušenje na inertnim česticama /Reger i dr., 1967; Romankov, 1971; Pham, 1983; Hadžismajlović, 1989; Kudra i dr., 1989; Kudra i Mujumdar, 1995; Grbavčić i dr., 1998; Povrenović, 1998; Pallai i dr., 2001; Pan i dr., 2001; Leontieva, 2002; Kudra i Mujumdar, 2002; Taruna i Jindal, 2002; Osorio-Revilla i dr., 2004; Passos i dr., 2004; Zhao i dr., 2004; i dr. (videti spisak literature)/. Fontansko-fluidizovani sloj sa inertnim česticama i cevnom umetkom predstavlja optimizovanu varijantu fontansko-fluidizovanih sistema. Ovaj tip uređaja razvijen je kod nas i nalazi se u fazi probne industrijske eksploatacije /Hadžismajlović i dr., 1989; Povrenović, 1998/.

Kada je u pitanju sušenje suspenzija nanošenjem na inertne čestice, poželjno je da su inertne čestice što približnijeg oblika, veoma uskog opsega prečnika i istih gustina. Ovim se obezbeđuje hidrodinamička homogenost slojeva, poželjna kinetika procesa i ravnomerno sušenje nanetog sloja suspenzije, kao i manji padovi pritiska gasovitog agensa tokom sušenja. U praksi se za sušenje suspenzija najčešće koriste monodisperzni slojevi relativno krupnih sferičnih inertnih čestica prečnika od 1 do 3 mm /Kudra i Mujumdar, 1995; 2002/, što je slučaj i sa ispitivanim sistemima iz ovog rada. Iz tog razloga je pregled opštih karakteristika sistema za kontakt fluid-čestice ograničen na slojeve monodisperznih čestica.

Svaki od navedenih sistema je našao primenu u oblasti sušenja rastvora i suspenzija. Sistemi sa fluidizovanim, fontanskim i fontansko-fluidizovanim slojem se koriste kao granulatori kod kojih se suspenzija raspršava na fluidizovane čestice istog materijala (tj. osušenog produkta). Mehanizmom termičkog deponovanja dimenzije čestica se vremenom povećavaju, visina sloja raste, a višak materijala (granulisani produkt) se na pogodan način izvodi iz sloja /na primer: Qimin i dr., 1996; Becher i Schlunder, 1998; Dewettinck i Huyghebaert, 1999; Teunou i Poncelet, 2002; Rambali i dr., 2003; Duarte i dr., 2004; Edwards i Instone, 2001; Kimoto i dr., 2000; Hemati i dr., 2003/, a u razvoju su i hibridni sistemi u kojima je na dnu sloja ugrađen uređaj za drobljenje granula tako da se produkt izvodi iz sloja u vidu praha.

2.1. OPŠTE KARAKTERISTIKE FLUIDIZOVANIH SLOJEVA

Princip fluidizovanog sloja se zasniva na održavanju čvrstih čestica u suspendovanom stanju u fluidnoj fazi (gas ili tečnost) u zatvorenom prostoru provođenjem fluida kroz sloj čestica. Fenomen fluidizacije se javlja pri određenoj, kritičnoj vrednosti brzine strujanja tečnih ili gasovitih fluida kroz sloj čvrstih čestica, tzv. minimalnoj brzini fluidizacije. Po dostizanju ove vrednosti brzine fluida čestice prvo počinju da osciluju, a sa daljim povećanjem brzine fluida čestice će se kretati u koloni. Pri ovako formiranom stanju uspostavlja se intenzivan kontakt fluida i čestica, a dvofazni sistem poprima neke od karakteristika fluida. Daljim povećanjem brzine fluida dostiže se vrednost pri kojoj otpočinje pneumatski ili hidraulički transport čestica. U praksi fluidizovani slojevi egzistiraju pri brzinama fluida koje su između vrednosti minimalne brzine fluidizacije i brzine odnošenja čestica iz sloja.

2.1.1. Tipovi fluidizacije

Zavisno od fluida (gas ili tečnost) koji čestice dovodi u fluidizovano stanje, fluidizovani sistem će posedovati različite karakteristike, što sa druge strane utiče na izbor procesa u kojima se takav sloj može primeniti. Na osnovu ponašanja fluidizovani sistemi se mogu svrstati u dva osnovna tipa: partikulativne i agregativne. Koji će tip fluidizacije biti zastupljen u nekom konkretnom slučaju zavisi od granulometrijskog sastava i dimenzija čestica i od odnosa gustina čestica i fluida.

Ako se fluidizacija vrši tečnošću, ponašanje sloja je po pravilu partikulativno, čestice se intenzivno kreću, ali su ravnomerno raspoređene po zapremini sloja sa jasno definisanom gornjom granicom sloja. Ako se fluidizacija vrši gasom, najčešće povećanjem brzine gasa iznad minimalne brzine fluidizacije veći deo gasnog toka struji kroz sloj u vidu mehura ili klipova, zavisno od geometrije sistema, oblika čestica, njihovog granulometrijskog sastava i brzine gasne faze. Međutim, i kod partikulativne fluidizacije tečnošću postoje odstupanja od idealnog ponašanja, naročito ako su velike razlike gustina čestica i fluida ili ako su čestice nepravilnog oblika i hrapave površine. U ovom slučaju slojevi pokazuju neke od karakteristika koje podsećaju na agregativno fluidizovane sisteme.

Osnovne kriterijume na osnovu kojih se procenjuje tip fluidizacije, tj. da li je partikulativna ili agregativna, definisali su Wilhelm i Kwauk /1952/ i Romero i Johanson /1954/ za stanje minimalne fluidizacije. Wilhelm-ov i Kwauk-ov /1952/ kriterijum se zasniva na određivanju vrednosti Froude-ovog broja, koji predstavlja odnos kinetičke i gravitacione energije, u stanju minimalne fluidizacije:

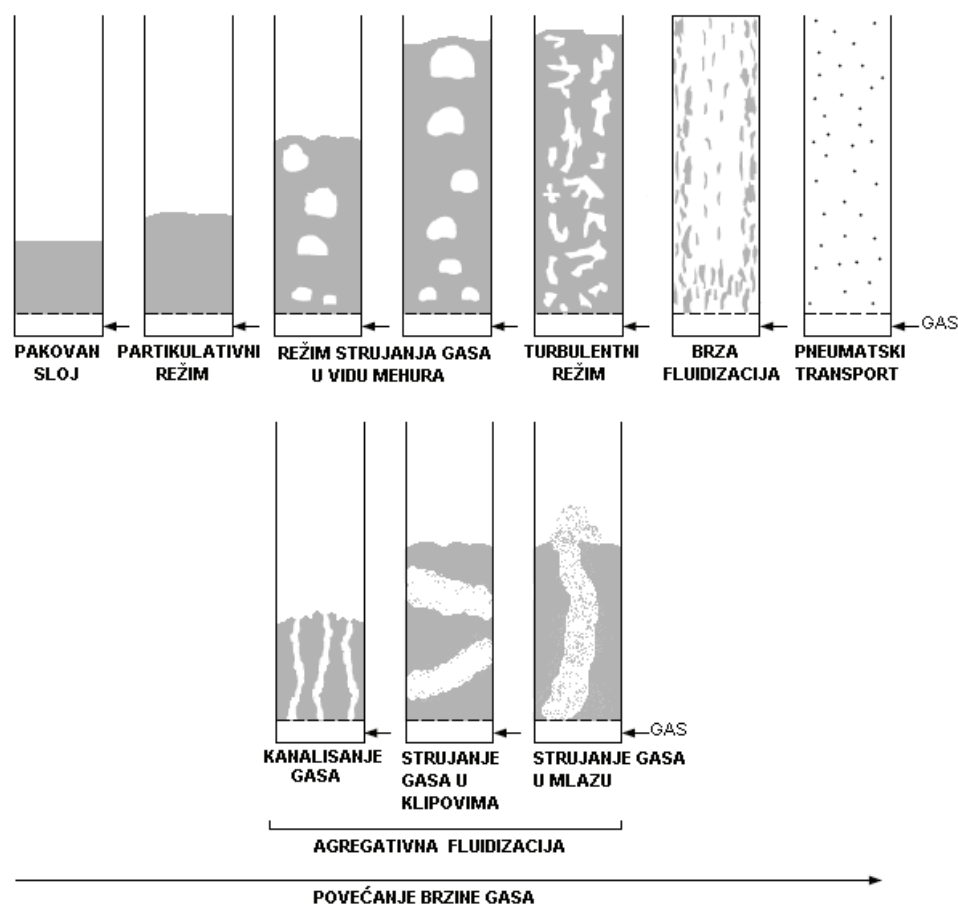
$$\text{partikulativna} \Leftrightarrow 0.13 > Fr_{mF} = \frac{U_{mF}^2}{gd_p} > 1.3 \Rightarrow \text{agregativna} \quad (2.1)$$

Prema Romero-u i Johanson-u /1954/ važi kriterijum:

$$\text{partikulativna} \Leftarrow 100 > Fr_{mF} \cdot Re_{p_{mF}} \cdot \frac{(\rho_p - \rho_f)}{\rho_f} \cdot \frac{H_{mF}}{D_c} > 100 \Rightarrow \text{agregativna} \quad (2.2)$$

Na osnovu eksperimentalnih zapažanja /Grbavčić, 1989/ definicija odstupanja od partikulativno fluidizovanog sloja, kad se radi sa tečnošću, nije sasvim precizna i prikladnije je definisati partikulativno fluidizovani sistem kao sistem kod koga dolazi do kontinualne ekspanzije sloja. Pri tome se razlikuju homogeno i nehomogeno partikulativno fluidizovan sloj. Ukoliko je prečnik lokalnih šupljina, koje spontano nastaju i nestaju po celokupnoj zapremini sloja, veći od prečnika čestica onda je u pitanju nehomogena partikulativna fluidizacija.

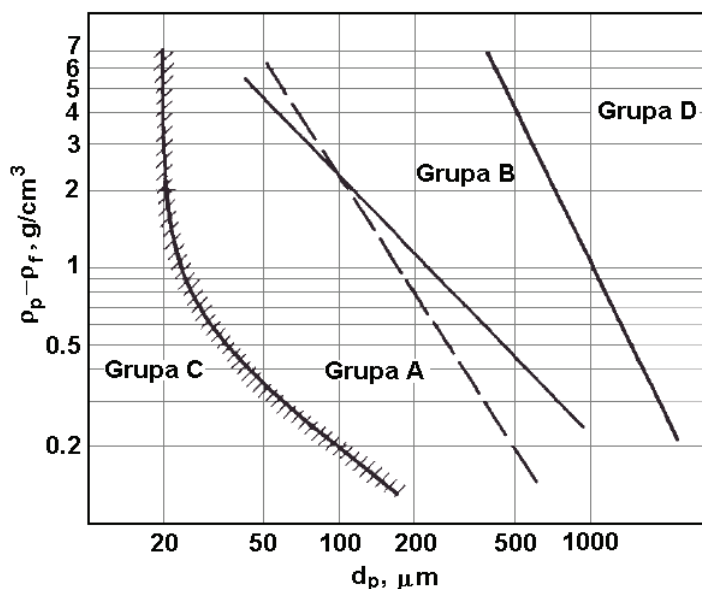
Mnogobrojni autori su opisali različite tipove konfiguracija dvofaznog sloja kao funkciju brzine fluida i karakteristika čestica. Na slici 2.3 su prikazane moguće konfiguracije sloja za sistem gas-čvrste čestice.



Slika 2.3. Mogući režimi fluidizacije

Čvrste čestice se mogu klasifikovati u odnosu na njihove karakteristike i ponašanje pri fluidizovanju gasom i prema Geldart-u /1973/ se razlikuju četiri grupe materijala na osnovu veličine čestica i razlike gustina gasa i čestica (slika 2.4). Čestice iz grupe A se lako fluidizuju uz pojavu mehura pri većim brzinama gasa. To su materijali koji se mogu aerisati što je karakteristično za male i relativno lake čestice ($\rho_p < 1400 \text{ kg/m}^3$). U grupu B se svrstavaju materijali slični pesku ($d_p = 40 \div 50 \text{ } \mu\text{m}$, $\rho_p = 1400 \div 4000 \text{ kg/m}^3$) koji se lako

fluidizuju uz formiranje mehura čija veličina raste po visini sloja. Grupu C predstavljaju kohezivni, vrlo fini, prahovi čija je fluidizacija nemoguća jer su međučestične sile veće od dejstva sile prenetih gasom na čestice. U grupu D spadaju krupne i/ili teške čestice ($d_p > 1.5 \div 2 \text{ mm}$, $\rho_p > 1400 \text{ kg/m}^3$), koje se ne mogu fluidizovati usled intenzivne brzine rasta mehura, tj. skoro trenutno se formiraju klipovi gasa i čestica.

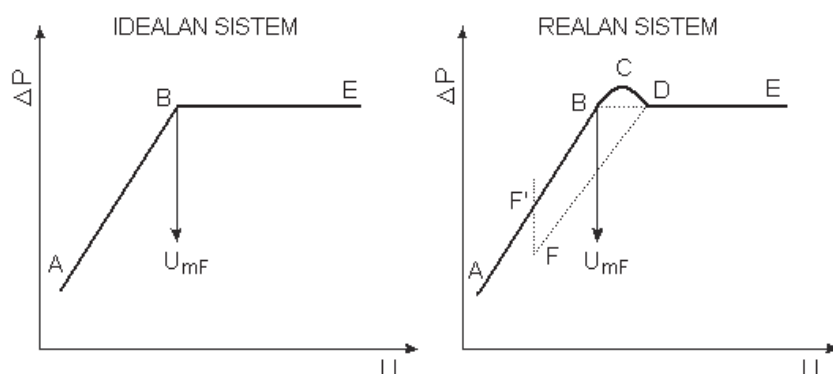


Slika 2.4. Geldart-ova /1973/ mapa mogućih režima fluidizacije u sistemu gas-čestice

2.1.2. Pad pritiska u sloju i minimalna brzina fluidizacije

Formiranje fluidizovanog sloja najjednostavnije je pratiti na dijagramu zavisnosti pada pritiska u sloju od površinske brzine fluida (slika 2.5). Pri malim brzinama fluida sloj čestica je nepokretan, a pad pritiska je proporcionalan brzini fluida (linija A-B). Za određenu vrednost brzine fluida pad pritiska ce postati jednak efektivnoj težini sloja po jedinici površine (tačka B) i od ove tačke sloj počinje da ekspanduje. U slučaju idealne fluidizacije, pri brzini minimalne fluidizacije (tačka B) trenutno dolazi do transformacije sloja iz nepokretnog u fluidizovan, a pad pritiska ima konstantnu vrednost, tj. praktično je nezavisan od brzine fluida. U realnom sistemu od tačke B počinje blago pomeranje čestica (početak ekspanzije), između čestica deluju određene kohezione sile i neophodna je dopunska energija za razdvajanje čestica, tako da se na krivoj $\Delta P = f(U)$ javlja maksimum (tačka C). Pad pritiska se ponovo izjednačava sa efektivnom težinom sloja po jedinici površine u tački D, koja predstavlja realnu minimalnu brzinu fluidizacije, U_{mF} . Ovoj brzini odgovara poroznost u stanju minimalne fluidizacije, ϵ_{mF} , što je ujedno i najveća vrednost poroznosti koju može imati pakovani sloj pre početka ekspanzije. Širina prelazne oblasti (linija B-D) na dijagramu zavisi od vrste materijala koji se fluidizuje, veličine čestica, hrapavosti njihove površine i dr., i predstavlja meru odstupanja od idealnog ponašanja. Pri smanjivanju brzine fluida od tačke D pad pritiska kontinualno opada, ali uvek po nižoj liniji

nego pri formiranju fluidizovanog sloja zbog toga što se u ovom slučaju ne troši dodatna energija za savlađivanje kohezivnih sila između čestica.



Slika 2.5. Dijagrami zavisnosti pada pritiska od brzine fluida

Za predviđanje minimalne brzine fluidizacije, U_{mF} , se najčešće primenjuje postupak simultanog rešavanja neke od korelacija za promenu pada pritiska pri proticanju fluida kroz pakovani sloj i osnovne jednačine fluidizacije, koja je izvedena na osnovu fizičkog modela po kome su u stanju fluidizacije sve čestice suspendovane i "lebde" u fluidu zahvaljujući energiji koju fluid saopštava česticama.

Korišćenjem najopštije Ergun-ove /1952/ korelacije za strujanje fluida kroz pakovan sloj čestica primenjene u tački minimalne fluidizacije, koja je ujedno i poslednja tačka za koju ona važi:

$$-\frac{dP}{dz} = 150 \cdot \frac{(1 - \epsilon_{mF})^2}{\epsilon_{mF}^3} \cdot \frac{\mu}{d_p^2} \cdot U_{mF} + 1.75 \frac{(1 - \epsilon_{mF})}{\epsilon_{mF}^3} \cdot \frac{\rho_f}{d_p} \cdot U_{mF}^2 \quad (2.3)$$

i efektivne težine sloja (osnovna jednačina fluidizacije):

$$-\frac{dP}{dz} = (\rho_p - \rho_f) \cdot g \cdot (1 - \epsilon_{mF}) \quad (2.4)$$

dobija se kvadratna jednačina po U_{mF} , odnosno Re_{mF} :

$$\frac{1.75}{\epsilon_{mF}^3} \cdot Re_{mF}^2 + \frac{150 \cdot (1 - \epsilon_{mF})}{\epsilon_{mF}^3} \cdot Re_{mF} - \frac{d_p^3 \cdot g \cdot \rho_f \cdot (\rho_p - \rho_f)}{\mu^2} = 0 \quad (2.5)$$

$$Re_{mF} = \frac{d_p \cdot \rho_f \cdot U_{mF}}{\mu}$$

Ovaj postupak uglavnom daje dobre rezultate ako je poroznost sloja u stanju minimalne fluidizacije, ϵ_{mF} , precizno određena. Međutim, treba imati u vidu da su koeficijenti u Ergun-ovoj /1952/ jednačini dobijeni kao prosek za veliki broj ispitivanih sistema. Neki autori su doveli u pitanje univerzalnost ovih koeficijenata /Clift i dr., 1978/. Naša eksperimentalna merenja su potvrdila da oni ne odgovaraju pojedinačnim slučajevima, tj. da su u direktnoj vezi sa ispitivanim fluidizacionim sistemom.

U literaturi postoje brojne korelacije za predviđanje minimalne brzine fluidizacije, U_{mF} , koje se uglavnom baziraju na karakteristikama fluida i čestica: gustinama fluida i čestica, sferičnosti čestica, prečniku čestica i poroznosti u stanju minimalne fluidizacije.

Ove korelacije sadrže slične fluidizacione parametre, razlikujući se po vrednostima koeficijenta i eksponenta koji su uglavnom određeni za konkretan fluidizacioni sistem /Coltters i Rivas, 2004/. Coltters i Rivas /2004/ su dali spisak većine referenci u kojima se ove korelacije mogu naći, pri čemu su i sami predložili novu korelaciju za sistem gas-čestice u kojoj je izbegnuto precizno poznavanje poroznosti u stanju minimalne fluidizacije, ε_{mF} , i sferičnosti. Takođe se sve više radova odnosi na određivanje minimalne brzine fluidizacije, U_{mF} , u fluidizovanom sloju gas-čestice metodom statističke analize fluktuacija pritiska /napr., Hong i dr., 1990; Choi i dr., 2003/.

2.1.3. Ekspanzija partikulativno fluidizovanog sloja

Povećavanjem brzine fluida iznad minimalne brzine fluidizacije, U_{mF} , sistemi fluidizovani tečnošću po pravilu kontinualno ekspanduju. Pri ovakvoj ekspanziji sloja dobiće se linearna logaritamska zavisnost poroznosti sloja od brzine fluida, odnosno Reynolds-ovog broja, u kojoj se poroznost menja od ε_{mF} do $\varepsilon=1$, kada su sve čestice iznesene iz sloja, a brzina fluida se menja od minimalne brzine fluidizacije, U_{mF} , do brzine odnošenja, U_t . To praktično znači da se ekspanzija sloja odvija po sledećoj zakonitosti:

$$U = U_t \cdot f(\varepsilon) \quad (2.6)$$

Richardson i Zaki /Khan i Richardson, 1989/ su na osnovu sistematskih eksperimentalnih ispitivanja došli do sledeće zavisnosti:

$$f(\varepsilon) = \varepsilon^n, \quad U = U_t \cdot \varepsilon^n, \quad n = f(\text{Re}_t, d_p / D_c) \quad (2.7)$$

pri čemu je eksponent, n , korelisan sa 4 jednačine u zavisnosti od Reynolds-ovog broja i odnosa d_p/D_c , a u slučaju kolona relativno malog prečnika korigovana brzina odnošenja usled uticaja zidova kolone je:

$$U_t = U_{t\infty} \cdot 10^{-d_p/D_c} \quad (2.8)$$

Ova korelacija daje dobre rezultate pri nižim poroznostima u sloju i ujedno je jedna od retkih koja uzima u obzir uticaj zidova kolone na ekspanziju.

Khan i Richardson /1989/ su predložili korelaciju za Richardson-ov i Zaki-jev eksponent, n , sa jedinstvenom relacijom u funkciji Archimedes-ovog kriterijuma, koja takođe uzima u obzir efekte zidova kolone:

$$\frac{4.8 - n}{n - 2.4} = 0.043 \cdot \text{Ar}^{0.57} \cdot \left[1 - 1.24 \cdot \left(d_p / D_c \right)^{0.27} \right] \quad (2.9)$$

Ove dve korelacije spadaju u grupu poluempirijskih korelacija dobijenih na osnovu eksperimentalnog ispitivanja ekspanzije sloja. Druga grupa korelacija se zasniva na kvantifikovanju odnosa sile trenja koja deluje na česticu u fluidizovanom sloju i sile trenja na usamljenu česticu na osnovu podataka za pad pritiska kroz sloj. U ovu grupu spadaju Wen-ova i Yu-ova korelacija i Ergun-ova korelacija /Li i Kuipers, 2003/. Khan i Richardson /1989/ i Li i Kuipers /2003/ su dali pregled većine raspoloživih korelacija za predviđanje ekspanzije sloja.

Većina autora smatra da se kontinualnost ekspanzije sloja ne narušava do samog pneumatskog transporta, dok sa druge strane postoje mišljenja, kao i eksperimentalni dokazi, da se dešavaju neke promene u mehanizmu kretanja čestica pri poroznosti $\varepsilon \approx 0.8-0.9$ /Khan i Richardson, 1989; Grbavčić i dr., 1991; Li i Kuipers, 2003/. Eksperimentalni podaci Grbavčića /1989/ za zavisnost $U/U_t=f(\varepsilon)$ pokazuju promenu nagiba na $\varepsilon=0.856$. Isti podaci prikazani u linearnom dijagramu $U=f(\varepsilon)$ i $dU/d\varepsilon=f(\varepsilon)$ ne pokazuju skokovitu promenu na $\varepsilon=0.856$, dok $dU/d\varepsilon$ počinje značajno da raste na $\varepsilon \approx 0.75$, što je Grbavčića /1989/ navelo na zaključak da zavisnost $U=f(\varepsilon)$ u celom opsegu poroznosti, $\varepsilon=\varepsilon_{mF} \div 1$, treba da je monotono rastuća funkcija.

2.1.4. Koeficijent trenja fluid-čestice u homogenoj disperziji i njegova veza sa koeficijentom otpora

Eksperimentalno je opaženo da sila trenja koja deluje na jednu česticu, pri određenoj brzini strujanja fluida oko čestice, nije ista sa silom koja deluje na istu česticu pri istoj brzini fluida, kada se ona nalazi u paketu, tj. u suspenziji koncentracije $(1-\varepsilon)$. Prisustvo drugih čestica ograničava prostor za kretanje fluida, uzrokujući izrazit gradijent u okolnoj fluidnoj fazi što rezultuje u povećanom dejstvu smicajnih sila koje deluju na površinu čestice. Precizno definisanje sile koja deluje na česticu u paketu je osnova za razumevanje fenomena fluidizacije, tj. interakcija fluid-čestice. Ovaj efekat “paketa” ima značajan uticaj na procese prenosa mase i toplote u sistemima fluid-čestice.

Jednodimenzioni bilans količine kretanja za smešu nestišljivog fluida i čestica je /Leung, 1980/:

$$\rho_f \frac{d}{dz} (\varepsilon u^2) + \rho_p \frac{d}{dz} [(1-\varepsilon) v^2] = \left[-\frac{dp}{dz} \right] - [\rho_p (1-\varepsilon) + \rho_f \varepsilon] g - F_f - F_p \quad (2.10)$$

U fluidizovanom sloju brzine fluida i čestica su relativno male tako da su gradijenti pritiska usled trenja fluid-zid (F_f) i čestice-zid (F_p) zanemarljivi. U partikulativno fluidizovanom sloju nema makroskopske promene koncentracija čestica, odnosno poroznosti, samim tim nema ni promene srednje međučestične brzine fluida i brzine čestica, tako da izvan nestacionarne zone, koja u partikulativno fluidizovanom sloju obuhvata samo deo neposredno iznad distributora fluida, prethodna jednačina postaje:

$$\left[-\frac{dp}{dz} \right] = [(1-\varepsilon)\rho_p + \varepsilon\rho_f]g \quad (2.11)$$

Zamenjujući srednji lokalni “statički” pritisak fluida, p , sa modifikovanim “dinamičkim” pritiskom, P , eliminišu se hidrostatički efekti i dobijaju se nepovratni, pravi, gubici usled prisustva čestica:

$$P = p + \rho_f gz, \quad -\frac{dp}{dz} = -\frac{dP}{dz} + \rho_f g \quad (2.12)$$

dobija se izraz za gradijent “dinamičkog” pritiska koji je proporcionalan težini čestica i težini istisnute tečnosti usled prisustva čestica:

$$\left[-\frac{dP}{dz} \right] = (1 - \varepsilon) \cdot (\rho_p - \rho_f)g \quad (2.13)$$

a integracijom prethodne jednačine se dobija izraz za pad pritiska u sloju pri stacionarnim uslovima, koji predstavlja osnovnu jednačinu fluidizacije:

$$\Delta P = (1 - \varepsilon) \cdot (\rho_p - \rho_f)g\Delta z \quad (2.14)$$

Pojedinačni bilansi količine kretanja za fluid i čestice /Nakamura i Capes, 1973/, respektivno su:

$$\rho_f \frac{d}{dz} (\varepsilon u^2) = \varepsilon \left[-\frac{dp}{dz} \right] - \varepsilon \rho_f g - \beta (u - v)^2 - F_f \quad (2.15)$$

$$\rho_p \frac{d}{dz} [(1 - \varepsilon) v^2] = (1 - \varepsilon) \left[-\frac{dp}{dz} \right] + \beta (u - v)^2 - \rho_p g (1 - \varepsilon) - F_p \quad (2.16)$$

Zamenom lokalnog “statičkog” pritiska “dinamičkim” pritiskom (jednačina 2.12) i primenom ovih jednačina na partikulativno fluidizovan sloj, tj. zanemarivanjem gradijenata pritiska usled trenja o zidove kolone, i zanemarivanjem promena poroznosti i međučestičnih brzina fluida i čestica, prethodne jednačine (2.15) i (2.16) postaju:

$$\varepsilon \left[-\frac{dP}{dz} \right] = \beta (u - v)^2 \quad (2.17)$$

$$(1 - \varepsilon) \left[-\frac{dP}{dz} \right] = -\beta (u - v)^2 - (\rho_p - \rho_f)g(1 - \varepsilon) \quad (2.18)$$

U ovim relacijama član $\beta(u-v)^2$ predstavlja silu trenja između fluida i čestica po jedinici mase sloja. S obzirom da je u partikulativnoj fluidizaciji srednja brzina čestica jednaka nuli, a međučestična brzina fluida: $u=U/\varepsilon$, kombinovanjem jednačina (2.17) i (2.18) dobija se izraz za koeficijent trenja fluid-čestice:

$$\beta = \frac{\varepsilon^3}{U^2} \left[-\frac{dP}{dz} \right] = \frac{\varepsilon^3 (\rho_p - \rho_f)g(1 - \varepsilon)}{U^2} \quad (2.19)$$

Može se uočiti da zbir jednačina (2.17) i (2.18) daje jednačinu (2.13), tako da su samo dve jednačine nezavisne.

Eksperimentalno je utvrđeno da sila trenja koja deluje na usamljenu česticu, pri određenoj brzini strujanja fluida oko nje, nije ista sa silom koja deluje na istu česticu, pri istoj brzini fluida, ako se ta čestica nalazi u suspenziji koncentracije $(1-\varepsilon)$. Stoga je neophodno definisati koeficijent trenja fluid-čestice (β).

Na osnovu analogije sa podužnim trenjem u cevnom vodu može se izvesti izraz za silu trenja za usamljenu česticu u fluidu:

$$F_{DS} = \frac{1}{2} C_{Ds} U^2 \rho_f (\pi d_p^2 / 4) \quad (2.20)$$

Sila trenja koja na deluje na jednu izolovanu česticu u fluidizovanom sloju će za faktor $f(\varepsilon)$ biti veća od sile koja deluje na usamljenu česticu:

$$F_{D1} = f(\varepsilon) \cdot F_{DS} = \frac{1}{2} f(\varepsilon) \cdot C_{Ds} U^2 \rho_f (\pi d_p^2 / 4) \quad (2.21)$$

Iz osnovne jednačine fluidizacije (2.14) i jednačine (2.19) dobija se sila trenja koja na deluje na jednu izolovanu česticu u fluidizovanom sloju:

$$F_{D1} = \frac{\Delta P \cdot A_c}{\left[\frac{(1-\varepsilon) A_c \Delta z}{\pi d_p^3 / 6} \right]} = \frac{\beta U^2}{\varepsilon^3 (1-\varepsilon)} (\pi d_p^3 / 6) \quad (2.22)$$

Kombinacijom jednačina (2.21) i (2.22) se dobija veza između koeficijenta otpora za česticu u fluidizovanom sloju (C_D) i koeficijenta trenja fluid-čestice (β):

$$C_D = C_{Ds} \cdot f(\varepsilon) = \frac{4}{3\varepsilon^3 (1-\varepsilon)} \cdot \frac{\beta d_p}{\rho_f} \quad (2.23)$$

Za definisanje zavisnosti koeficijenta trenja fluid-čestice (β) od poroznosti sloja neophodno je poznavati zavisnost između brzine fluida (U) i poroznosti (ε) u jednačini (2.19), koja je u načelu nepoznata. Postoje brojne empirijske i poluempirijske zavisnosti $U=f(\varepsilon)$, ali njihova primenljivost u širokom opsegu promenljivih je ograničena. Na osnovu ovih zapažanja Grbavčić i dr. /1991/ su razvili model za predviđanje zavisnosti koeficijenta trenja fluid-čestice od poroznosti primenom principa varijacionog računa. Zavisnost koeficijenta trenja fluid-čestice od poroznosti, prema modelu, definisana je jednačinom Euler-Lagrange-ovog tipa:

$$\frac{\beta}{\beta_{mF}} = 1 - C_2 + \frac{1}{\lambda} \left[1 - \left(\lambda \frac{\varepsilon - \varepsilon_{mF}}{1 - \varepsilon_{mF}} + C_1 \right)^2 \right]^{1/2} \quad (2.24)$$

Konstante koje figurišu u zavisnosti koeficijenta trenja fluid-čestice od poroznosti, C_1 , C_2 i λ , su definisane sledećim jednačinama:

$$C_1 = \left[1 + \left(U_{mF}^2 / \varepsilon_{mF}^3 U_t^2 \right)^2 \right]^{1/2} \quad (2.25)$$

$$C_2 = \frac{1}{\lambda} \sqrt{1 - C_1^2} \quad (2.26)$$

$$\lambda = \sqrt{1 - C_1^2} - C_1 \quad (2.27)$$

a koeficijent trenja fluid-čestice u stanju minimalne fluidizacije je definisan kao:

$$\beta_{mF} = \frac{\varepsilon_{mF}^3 (1 - \varepsilon_{mF}) g (\rho_p - \rho_f)}{U_{mF}^2} \quad (2.28)$$

Prema ovom modelu zavisnost koeficijenta trenja od poroznosti, odnosno od koncentracije čestica, je u potpunosti definisana karakteristikama čestica i fluida i uslova u stanju minimalne fluidizacije. To praktično znači da β zavisi samo od bezdimenzionog parametra $U_{mF}^2/(\varepsilon_{mF}^3 U_t^2)$ koji se jednostavno može eksperimentalno odrediti.

2.1.5. Brzina odnošenja čestica

Povećavanjem brzine fluida u jednom momentu doći će do odnošenja čestica iz kolone. Za određivanje ove brzine (brzine odnošenja) polazi se od jednačine dobijene iz elementarnog bilansa sila:

$$U_t = \sqrt{\frac{4 \cdot g \cdot (\rho_p - \rho_f) \cdot d_p}{3 \rho_f \cdot C_D}} \quad (2.29)$$

Za nesferične čestice se za rešavanje ove jednačine koristi grafička zavisnost $C_D=f(Re_{pt}, \psi)$, a za sferične čestice se koriste različite korelacije za $C_D=C_{Ds0}=f(Re_{pt})$. U literaturi postoji čitav niz empirijskih korelacija koje sa većom ili manjom tačnošću interpretiraju eksperimentalne podatke u celom opsegu Re_{pt} brojeva od interesa. Khan i Richardson /1987/ su dali pregled korelacija $C_D=C_{Ds0}=f(Re_{pt})$.

2.1.6. Kretanje čestica

Ispitivanja kretanja čestica u sistemu tečnost-čestice se svode na praćenje obeleženih čestica tehnikom transparentnog sloja, koji se formira korišćenjem tečnosti koja ima približno isti stepen refrakcije kao i staklene sfere. Stepenn ravnomernosti kretanja obeleženih čestica je najveći u stanju minimalne fluidizacije kada čestice praktično vibriraju i komponente vektora lokalne brzine čestice su približno iste. Povećavanjem brzine fluida stepenn ravnomernosti opada, pošto je kretanje u horizontalnoj ravni simetrično, ali su veće brzine u aksijalnom pravcu. Makroskopski posmatrano, srednja brzina čestica u partikulativno fluidizovanom sloju je jednaka nuli, jer u svakom preseku količina čestica koja se kreće naviše je jednaka količini čestica koje se kreću naniže /Grbavčić, 1989/.

U agregativno fluidizovanim sistemima gas-čestice je složenija situacija, s obzirom da značajan uticaj na raspodelu čestica u sloju ima strujanje mehura kroz sloj.

2.1.7. Fluidizovani sistemi gas-čestice

Usled kretanja mehura kroz sloj, fluidizovani sistemi gas-čestice (po pravilu agregativni sistemi) imaju niz specifičnih osobina. U sloju se jasno identifikuju tri zone: zona mehura, emulgovana faza i zona odnošenja. Ako se posmatra samo emulgovana faza, ona liči na sloj u minimalno fluidizovanom stanju i poroznost je u ovom delu približno jednaka ε_{mf} . Čestice se u emulgovanoj fazi kreću haotično, slično Braunovom kretanju molekula. Gornja površina sloja nije sasvim stabilna, već osciluje u manjim ili većim

granicama. Usled kretanja mehura pad pritiska nije konstantan kao u sistemima tečnost-čestice, već fluktuiraju oko srednje vrednosti koja je jednaka efektivnoj težini sloja po jedinici površine. Stepenn fluktuacije zavisi od veličine mehura i učestanosti njihovog pojavljivanja. Mehuri nastaju kad brzina gasa dostigne vrednost minimalne brzine fluidizacije. Daljim povećavanjem protoka gasa emulgovana faza ostaje u stanju minimalne fluidizacije, a sav gas, koji se kreće brzinom većom od U_{mF} , protiče kroz sloj u vidu mehura. Ponašanje mehura u sloju podseća na ključanje tečnosti. Formiraju se na dnu sloja, putuju naviše, delimično spajaju i prskaju na vrhu sloja. Usled podpritiska u donjem delu, povlače za sobom agregate čestica i transportuju ih na vrh sloja. Deo mehura ispunjen česticama naziva se unutrašnji vrtlog ("wake") i obično iznosi 1/3 ukupne zapremine mehura. Brzina gasa u emulgovanoj fazi ostaje približno konstantna i jednaka je U_{mF} . Udeo mehura u sloju srazmeran je stepenu ekspanzije sloja. Učestanost pojavljivanja mehura zavisi od tipa raspodeljivača gasa na dnu kolone i protoka gasa. Mali mehuri su sferični, srednji su nepravilnog oblika, a veliki imaju oblik sferične kape. Eksperimentalno je utvrđeno da se mali mehuri penju sporo, a veliki brzo. Interakcijom mehura dolazi do njihove koalescencije, čime se stvaraju veći mehuri i njihova brzina raste. Izlazeći iz sloja, mehuri se rasprskavaju ali povlače sa sobom određenu količinu čestica formirajući zonu odnošenja. Oni su zaslužni za intenzivno mešanje čestica u fluidizovanom sloju, što kao posledicu ima približno izotermne uslove u sloju i visoke lokalne koeficijente prenosa mase i toplote.

2.1.7.1. Modeli fluidizovanog sloja gas-čestice

Karakteristike fluidizovanih sistema gas-čestice zavise od ponašanja mehura u sloju. Pri brzinama gasa iznad minimalne brzine fluidizacije, na ekspanziju sloja najviše utiče zapremina mehura. Kako se kroz sloj menja i veličina mehura i njihova učestanost, za predviđanje ekspanzije sloja i raspodele čestica po zonama sloja je neophodan pouzdan model za određivanje stvaranja mehura, njihov rast i koalescenciju, što je veoma važno sa aspekta analize prenosa toplote, mase, a naročito hemijskih reakcija. Kerkhof /2000/ je prikazao tri najčešće korišćena modela koji opisuju razmenu mase između gasa i čvrste faze u fluidizovanom sloju: model ekspanovanog sloja, dvofazni model sa "by-pass"-om Subramanian-a i dr., i model agregativno fluidizovanog sloja Kunii-a i Levenspiel-a. Potpun i fizički dosledan model fluidizovanog sloja morao bi da obuhvati i matematički opiše brojne složene procese u fluidizovanom sloju: pojavu, rast i podizanje mehurova, oblik i raspored mehurova, kretanje i mešanje čestica sloja, strujanje gasa kroz mehur, oko mehura i u emulziji, itd. Ovako kompletan model nije uspostavljen, već se postojeći modeli zasnivaju na raznim uprošćenjima i pretpostavkama /Hilal i Gunn, 2002/.

Dvofazni model je prvi model kojim je uspešno opisan fluidizovani sloj, jer je u obzir uzeta nehomogenost fluidizovanog sistema. Model pretpostavlja da se fluidizovani sloj sastoji od emulgovane faze, koja se nalazi u stanju minimalne fluidizacije i mehurova, kroz koje protiče višak vazduha preko protoka potrebnog za minimalnu fluidizaciju. Ovaj model postavio je Davidson /Rowe, 1971/, a dopunili su ga Kunii i Levenspiel /1969/.

Eksperimentalno je utvrđeno da je brzina dizanja usamljenog mehura u minimalno fluidizovanom stanju /Rowe, 1971/:

$$U_{br} = 0.711 \sqrt{gd_b} \quad (2.30)$$

gde je d_b -prečnik sfere koja ima istu zapreminu kao mehur sa sferičnom kapom.

Prethodna jednačina je analogna relaciji za taloženje čvrste sfere u fluidu. Ako se mehur predstavi kao čestica gustine ρ_f , a emulgovana faza kao pseudofluid gustine ρ , onda je brzina dizanja sfernog mehura:

$$U_{br} = \sqrt{\frac{4|\rho_f - \rho|gd_b}{3\rho C'_D}} \quad (2.31)$$

$$\rho = \varepsilon\rho_f + (1 - \varepsilon)\rho_p, \quad C'_D \text{ -- modifikovani koeficijent otpora}$$

Davidson-ov model proučava kretanje usamljenog mehura kroz fluidizovani sloj i bazira se na sledećim pretpostavkama:

- mehur je sfernog oblika i sadrži samo gas bez prisustva čestica,
- mehur se kreće kroz emulgovanu fazu na isti način kao sfera kroz nestišljiv, neviskozni fluid čija je gustina jednaka srednjoj gustini emulzije $\rho \approx \rho_p (1 - \varepsilon_{mf})$,
- gas struji kroz emulgovanu fazu kao nestišljiv viskozni fluid i u svim pravcima je zadovoljen Darcy-Weisbach-ov zakon, odnosno razlika brzina čestica i gasa proporcionalna je gradijentu pritiska po rastojanju

$$\left(u_{gas} - u_{čestice} \right)_z = -k \frac{\partial P}{\partial z} \quad (2.32)$$

- daleko od mehura pritisak u fluidizovanom sloju se menja linearno prema jednačini (2.14) i
- pritisak gasa u mehuru je konstantan.

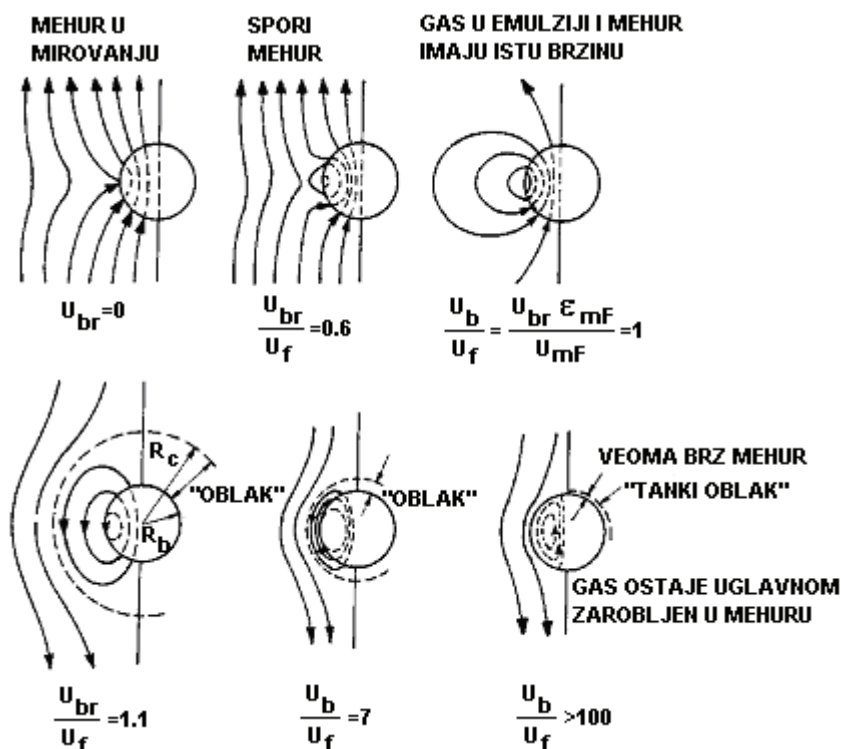
Strujanje gasa kroz mehur prema Davidson-ovom modelu je prikazano na slici 2.6. Davidson je pokazao da je pritisak iznad mehura viši, a ispod mehura niži od pritiska okolnog gasa u emulziji na istoj horizontalnoj ravni. Ovaj gradijent pritiska uslovljava protok gasa kroz mehur, koji ulazi u mehur odozdo, što izaziva vrtloženje i dovodi do zatupastog oblika mehura. Ovo odstupanje oblika mehura od sfere je osnov za poboljšanja u drugim modelima fluidizovanog sloja. Ponašanje gasa u blizini mehurova zavisi od odnosa brzine mehura (U_{br}) i brzine gasa u emulgovanoj fazi (U_f):

- Kada je $U_{br} < U_f$ (spori mehurovi, mali d_b) gas ulazi na dnu mehura a izlazi na vrhu, jer je okolni gas brži od mehura i koristi ga kao put manjeg otpora. Mehur je stalno ispiran svežim gasom iz emulzije. U slučaju sporih mehura smatra se da je brzina recirkulacionog gasa kroz mehur (U_{bg}) tri puta veća od brzine gasa u okolnoj emulziji: $U_{bg} = 3U_{mf}$.
- Kada je $U_{br} > U_f$ (brzi mehurovi, veliki d_b) gas koji izlazi na vrhu mehura, struji naniže oko mehura i ponovo ulazi u njega pri dnu. Zona oko mehura kroz koju se gas vraća, naziva se oblak. Što je odnos brzina U_{br}/U_f veći oblak je tanji jer manja količina gasa recirkuliše oko mehura.

Odnos prečnika oblaka (d_c) i mehura (d_b) dat je u sledećim izrazima:

$$\text{za dvodimenzioni mehur} \quad \left(\frac{d_c}{d_b} \right)^2 = \frac{U_{br} + U_f}{U_{br} - U_f} \quad (2.33)$$

$$\text{za trodimenzioni mehur} \quad \left(\frac{d_c}{d_b} \right)^3 = \frac{U_{br} + 2U_f}{U_{br} - U_f} \quad (2.34)$$



Slika 2.6. Strujanje gasa kroz mehur prema Davidson-ovom modelu

Iznad određene veličine mehur postaje nestabilan i spontano se raspada na više manjih mehura. Harrison /Rowe, 1971/ je postavio kriterijume za procenu stabilnosti mehura:

- $U_{br} < U_t$, stabilan mehur,
- $U_{br} = U_t$, mehur maksimalno stabilnog prečnika i
- $U_{br} > U_t$, nestabilan mehur.

Model koji su postavili Kunii i Levenspiel /1969/, razmatra agregativno fluidizovani sloj, u kome je zanemarljivo postojanje kanala i čepova, a prečnik mehura je uniforman (slike 2.7 i 2.8). Modelovanje mehura u sloju zasniva se na Davidson-ovom modelu, a dodatno se razmatra kretanje čestica u emulgovanoj fazi. Pretpostavke na kojima se model Kunii-a i Levenspiel-a zasniva su:

- usled podpritiska ispod mehura svaki mehur koji se kreće u fluidizovanom sloju za sobom povlači paket čestica (vrtlog), što je eksperimentalno potvrđeno /Rowe, 1971/. Zapreminski udeo vrtloga u mehuru je:

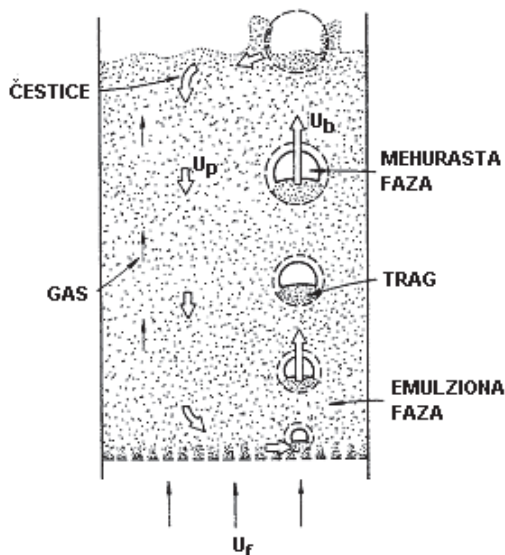
$$\alpha_w = \frac{V_w}{V_b} \quad (2.35)$$

- vrtlog iza mehura kreće se zajedno sa mehurom, brzinom koja je jednaka brzini mehura. Pri ovome postoji stalna razmena čestica vrtloga sa česticama iz emulzije. Na vrhu sloja mehur prska, čestice padaju nazad u sloj krećući se naniže brzinom U_s ,

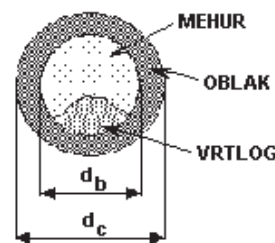
- relativna brzina emulzije određuje se na osnovu izraza:

$$U_e = U_f - U_s = \frac{U_{mF}}{\epsilon_{mF}} - U_s \quad (2.36)$$

Prethodni izraz ukazuje da ako je brzina povratnog toka čestica velika, gas u emulziji može pod njegovim uticajem promeniti smer kretanja. U kolonama sa intenzivnim povratnim tokom čestica ovo je i eksperimentalno potvrđeno.



Slika 2.7. Model agregativno fluidizovanog sloja Kunii-a i Levenspiel-a



Slika 2.8. Struktura mehura u sloju

Dvofazni model navodi značajne veličine za opis agregativno fluidizovanog sloja:

- brzina dizanja roja mehura:

$$U_b = \Psi_1 (U_0 - U_{mF}) + \Psi_2 \cdot U_{br} \quad (2.37)$$

gde konstante Ψ_1 i Ψ_2 zavise od vrste materijala po Geldart-ovoj /1973/ klasifikaciji.

- udeo mehura u sloju:

$$\delta = \frac{\text{zapremina mehura}}{\text{zapremina sloja}} \quad (2.38)$$

- veza između udela mehurova u sloju i radne visine sloja (stepena ekspanzije):

$$1 - \delta = \frac{1 - \epsilon_f}{1 - \epsilon_{mF}} = \frac{L_{mf}}{L_f} \quad (2.39)$$

- veza radne brzine gasa, brzine i udela mehura proizilazi iz bilansa protoka postavljenom za poprečni presek sloja:

$$U_b = \frac{U_0 - (1 - \delta)U_{mF} - 3\delta U_{mF}}{\delta} \quad (2.40)$$

2.1.7.2. Mešanje gasa i čestica u fluidizovanom sloju gas-čestice

Važna karakteristika agregativnog fluidizovanog sloja je intenzivno mešanje čije su posledice: ravnomerno temperaturno polje, visoki koeficijent prelaza toplote na uronjene površine, intenzivno proticanje hemijskih reakcija na površini čestice, itd. Smatra se da je postojanje i kretanje mehura glavni uzrok intenzivnog mešanja u fluidizovanom sloju.

U fluidizovanom sloju se javljaju dva osnovna vida kretanja čvrstih čestica: haotično kretanje pojedinačnih čestica i usmereno kretanje (cirkulacija) većih grupa čestica.

Kretanje mehura izaziva drugi tip kretanja čestica. Na svom putu kroz sloj mehuri povlače pakete čestica u tzv. vrtlogu, a u oslobođenom prostoru i deo čestica iz emulzije, transportujući ih naviše. Usled stacionarnosti sloja, ovo kretanje čestica naviše dovodi do kretanja čestica naniže u nekom drugom delu sloja. Materijali grupe D po Geldart-ovoj /1973/ klasifikaciji obrazuju fluidizovane slojeve u kojima je ovakvo mešanje čestica slabije izraženo nego kod fluidizovanih slojeva koje čine materijali iz grupa A i B.

Mešanje gasa u emulziji sastoji se iz molekularnog kretanja u gasu, turbulentnog kretanja u gasu i usmerenog kretanja gasa kao posledica usmerenog kretanja čestica. Prva dva načina mešanja gasa u emulziji bitna su za odvijanje procesa na površini čestica fluidizovanog sloja ili krupnih čestica ubačenih u sloj. Makroskopski gledano, mešanje gasa u emulgovanoj fazi posledica je trećeg načina mešanja. Mešanje gasa u emulziji veoma je značajno za odvijanje hemijskih procesa u fluidizovanom sloju.

Princip mešanja gasa između mehura i emulgovane faze opisan je u Davidson-ovom modelu fluidizovanog sloja /Rowe, 1971/. Ovaj model ne pravi razliku između gasa u oblaku mehura i gasa u emulziji. Kunii i Levenspiel /1969/ uvode novinu razmatranjem razmene gasa između mehura i oblaka i razmene gasa u oblaku i gasa u emulziji.

2.1.7.3. Prenos toplote u fluidizovanom sloju gas-čestice

Usled intenzivnog mešanja i visokih vrednosti toplotnog kapaciteta čvrstih čestica, u fluidizovanom sloju se ostvaruju veliki koeficijenti prelaza toplote. Stoga su sledeće pretpostavke opravdane:

- temperatura čestica je ravnomerna,
- izlazni gas je u ravnoteži sa česticama,
- sloj je izoterman usled velike površine raspoložive za razmenu i velikog toplotnog kapaciteta čvrstih čestica.

Prenos toplote između gasa i čestica u fluidizovanom sloju se odvija konvektivnim mehanizmom. Toplotni protok (Q) je proporcionalan dodirnoj površini fluid-čvrsto (A_t) i pogonskoj sili ($\Delta T = T_f - T_p$):

$$Q = h_p \cdot A_t \cdot (T_f - T_p) \quad (2.41)$$

Pri konvektivnom prenosu toplote se simultano odvijaju molekularni prenos toplote (provođenje) na račun kretanja molekula i kretanje "paketa" čestica fluida (vrtloga) u turbulentnom toku koji doprinose znatno boljem prenosu toplote.

Pri konvektivnom prenosu toplote formira se toplotni granični sloj, u kome je laminarni podsloj glavni otpor prenosu toplote usled prenosa toplote samo molekularnim mehanizmom. Povećanjem turbulencije debljina laminarnog podsloja se smanjuje i koeficijent prenosa toplote (h_p) raste.

U fluidizovanom sloju konvektivni prenos toplote se poboljšava usled turbulencije izazvane kretanjem čestica. Posledica intenzivnog mešanja i velike specifične površine čestica u sloju je intenzivna razmena toplote između čvrstih čestica i gasa. Stoga prenos toplote nije ograničavajući faktor pri organizovanju procesa u fluidizovanom sloju.

Intenzivan prenos toplote između gasa i čestica dovodi do toga da se na veoma malom rastojanju od distribucione rešetke temperature čestica i gasa praktično izjednače. Ovo rastojanje se povećava sa porastom prečnika čestica fluidizovanog sloja zbog smanjenja ukupne površine za razmenu toplote.

2.1.7.4. Empirijske korelacije za određivanje koeficijenta prelaza toplote između gasa i čestica u fluidizovanom sloju

Mehanizmi prenosa toplote između gasa i čvrstih čestica za nepokretni i fluidizovani sloj su slični. Standardnu korelaciju za prenos toplote između gasa i usamljene čestice dali su Ranz i Marshall /Ranz, 1952/:

$$Nu_p = \frac{h_p \cdot d_p}{\lambda_g} = 2 + 0.6 \cdot Re_p^{1/2} \cdot Pr^{1/3} \quad (2.42)$$

Kunii i Levenspiel /1969/ su predložili korelaciju za prenos toplote između gasa i čestica u fluidizovanom sloju, koja interpretira rezultate većeg broja autora:

$$Nu_p = \frac{h_p \cdot d_p}{\lambda_g} = 0.03 \cdot Re_p^{1.3} \quad (2.43)$$

Gunn /1978/ je pri obradi eksperimentalnih podataka razmatrao samo aksijalno molekularno provođenje toplote kroz gas i postavio je sledeću korelaciju za fluidizovani sloj:

$$Nu_p = (7 - 10\varepsilon + 5\varepsilon^2) \cdot (1 + 0.7 \cdot Re_p^{0.2} \cdot Pr^{0.33}) + (1.33 - 2.4\varepsilon + 1.2\varepsilon^2) \cdot Re_p^{0.7} \cdot Pr^{0.33} \quad (2.44)$$

Pregled korelacija za prenos toplote u fluidizovanim slojevima su dali Chauk i Fan /1998/.

2.2. OPŠTE KARAKTERISTIKE DVOFAZNOG VERTIKALNOG TOKA FLUID-ČESTICE

Modelovanje dvofaznog toka fluid-čestice je od ključnog značaja za praktičnu primenu fontanskih i fontansko-fluidizovanih slojeva sa cevnom umetkom. U ovim sistemima se kroz cevni umetak odvija vertikalni transport inertnih čestica i stoga će u ovom poglavlju biti predstavljene osnovne karakteristike sistema sa vertikalnim dvofaznim tokom fluid-čestice.

U literaturi se mogu naći rezultati velikog broja ispitivanja vertikalnog toka fluid-čestice. Većina radova se odnosi na sisteme za transport čestica gasom, iako je prvobitni industrijski interes bio vezan za hidraulički transport. Vertikalni dvofazni tok smeše fluid-čestice se istražuje ne samo sa aspekta transporta čestica, već i sa aspekta primene u različitim hemijskim reakcijama, procesima sušenja zrnastih materijala /Valent, 2001/, a u poslednje vreme i procesima sušenja suspenzija na inertnim česticama /Blasco i dr., 1996/. Pored toga, naizgled različiti sistemi kontakta fluid-čestice u sebi sadrže elemente vertikalnog dvofaznog toka, kao što su brza fluidizacija, fontanski i fontansko-fluidizovani slojevi sa kontrolisanim strujanjem faza i recirkulacioni fluidizacioni slojevi, te je za praktičnu realizaciju bilo kog od ovih sistema bitno razumevanje ovog fenomena. Projektovanje i praktična realizacija navedenih sistema sa elementima dvofaznog vertikalnog toka još uvek se bazira na iskustvu i eksperimentalnim ispitivanjima.

2.2.1. Režimi vertikalnog toka gas-čestice

Pri vertikalnom transportu čestica gasom u zavisnosti od protoka čestica mogući su različiti režimi strujanja. Pri dovoljno visokom protoku gasa, energija gasa je dovoljna da u napojnoj tački ($z=0$, slika 2.9) disperguje čestice u uniformnu disperziju, tako da je zapreminska koncentracija čestica u cevi konstantna. U napojnoj tački brzina čestica je jednaka nuli, a zatim čestice počinju da ubrzavaju, da bi nakon izvesnog rastojanja u transportnoj cevi dostigle konačnu, stacionarnu, brzinu kretanja (slika 2.10). Rastojanje između napojne tačke i visine cevi na kojoj brzina čestica postaje konstantna predstavlja zonu ubrzavanja čestica.

Koncentracija čestica je najveća neposredno iznad napojne tačke, duž transportne cevi se smanjuje i na kraju zone ubrzavanja dostiže svoju konačnu vrednost. Pritisak je najveći u napojnoj tački i opada sa rastojanjem duž cevi. Izvan zone ubrzavanja pritisak nastavlja da opada, ali linearno u funkciji rastojanja, što znači da je u stacionarnoj zoni transporta gradijent pritiska konstantan. Iz jednačine kontinuiteta za čestice:

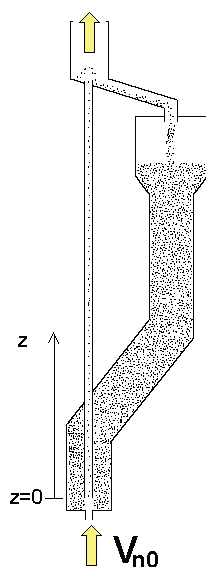
$$G_p = \rho_p A_d v(1 - \epsilon) \quad (2.45)$$

proizilazi da je duž transportne linije $v(1-\epsilon)=\text{const.}$, što predstavlja površinsku brzinu čestica:

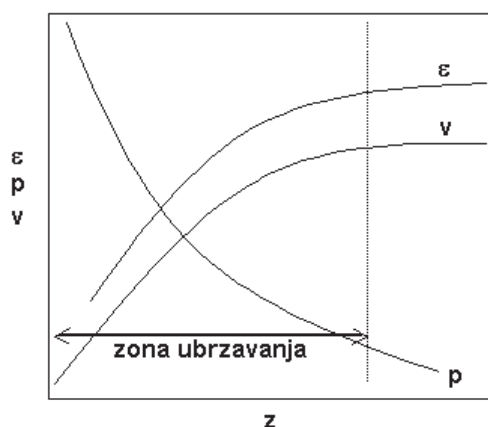
$$c_s = \frac{G_p}{\rho_p A_d} = v(1-\varepsilon) \quad (2.46)$$

veličinu analognu površinskoj brzini fluida:

$$U = \frac{G_p}{\rho_f A_d} = u\varepsilon \quad (2.47)$$



Slika 2.9. Sistem sa vertikalnim transportom čestica



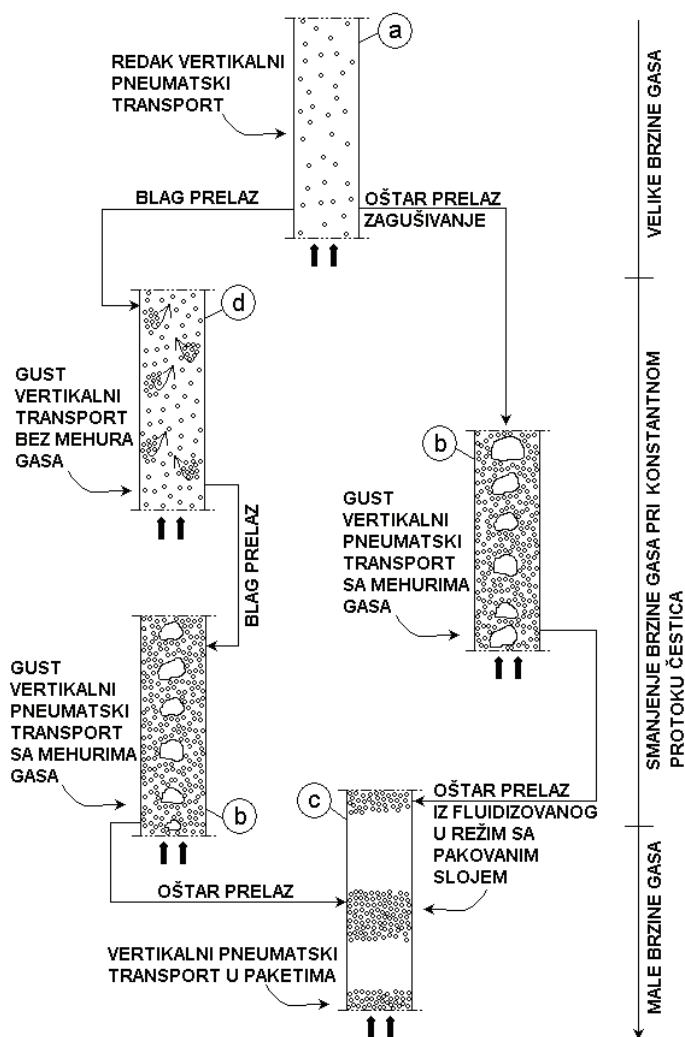
Slika 2.10. Šematski prikaz promene v , p i ε duž transportne cevi

S obzirom da se brzina čestica asimptotski približava svojoj konačnoj vrednosti, dužina zone ubrzavanja zavisi od postavljenog kriterijuma i obično je to uslov da je $v/v_{\text{konačno}}=0.99$. Prema Littman-u i dr. /1993/ ova zona se može okarakterisati i kao zona usporavanja, s obzirom da se u njoj čestice ubrzavaju u odnosu na zid transportne cevi, a usporavaju u odnosu na gasovitu fazu. U daljem tekstu će se za opisivanje dvofaznog toka koristiti pojam “zona ubrzavanja”.

U vertikalnom dvofaznom toku gas-čestice mogu se identifikovati dva granična režima pneumatskog transporta: “gust” i “redak” vertikalni tok čestica. Postepenim smanjenjem brzine gasa, pri konstantnom masenom protoku čestica, povećavaće se koncentracija čestica u transportnoj cevi. Nakon dostizanja brzine gasa koja nije dovoljna da obezbedi stabilan “redak” tok čestica, počinje postepeni prelaz u režim “gustog” toka. Daljim smanjenjem brzine gasa pneumatski transport se može odvijati kroz čitav niz režima, zavisno od karakteristika čestica i fluida, kao i od prečnika cevi. Ispod neke kritične vrednosti brzine gasa pneumatski transport postaje nestabilan, čestice počinju da fluidizuju, da bi se na kraju oformio pakovani sloj.

Mogući režimi pneumatskog transporta čestica sa promenom brzine gasa pri konstantnom masenom protoku čestica su šematski prikazani na slici 2.11. Prema Leung-u /1980 b/ postoje dva tipa transformacije iz “retkog” u “gusti” tok, transport sa zagušivanjem i transport bez zagušivanja. Pri velikim brzinama gasa čestice su ravnomerno

dispergovane u struji gasa (a, slika 2.11), tj. odvija se uniformni vertikalni transport sa malom zapremninskom koncentracijom čestica (“redak” tok). Ako se pri minimalnom smanjenju brzine gasa izazove nagli prelaz iz “retkog” u “gust” vertikalni tok čestica sa mehurima gasa (b, slika 2.11) onda je to sistem sklon zagušivanju. U ovom režimu strujanje dvofazne smeše naviše je analogno strujanju u agregativno fluidizovanom sloju. Daljim smanjenjem brzine gasa dolazi do naglog prelaza u transport sa klipovima gasa i klipovima (čepovima) čestica (c, slika 2.11). U slučaju da smanjenjem brzine gasa ne dolazi do nagle transformacije između “retkog” i “gustog” toka čestica, sistem nije sklon zagušivanju. Pri ovome se smanjivanjem brzine gasa u relativno širokom opsegu postepeno povećava koncentracija čestica u transportnoj cevi i počinje stvaranje manjih ili većih agregata čestica (d, slika 2.11). Daljim smanjenjem brzine gasa povećava se broj i veličina agregata i sistem polako prelazi u režim “gustog” vertikalnog toka sa mehurima gasa (b, slika 2.11). Pri određenoj brzini gasa vertikalni transport će se odvijati u vidu klipova gasa i klipova čestica (c, slika 2.11).

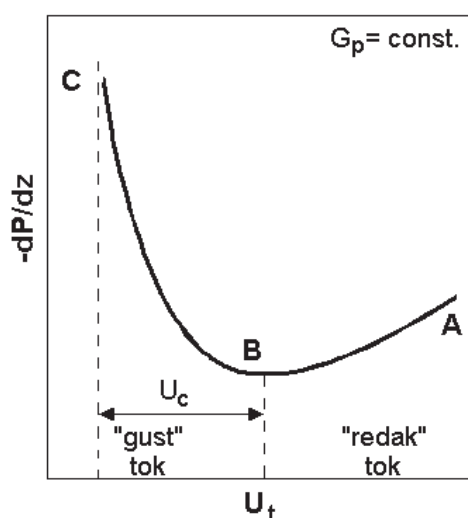


Slika 2.11. Mogući režimi pri vertikalnom toku smeše gas-čestice /iz Grbavčić, 1989; adaptirano prema Leung-u, 1980 b/

Dužina klipova i učestanost njihovog pojavljivanja zavisi od vrste, gustine, raspodele veličina čestica i od relativnog odnosa masenog protoka gasa prema masenom protoku čestica. Smatra se da trenutak pojave klipova označava tačku minimalne brzine gasa za stabilan "redak" dvofazni tok gas-čestice, s obzirom da nakon toga i relativno malo smanjenje brzine gasa rezultuje u naglom porastu učestanosti stvaranja klipova. Smanjenjem brzine gasa, od trenutka pojave klipova, povećava se veličina i učestanost pojavljivanja klipova, dok brzina njihovog kretanja opada. Daljim smanjenjem brzine gasa pojedini klipovi se raspadaju i ponovo formiraju čineći sistem vrlo nestabilnim. Pri vrlo malim brzinama gasa transport se pretvara u sporo potiskivanje velikih klipova čestica u vidu pakovanog sloja naviše, da bi se konačno pri nekoj minimalnoj vrednosti brzine gasa dvofazni sistem zagušio. Moguće je i drugačije ponašanje, odnosno da se između "retkog" toka i toka u vidu velikih klipova čestica ne mogu jasno razgraničiti prelazne oblasti.

U literaturi postoje brojni pokušaji da se generalizuje ponašanje vertikalnog toka gas-čestice i da se postave kriterijumi za procenu ponašanja u konkretnom slučaju, međutim svi oni su kvalitativnog karaktera /Grbavčić, 1989/.

U cevima većeg prečnika problem postaje složeniji, s obzirom da je profil brzina čestica izrazito paraboličan. U velikim cevima često nije moguće ostvariti stabilan transport čestica bez povratnog kretanja čestica naniže uz zidove transportne cevi. Na kretanje dvofaznog toka gas-čestice značajan uticaj može imati i naelektrisanje čestica usled trenja o zidove cevi /Littman i dr., 1993; Zhang i dr., 1996/. Koliki će taj uticaj biti zavisi od vrste čestica i materijala cevi. Ova pojava je naročito izražena pri transportu sitnih čestica, koje usled elektrostatičkih sila mogu formirati agregate i do 20 puta većeg prečnika, tako da smeša postaje izrazito polidisperzna i nepredvidljivog ponašanja. Drugi pristup za procenu režima strujanja, kada nije moguća vizuelna procena, je baziran na merenju fluktuacije lokalnog pritiska na zidu transportne cevi.



Slika 2.12. Gradijent pritiska u zavisnosti od brzine gasa u vertikalnom toku gas-čestice /iz Grbavčić, 1989/

Pored podele na sisteme koji su skloni ili nisu skloni zagušivanju, granica između "retkog" i "gustog" toka se može odrediti iz zavisnosti gradijenta pritiska od brzine gasa, pri konstantnom masenom protoku čestica (slika 2.12). U literaturi postoji više modela koji se zasnivaju na različitim pretpostavkama. Prva pretpostavka je da minimum na krivoj $(-dP/dz)=f(U_t)$ odgovara početku zagušivanja. Druga pretpostavka za U_c uzima tangentu na krivu $(-dP/dz)=f(U_t)$, kada se brzina gasa smanjuje. Treća pretpostavka je da je koncentracija čestica u tački zagušenja konstantna za sve sisteme.

Proširujući Leung-ov /1980b/ rad, Chong i Leung /1986/ su došli do zaključka da su moguća dva tipa zagušivanja u zavisnosti od karakteristika “retkog” toka. Različite modele za predviđanje ponašanja dvofaznih sistema gas-čestice, tj. da li je sistem sklon ili nije sklon zagušivanju, predložili su Yousfi i Gau /1974/, Smith /1978/ i Yang /1983/ (tabela 2.3). Prema Capes-u i Nakamura-i /1973/ nije precizno definisana granica između “retkog” i “gustog” toka i prilikom transformacije dvofaznog toka između ova dva režima moguć je čitav niz nestabilnih ponašanja.

Tabela 2.3. Korelacije za ocenu globalnog ponašanja vertikalnog toka gas-čestice

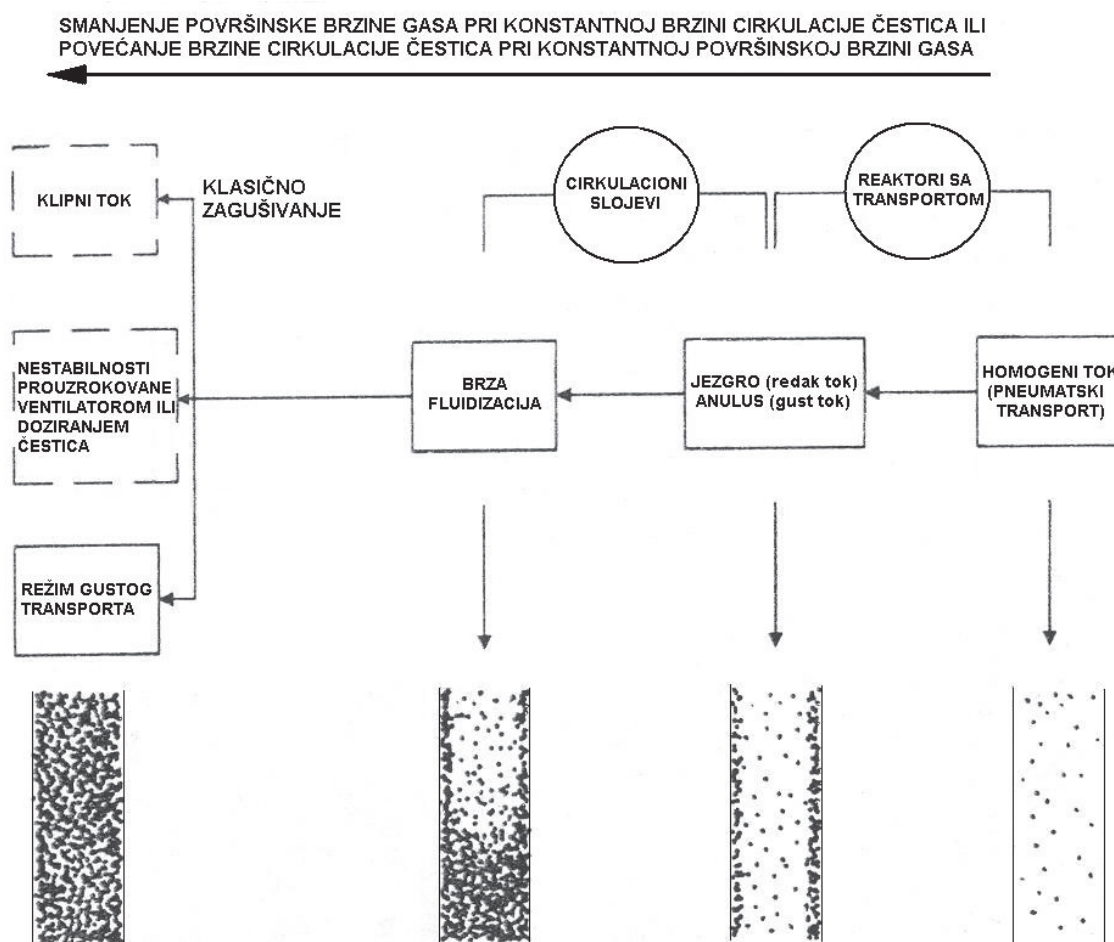
autor	korelacija	sklon zagušivanju	nije sklon zagušivanju
Yousfi i Gau /1974/	$U_t^2 / (g d_p)$	>140	<140
Yang /1977/	$U_t^2 / (g D_d)$	>0.12	<0.12
Smith /1978/	$\frac{U_t \varepsilon^{n-1} n(1-\varepsilon)}{\sqrt{g D_d}}$	>0.41	<0.41
*	$U_t^2 / (g D_d), n = 2.4$	>0.59	<0.59
	$U_t^2 / (g D_d), n = 4.6$	>0.95	<0.95

* n je Richardson-ov i Zaki-ev eksponent /Khan i Richardson, 1989/

Bi i dr. /1993/ su klasifikovali pojavu zagušivanja u tri kategorije na osnovu tri nezavisna pokretačka mehanizma. Zagušivanje tipa A (akumulativno zagušivanje) nastaje kada čestice počnu da se akumuliraju na dnu transportne cevi usled smanjenja protoka gasa do vrednosti koja ne može da obezbedi stabilan tok za određeni maseni protok čestica. Do zagušivanja tipa B (zagušivanje prouzrokovano ograničenjima ventilatora ili sistema za doziranje čestica) dolazi kada sistem za uvođenje gasa ne obezbeđuje potrebnu silu potiska za egzistenciju stabilnog dvofaznog toka ili sistem za doziranje čestica ne može da ostvari potrebni maseni protok čestica. Zagušivanje tipa C (klasično zagušivanje) odgovara prelazu iz “retkog” u režim “gustog” toka. Od ova tri tipa zagušivanja, tipovi A i B zavise od prirode samog dvofaznog toka gas-čestice, s obzirom da se tip B može uvek izbeći, na primer povećanjem kapaciteta ventilatora ili izmenom sistema za doziranje u smislu povećanja protoka čestica. Kada je sistem za pneumatski transport tako projektovan da se mogu izbeći nestabilnosti toka prouzrokovanih zagušivanjem tipa B i C, onda dvofazni tok gas-čestice prelazi iz režima brze fluidizacije u režim gustog transporta sa povećanjem brzine cirkulacije čestica ili sa smanjenjem brzine gasa /Bi i Grace, 1999/, kao što je ilustrovano na slici 2.13. Radni režim brze fluidizacije u cirkulacionim fluidizacionim slojevima je ograničen brzinom zagušivanja tipa A (gornja granica) i brzinom zagušenja tipa C (donja granica) /Bai i dr., 1998/.

U literaturi postoje različite definicije i metode merenja brzine zagušenja za sisteme u kojima je protok čestica konstantan. Uobičajeni pristup procene zagušivanja je da se početak zagušivanja vezuje za tačku na dijagramu zavisnosti gradijenta pritiska od brzine gasa u kojoj pri maloj promeni brzine gasa dolazi do oštre eksponencijalne promene

gradijenta pritiska /Smith, 1978; Briens i Bergougnou, 1986; Zenz i Othmer, 1960/. Prema Leung-u /1980a/ minimum gradijenta pritiska u transportnoj cevi u zavisnosti od brzine cirkulacije čestica, pri konstantnoj brzini gasa, razdvaja režim “gustog” i “retkog” transporta i eksperimentalno je utvrdio da interna recirkulacija čestica počinje odmah nakon dostizanja brzine gasa pri kojoj je gradijent pritiska minimalan, što predstavlja početak zagušivanja /Bi i Grace, 1999/.



Slika 2.13. Mapa prelaza između gustog dvofaznog toka gas-čestice, brze fluidizacije i retkog pneumatskog transporta sa smanjenjem brzine gasa pri konstantnoj brzini cirkulacije čestica /Bi i Grace, 1999/

Smanjivanjem brzine gasa ispod ove vrednosti, struktura dvofaznog toka gas-čestice prelazi u agregativni tok suspenzije (sa mehurima gasa) /Leung, 1980a/, u tok sa centralnim jezgrom retkog toka čestica naviše i anularnog dela sa gustim tokom čestica naniže /Capes i Nakamura, 1973/ ili u heterogeni tok /Bi i Fan, 1991/. Yousfi i Gau /1974/ su definisali pojavu zagušivanja kao stanje u kom se agregati čestica (klipovi) proširuju po celom poprečnom preseku transportne cevi, a koje se može lako vizuelno zapaziti. Prema tome, u stanju zagušivanja čestice se transportuju u vidu agregata (klipova). Capes i Nakamura /1973/ su ovu pojavu zapazili u nekim slučajevima (dvofazni sistemi sa česticama velike gustine, kao što su čelične kuglice) da zagušivanje počinje pri brzini gasa

ispod vrednosti brzine na kojoj se primećuje recirkulacija čestica. Oni su definisali zagušivanje kao tačku u kojoj počinje interna recirkulacija čestica. Satija i dr. /1985/ su koristili promene fluktuacija pritiska i standardne devijacije za klasifikovanje režima strujanja i određivanje stanja zagušivanja. Mok i dr. /1989/ su koristili metod za karakterizaciju režima toka, koji je baziran na promeni srednje koncentracije čestica sa promenom masenog protoka čestica pri konstantnoj brzini gasa. Bai i dr. /1998/ su predložili dinamičku metodu kojom se mogu odrediti brzine zagušenja tipa A i tipa C, kao i odgovarajuće poroznosti izvođenjem jednog eksperimenta sa kontrolisanom brzinom čestica do ulaza u transportnu cev iz jednog suda i prikupljanjem iznešenih čestica iz transportne cevi u drugi sud. Tokom ovog eksperimenta brzina gasa se održava na konstantnoj vrednosti, protok čestica se postepeno i kontrolisano povećava, a pritisci se mere u karakterističnim tačkama sistema.

Yang /2004/ je ukazao na značajnu razliku između akumulativnog i klasičnog zagušivanja u odnosu na prečnik cevi i karakteristike čestica (grupa A, B, C ili D prema Geldart-ovoj /1973/ klasifikaciji). On je predložio postupak za određivanje radnog režima za cirkulacione fluidizovane slojeve definišući granicu zagušivanja i granicu početka brze fluidizacije.

Costa i dr. /2004/ su proučavali promene režima i nestabilnosti toka u vertikalnom transportu krupnih čestica primenjujući različite sisteme za doziranje čvrstih čestica (pužni transporter, gravitacioni dozer i sistem sa fontanskim slojem). Promene režima transporta i brzine zagušivanja su identifikovane na osnovu kombinovane analize sledećih zavisnosti: gradijenta pritiska od brzine, fluktuacija pritiska od poroznosti i poroznosti od brzine. Oni su došli do zaključka da za datu vrednost protoka gasa i masenog protoka čestica tip sistema za doziranje ne utiče na gradijent pritiska.

2.2.2. Model za izračunavanje osnovnih fluido-dinamičkih parametara retkog dvofaznog toka gas-čestice u zoni ubrzavanja

Suštinski problemi modelovanja dvofaznog retkog toka gas-čestice nisu značajnije razrešeni nakon Leung-ove /1980a/ analize. Leung /1980a/ je naglasio da su opšte prihvaćene jednačine kontinuiteta za pojedinačne faze i bilans količine kretanja za dvofaznu smešu, i pored toga što se mogu postaviti i dve jednačine za bilans količine kretanja za opisivanje dvofaznog toka gas-čestice /Littman i dr., 1993/.

Za jednodimenziono strujanje smeše fluid-čestice jednačine kontinuiteta za fluid i čestice su, respektivno:

$$\frac{d}{dz}(\epsilon \rho_f u A_d) = \frac{d}{dz} G_f \quad (2.48)$$

$$\frac{d}{dz}((1 - \epsilon) \rho_p v A_d) = \frac{d}{dz} G_p \quad (2.49)$$

Bilans količine kretanja jednodimenzionog strujanja smeše nestišljivog fluida i čestica može se prikazati prema Leung-u /1980a/, pod pretpostavkom da su karakteristike gasa konstantne /Grbavčić, 1989; Littman i dr., 1993/:

$$\rho_f \frac{d}{dz} (\varepsilon u^2) + \rho_p \frac{d}{dz} [(1-\varepsilon)v^2] = \left[-\frac{dp_d}{dz} \right] - [\rho_p(1-\varepsilon) + \rho_f \varepsilon] g - F_w \quad (2.50)$$

gde F_w predstavlja gradijent pritiska usled trenja smeše gas-čestice o zidove cevi i na osnovu analogije sa strujanjem fluida kroz prav cevni vod i Blasius-ovog rešenja /Bird i dr., 1960/ definisan je kao: $F_w = 4\tau_w/D_d$.

Jednačina (2.50), uz korišćenje jednačina kontinuiteta (jednačine 2.48 i 2.49), se može transformisati u oblik /Grbavčić, 1989; Littman i dr., 1993/:

$$\left[-\frac{dp_d}{dz} \right] = [\rho_p(1-\varepsilon) + \rho_f \varepsilon] + \left[\frac{G_f}{\Lambda_d} \frac{du}{dz} + \frac{G_p}{\Lambda_d} \frac{dv}{dz} \right] + F_w \quad (2.51)$$

po kome je ukupni gradijent pritiska jednak zbiru statičke težine čestica, ubrzanja smeše gas-čestice i trenja smeše gas-čestice o zidove cevi.

Individualni bilansi količine kretanja za fluid i čestice /Nakamura i Capes, 1973; Grbavčić, 1989; Littman i dr., 1993/, respektivno su:

$$\rho_f \frac{d}{dz} (\varepsilon u^2) = \varepsilon \left[-\frac{dp_d}{dz} \right] - \varepsilon \rho_f g - \beta(u-v)^2 - F_f \quad (2.52)$$

$$\rho_p \frac{d}{dz} [(1-\varepsilon)v^2] = (1-\varepsilon) \left[-\frac{dp_d}{dz} \right] + \beta(u-v)^2 - \rho_p g(1-\varepsilon) - F_p \quad (2.53)$$

Kao što je navedeno, bilans količine kretanja za smešu gas-čestice je opšte prihvaćen, međutim sporan je bilans količine kretanja za čestice i u literaturi postoji nekoliko jednačina. Neke od njih su:

Soo /1967, preuzeto iz Littman i dr., 1993/:

$$\rho_p(1-\varepsilon)v \frac{dv}{dz} = \beta(u-v)^2 - \rho_p g(1-\varepsilon) - F_p \quad (2.54)$$

Gidaspow i Solbrig /1976, preuzeto iz Littman i dr., 1993/:

$$-\frac{\rho_p(1-\varepsilon)d(u-v)^2}{2 dz} = -(1-\varepsilon)\rho_p g + \beta(u-v)^2 - F_p \quad (2.55)$$

Klinzing i dr. /1986, preuzeto iz Littman i dr., 1993/:

$$\rho_p(1-\varepsilon)v \frac{dv}{dz} = (1-\varepsilon) \left[-\frac{dp_d}{dz} \right] - (1-\varepsilon)(\rho_p - \rho_f)g + \beta(u-v) - F_e \quad (2.56)$$

U jednačinama (2.50) do (2.53) i (2.56), p_d je srednji lokalni pritisak fluida. U jednačini (2.56) F_e je elektrostatička sila koja uzima u obzir uticaj elektrostatičkog naelektrisanja čestica, dok je sila trenja između fluida i čestica proporcionalna relativnoj brzini između

čestica $\beta(u-v)$, a ne kvadratu relativne brzine $\beta(u-v)^2$ (član $\beta(u-v)$ se uobičajeno koristi za sitne čestice /Littman i dr., 1993/). Ne može se utvrditi da neka od jednačina (2.54) do (2.56) daje bolja rešenja na osnovu poređenja sa jednačinom (2.53) /Littman i dr., 1993/. Da bi se u određenom sistemu odredili pad pritiska, brzina fluida, brzina čestica i poroznost, pored jednačina kontinuiteta (jednačine 2.48 i 2.49), bilansa količine kretanja smeše fluid-čestice (jednačina 2.50) i bilansa količine kretanja za čestice (jednačina 2.53), potrebne su i odgovarajuće korelacije za predviđanje gradijenta pritiska usled trenja fluid-čestice (β) i čestice-zid transportne cevi (F_p) /Grbavčić, 1989/.

Za gradijent pritiska usled trenja smeše fluid-čestice o zidove transportne cevi pretpostavlja se aditivni karakter, tj. da se može razdvojiti na gradijent pritiska usled trenja fluid-zid i gradijent pritiska usled trenja čestice-zid transportne cevi:

$$F_w = F_f + F_p = \frac{4\tau_w}{D_d} \quad (2.57)$$

Može se uočiti da se sabiranjem jednačina (2.52) i (2.53) dobija jednačina (2.50).

Oba gradijenta pritiska usled trenja o zidove cevi se mogu predstaviti jednačinama Fanning-ovog tipa:

$$F_f = 2 f_f \rho_f \epsilon u^2 / D_d \quad (2.58)$$

$$F_p = 2 f_p \rho_p (1 - \epsilon) v^2 / D_d \quad (2.59)$$

U jednačini (2.59) se obično grupa ϵv^2 zamenjuje sa u^2 ili U^2 što računski ne predstavlja neku razliku s obzirom da je vrednost poroznosti bliska jedinici.

Kombinacijom bilansa količine kretanja primenjenih na ekspanziju partikulativno fluidizovanog sloja (jednačine 2.17 i 2.18) dobija se izraz:

$$\beta = \frac{\epsilon^3}{U^2} \left[-\frac{dP}{dz} \right] = \frac{\epsilon^3 (\rho_p - \rho_f) g (1 - \epsilon)}{U^2} \quad (2.19)$$

Za definisanje zavisnosti koeficijenta trenja fluid-čestice (β) od poroznosti sloja neophodno je poznavati zavisnost između brzine fluida (U) i poroznosti (ϵ) u jednačini (2.19), koja je u načelu nepoznata. Postoje brojne empirijske i poluempirijske zavisnosti $U=f(\epsilon)$, ali njihova primenljivost u širokom opsegu promenljivih je ograničena. Na osnovu ovih zapažanja Grbavčić i dr. /1991/ su razvili model za predviđanje zavisnosti koeficijenta trenja fluid-čestice od poroznosti primenom principa varijacionog računa (jednačine 2.24 do 2.28).

Opšte preporučeni pristup za predviđanje pada pritiska u "retkom" dvofaznom toku gas-čestice je da se ukupni pad pritiska sastoji iz tri individualna doprinosa: usled ubrzanja, usled gravitacije (tj. statičke težine čestica) i trenja smeše gas-čestice o zid transportne cevi. Može se uočiti da se prema jednačini (2.51) ukupni gradijent pritiska sastoji iz doprinosa statičke težine čestica, ubrzanja smeše gas-čestice i trenja smeše gas-čestice o zidove cevi.

Uobičajen pristup većine autora /napr. Capes i Nakamura, 1973; Yang, 1978; Grbavčić, 1989; Littman i dr., 1993, Garić i dr., 1995/ za određivanje koeficijenta trenja fluid-zid cevi, definisan jednačinom (2.58), je pretpostavka da se on može prikazati korelacijom za stacionarno turbulentno strujanje fluida bez prisustva čestica, tj. da se može odrediti prema korelaciji za standardni faktor trenja fluid-granica sistema, koja bazira na Blasius-ovom rešenju za strujanje fluida kroz glatke cevi /Bird i dr., 1960/:

$$f_f = 0.0791 / \text{Re}^{0.25} \quad (2.60)$$

Koeficijent trenja čestice-zid transportne cevi se može odrediti na osnovu brojnih korelacija iz literature za režim “retkog” toka. Interesantno je napomenuti da većina autora u svojim korelacijama ne uzima u obzir koncentraciju čestica u transportnoj cevi (poroznost), koja je sigurno važan parametar u “retkom” transportu gas-čestice /Yang, 1978/, gde su brojni sudari čestica sa zidom transportne cevi direktno proporcionalni koncentraciji čestica $(1-\epsilon)$. Takođe, Sankar i Smith /1986/ i Littman i dr. /1993/ su ukazali da treba biti vrlo oprezan pri izboru korelacije, s obzirom da su one izvedene na osnovu ispitivanja različitih sistema i da su dobili velika rasipanja predviđenih vrednosti u odnosu na njihove eksperimentalne podatke. Pored ovoga, prema Littman-u i dr. /1993/ i Zhang-u i dr. /1996/ ne bi trebalo zanemariti uticaj elektrostatičkih sila na ponašanje “retkog” dvofaznog toka gas-čestice. Littman i dr. /1993/ tvrde da znatno veće vrednosti koeficijenta trenja čestice-zid transportne cevi iz literaturnih podataka koje su analizirali u odnosu na vrednosti koje su oni dobili u dobro uzemljenom sistemu, pri približno istim radnim uslovima, potiču usled elektrostatičkog efekta čestica. Oni takođe preporučuju uključenje ovih efekata u korelacije za koeficijent trenja čestice-zid cevi. Većina najčešće korišćenih korelacija za određivanje koeficijenta trenja čestice-zid transportne cevi u pneumatskom transportu su prikazali u svojim radovima Sankar i Smith /1986/ i Garić i dr. /1995/. Od direktnih empirijskih korelacija ovde će biti navedene tri:

Capes i Nakamura /1973/:

$$f_p = 0.0483 v^{-1.22} \quad (2.61)$$

Yang /1978/:

$$U/U_t \succ 1.5: f_p = 0.0126 \frac{(1-\epsilon)}{\epsilon^3} \left[(1-\epsilon) \frac{\text{Re}_t}{\text{Re}} \right]^{-0.979} \quad (2.62)$$

$$U/U_t \prec 1.5: f_p = 0.0410 \frac{(1-\epsilon)}{\epsilon^3} \left[(1-\epsilon) \frac{\text{Re}_t}{\text{Re}} \right]^{-1.021}$$

Garić i dr. /1995/:

$$f_p \frac{\epsilon^3}{1-\epsilon} \frac{U}{U_t} = 0.0017 \left[\frac{1-\epsilon}{u_s/U_t} \right]^{-1.5} \quad (2.63)$$

2.2.3. Model za izračunavanje osnovnih fluido-dinamičkih parametara “retkog” dvofaznog toka gas-čestice van zone ubrzavanja (stacionarno strujanje)

Nakon ulaska u transportnu cev čestice se ubrzavaju (u odnosu na zid cevi) od početne do konačne vrednosti brzine, koncentracija čestica opada, takođe, od početne do

konačne vrednosti. Izvan zone ubrzavanja pritisak se menja linearno po visini cevi, tj. $d(-dP/dz)/dz=0$.

U razvijenom toku (stacionarno strujanje) za jednodimenziono strujanje fluida i čestica jednačine kontinuiteta za fluid i čestice (jednačine 2.48 i 2.49) postaju, respektivno:

$$\frac{d}{dz}(\varepsilon \rho_f u) = 0, \quad \varepsilon u = U = \frac{G_f}{\rho_f A_d} \quad (2.64)$$

$$\frac{d}{dz}[(1-\varepsilon)\rho_p v] = 0, \quad (1-\varepsilon)v = c_s = \frac{G_p}{\rho_p A_d} \quad (2.65)$$

U razvijenom toku (stacionarno strujanje) članovi na levoj strani jednačina za bilans kretanja smeše gas-čestice (jednačina 2.50), za fluid (jednačina 2.52) i za čestice (jednačina 2.53) su jednaki nuli. Nakon uvođenja "dinamičkog" pritiska (jednačina 2.12) ove jednačine dobijaju sledeće oblike:

$$\text{smeša gas-čestice:} \quad \left[-\frac{dP}{dz} \right] = (1-\varepsilon) \cdot (\rho_p - \rho_f)g + F_w \quad (2.66)$$

$$\text{fluid:} \quad \varepsilon \left[-\frac{dP}{dz} \right] = \beta (u - v)^2 + F_f \quad (2.67)$$

$$\text{čestice:} \quad (1-\varepsilon) \left[-\frac{dP}{dz} \right] = -\beta (u - v)^2 + (\rho_p - \rho_f)g (1-\varepsilon) + F_p \quad (2.68)$$

Za gradijent pritiska usled trenja smeše fluid-čestice o zidove transportne cevi pretpostavlja se aditivni karakter, tj. da se može razdvojiti na gradijent pritiska usled trenja fluid-zid i gradijent pritiska usled trenja čestice-zid transportne cevi:

$$F_w = F_f + F_p = \frac{4\tau_w}{D_d} \quad (2.57)$$

F_p i F_f su gradijenti pritiska usled trenja čestice-zid i fluid-zid definisani pomoću koeficijenata trenja f_f i f_p :

$$F_f = 2 f_f \rho_f U^2 / D_t \quad (2.58)$$

$$F_p = 2 f_p \rho_p (1-\varepsilon) v^2 / D_t \quad (2.59)$$

F_f je određivan iz uz korišćenje standardne korelacije za koeficijent trenja fluid-zid /Bird i dr., 1960/:

$$f_f = 0.0791 / \text{Re}^{0.25} \quad (2.60)$$

F_p je određivan korišćenjem korelacije za koeficijent trenja čestice-zid, f_p , /Garić i dr., 1995/:

$$f_p \frac{\varepsilon^3}{1-\varepsilon} \frac{U}{U_t} = 0.0017 \left[\frac{1-\varepsilon}{u_s / U_t} \right]^{-1.5} \quad (2.63)$$

Pretpostavlja se da je sila trenja između fluida i čestica proporcionalna kvadratu relativne brzine između fluida i čestica, a koeficijent proporcionalnosti, tj. bezdimenzioni

koeficijent trenja fluid-čestice se određuje na osnovu principa varijacionog računa (jednačine 2.24 do 2.28).

Iz jednačina (2.66), (2.67) i (2.56) se dobija izraz za relativnu brzinu između fluida i čestica:

$$u_s = u - v = \sqrt{\frac{(\rho_p - \rho_f)g(1 - \varepsilon) + F_p - (1 - \varepsilon)F_f / \varepsilon}{\beta / \varepsilon}} \quad (2.69)$$

Da bi se odredila relativna brzina između fluida i čestica, neophodno je poznavati poroznost, koeficijent trenja fluid-čestice i gradijente pritiska usled trenja fluid-zid i čestice-zid. Sa pouzdanim relacijama za F_p i β , dobio bi se izraz koji daje vezu između površinske brzine fluida, brzine čestica i poroznosti u transportnoj cevi. primenom jednačine (2.69) na partikulativno fluidizovani sloj /Grbavčić, 1989, Garić i dr., 1995/ u kom su gradijenti pritiska usled trenja fluid-zid i čestice-zid zanemarljivi (brzina fluida relativno mala) a srednja brzina čestica jednaka nuli, dobija se:

$$u_{sF} = \frac{U}{\varepsilon} = \sqrt{\frac{(\rho_p - \rho_f)g(1 - \varepsilon)}{\beta_{mF} / \varepsilon}} \quad (2.70)$$

a u kombinaciji sa izrazom za promenu površinske brzine fluida pri ekspanziji partikulativno fluidizovanog sloja /Grbavčić i dr., 1991/:

$$U = U_{mF} \sqrt{\frac{\varepsilon^3(1 - \varepsilon)}{\varepsilon_{mF}^3(1 - \varepsilon_{mF})} \frac{\beta_{mF}}{\beta}} \quad (2.71)$$

jednačina (2.70) se preuređuje u oblik:

$$u_{sF} = \frac{U_{mF}}{\varepsilon} \sqrt{\frac{\varepsilon^3(1 - \varepsilon)}{\varepsilon_{mF}^3(1 - \varepsilon_{mF})} \frac{\beta_{mF}}{\beta}} \quad (2.72)$$

gde je u_{sF} relativna brzina između faza u partikulativno fluidizovanom sloju sa istom poroznosti kao u transportnoj cevi.

Pod pretpostavkom da je u vertikalnom dvofaznom stacionarnom toku $\beta = \beta_{mF}$, što je eksperimentalno dokazano /Grbavčić, 1989/, iz jednačina (2.69) i (2.70) se dobija izraz za relativnu brzinu između fluida i čestica u pneumatskom transportu /Grbavčić, 1989; Garić i dr., 1995/:

$$u_s = u - v = u_{sF} \sqrt{F^*} \quad (2.73)$$

F^* je bezdimenzioni gradijent pritiska usled trenja definisan kao:

$$F^* = 1 + \frac{F_p}{F_e} - \frac{F_f}{F_e} \frac{1 - \varepsilon}{\varepsilon} \quad (2.74)$$

gde je F_e statička težina sloja u fluidizovanom stanju (jednačina 2.13).

Gradijent pritiska van zone ubrzavanja čestica se dobija kombinacijom jednačina (2.67) i (2.68):

$$-\frac{dp}{dz} = F_e + F_f + F_p \quad (2.75)$$

2.2.4. Predviđanje brzine zagušenja i poroznosti u stanju zagušivanja dvofaznog toka gas-čestice

Poznavanje brzine zagušenja je od izuzetnog značaja za projektovanje pneumatskih transportnih linija, pneumatskih sušnica, reaktora sa vertikalnim tokom, sistema koji sadrže elemente vertikalnog toka, kao što su fontanski i fontansko-fluidizovani slojevi sa cevnom umetkom i za određivanje radnog režima toka, s obzirom da brzina zagušenja definiše minimalnu brzinu gasa potrebnu za režim "retkog" stabilnog transporta za dati protok čestica.

U literaturi se može naći veliki broj modela, metoda i korelacija za predviđanje početka zagušivanja u sistemima gas-monodisperzne čestice, a neke od njih su predložili Leung i dr. /1971/, Yousfi i Gau /1974/, Yang /1983, 1975/, Knowlton i Bachovchin /1976/, Mink /1983/, Briens i Bergougou /1986/, Day i dr. /1990/ i Bi i Fan /1991/. U tabeli 2.4 su navedene neke od korelacija za izračunavanje brzine zagušenja u sistemima gas-čvrste monodisperzne čestice. Treba napomenuti da većina predloženih korelacija ne uzima u obzir prečnik transportne cevi, osim korelacija Mink-a /1983/ i Knowlton-a i Bachovchin-a /1976/, iako je poznato da sve tri vrste zagušivanja (A, B i C) zavise od konfiguracije transportnog sistema.

Nekoliko autora je napravilo pregled raspoložive literature o fenomenu zagušivanja /Chong i Leung, 1986; Leung, 1980b; Xu i dr., 2001; Yang, 2004/. Chong i Leung /1986/ su došli do zaključka da ne postoji univerzalna jednačina koja bi bila pogodna za predviđanje zagušivanja za sve tipove sistema gas-čestice. Oni preporučuju Yousfi-evu i Gau-evu /1974/ korelaciju za sisteme sa česticama koje pripadaju A i B grupi prema Geldart-ovoj /1973/ klasifikaciji, a Yang-ovu /1983/ korelaciju za čestice iz grupe D. Bi i dr. /1993/ su preporučili korelaciju Yousfi-a i Gau-a /1974/ za predviđanje brzine zagušenja tipa C (klasično zagušivanje), a korelaciju Bi-a i Fan-a /1991/ za zagušivanje tipa A (akumulativno zagušivanje). Iste korelacije preporučuju i Bai i dr. /1998/, s obzirom da one dobro interpretiraju njihove eksperimentalne podatke dobijene u cirkulacionom fluidizovanom sloju čestica katalizatora ($d_p=70 \mu\text{m}$, $\rho_p=1600 \text{ kg/m}^3$). Prema analizi Bi-a i Grace-a /1999/ najbolje slaganje sa literaturnim podacima za zagušivanje tipa A (akumulativno zagušivanje) pokazuje korelacija Yang-a /1975/, pored korelacije koju su isti autori postavili u ranijim ispitivanjima. Xu i dr. /2001/ su na osnovu analize literaturnih podataka za zagušivanje tipa A (akumulativno zagušivanje, za čestice $d_p < 200 \mu\text{m}$) i za zagušivanje tipa C (klasično zagušivanje, za čestice $d_p < 76 \mu\text{m}$) izvršili poređenje tih podataka sa raspoloživim korelacijama. Na bazi izvršenih poređenja došli su do zaključka da najveću tačnost predviđanja tačke zagušivanja za klasično zagušivanje tipa C ($d_p < 76 \mu\text{m}$, čestice iz grupa A i B prema Geldart-ovoj /1973/ klasifikaciji) pokazuje korelacija Yousfi-ja i Gau-a /1974/. Xu i dr. /2001/ su takođe preporučili i Mink-ovu /1983/ korelaciju usled slične pouzdanosti predviđanja, pri čemu treba naglasiti da je u ovu korelaciju uključen i prečnik transportne cevi.

Tabela 2.4. Korelacije za izračunavanje brzine zagušivanja u sistemima gas-čvrste monodisperzne čestice

autor	korelacija
Leung /1971/	$U_c = 32.3c_{sc} + 0.97U_t, \quad \varepsilon_c = 0.97$
Yousfi i Gay /1974/	$\frac{U_c}{\sqrt{gd_p}} = 32 \left(\frac{G_p}{A_d \rho_f U_c} \right)^{0.28} Re_t^{-0.06}$
Yang /1975/	$u_c = \frac{U_c}{\varepsilon_c} = U_t + \frac{c_{sc}}{1 - \varepsilon_c}, \quad 2gD_d \frac{(\varepsilon_c^{-4.7} - 1)}{(u_c - U_t)^2} = 0.01$
Knowlton i Bachowchin /1976/	$\frac{U_c}{\sqrt{gd_p}} = 9.07 \left(\frac{\rho_p}{\rho_f} \right)^{0.347} \left(\frac{G_p d_p}{A_d \mu} \right)^{0.214} \left(\frac{d_p}{D_d} \right)^{0.246}$
Punwani i dr. /1976/	$u_c = \frac{U_c}{\varepsilon_c} = U_t + \frac{c_{sc}}{1 - \varepsilon_c}, \quad 2gD_d \frac{(\varepsilon_c^{-4.7} - 1)}{(u_c - U_t)^2} = 8.743 \cdot 10^{-3} \rho_f^{0.77}$
Yang /1983/	$2gD_d \frac{(\varepsilon_c^{-4.7} - 1)}{(u_c - U_t)^2} = 6.81 \cdot 10^5 \left(\frac{\rho_f}{\rho_p} \right)^{2.2}$
Mink /1983/	$\frac{U_c^2}{gd_p} = 201.6 \cdot \left[\left(\frac{\alpha}{1 - \alpha} \right) \left(\frac{\rho_p - \rho_f}{\rho_f} \right) \left(\frac{\rho_p}{\rho_w} \right) \left(\frac{D_d}{d_p} \right) \right]^{0.34}, \quad \alpha = \frac{G_p}{A_d \rho_p U} = \frac{G_p}{A_d \rho_p U_c}$
Bi i Grace /1995/	$U_c = 1.24 \frac{\mu}{\rho_f d_p} Ar^{0.45}$

U tabeli 2.5 su izdvojene tri korelacije za određivanje koeficijenta trenja čestice-zid transportne cevi u sistemima gas-čestice za stanje zagušivanja.

Tabela 2.5. Korelacije za izračunavanje koeficijenta trenja čestice-zid transportne cevi u sistemima gas-čestice za stanje zagušivanja

autor	korelacija
Yang /1975/	$\frac{f_{pc}}{4} = 0.01$
Punwani i dr. /1976/	$\frac{f_{pc}}{4} = 8.743 \cdot 10^{-3} \rho_f^{0.77}$
Yang /1983/	$\frac{f_{pc}}{4} = 6.81 \cdot 10^5 \left(\frac{\rho_f}{\rho_p} \right)^{2.2}$

Mehanizam zagušivanja nije potpuno razjašnjen, tako da za brzinu zagušenja postoje različite definicije. Često se pretpostavlja da je u stanju zagušivanja relativna brzina između gasa i čestica jednaka brzini odnošenja čestica /Capes i Nakamura, 1973; Leung i dr., 1971; Yang, 1975; Briens i Bergougnou, 1986; Punwani i dr., 1976/. Pored toga, Leung

i dr. /1971/ su pretpostavili da je u stanju zagušivanja u svim sistemima $\varepsilon_c=0.97$, dok su Yang /1983, 1975/ i Punwani i dr. /1976/ pretpostavili da u stanju zagušivanja koeficijent trenja čestice-zid transportne cevi dostiže neku kritičnu vrednost. Briens i Bergougnou /1986/ su određivali brzinu zagušenja (U_c) pretpostavljajući da je u stanju zagušivanja gradijent pritiska minimalan i da uz zid cevi postoji kretanje čestica naniže u anularnoj zoni, koja zauzima 25% površine poprečnog preseka cevi. Day i dr. /1990/ su postavili model za izračunavanje brzine zagušenja polazeći od jednačina kontinuiteta za fluid i čestice (jednačine 2.64 i 2.65) i bilansa količine kretanja za smešu gas-čestice (jednačina 2.50) definisanu preko “dinamičkog” pritiska (jednačina 2.12). Kombinacijom navedenih jednačina bilans količine kretanja za smešu gas-čestice su preuredili u oblik:

$$\gamma \frac{d\varepsilon}{dz} = \left[-\frac{dP}{dz} \right] - (\rho_p - \rho_f)g(1 - \varepsilon) \quad (2.76)$$

gde je:

$$\gamma = \frac{\rho_p c_s^2}{(1 - \varepsilon)^2} - \frac{\rho_f U^2}{\varepsilon^2} = \rho_p v^2 - \rho_f u^2 \quad (2.77)$$

Analizirajući različite sisteme Day i dr. /1990/ su zaključili da je predznak parametra γ bitan za profil poroznosti, tj. u režimu “retkog” transporta $\gamma > 0$, a u režimu “gustog” transporta $\gamma < 0$. Stoga su pretpostavili da do zagušivanja u razvijenom toku (van zone ubrzavanja čestica) dolazi kada je na ulazu u transportnu cev zadovoljen uslov $\rho_p v_0^2 = \rho_f u_0^2$. Korišćenjem empirijske korelacije za odnos u_{sc0}/U_t na ulazu u cev, postavili su metod za proračun brzine zagušenja (U_c) za dati protok čestica.

Kako su navedene definicije brzine zagušenja različite, na osnovu njih će se dobiti i različite vrednosti za brzinu zagušenja, pri čemu je jedino sigurno da pri brzini zagušenja dolazi do neke transformacije od retkog ka gustom režimu transporta (slika 2.11).

2.2.5. Veza između protoka čestica, protoka fluida i poroznosti

Jednačina (2.73) se može transformisati u oblik koji daje vezu između protoka čestica, protoka fluida i poroznosti korišćenjem jednačina kontinuiteta za fluid i čestice (jednačine 2.64 i 2.65):

$$\frac{G_p}{G_f} = \frac{\rho_p}{\rho_f} \frac{(1 - \varepsilon)}{\varepsilon} \frac{v}{u} = \frac{\rho_p}{\rho_f} \frac{(1 - \varepsilon)}{\varepsilon} \left(1 - \frac{u_{sf}\varepsilon}{U} \sqrt{F^*} \right) \quad (2.78)$$

Iz prethodne jednačine se može izvesti veza između stvarne (linijske) i volumetrijske poroznosti. Volumetrijska poroznost je definisana kao:

$$1 - \varepsilon_v = \frac{G_p / \rho_p}{G_p / \rho_p + G_f / \rho_f} \quad (2.79)$$

Iz prethodne jednačine proizilazi da je:

$$\frac{G_p}{G_f} = \frac{\rho_p}{\rho_f} \frac{1 - \varepsilon_v}{\varepsilon_v} \quad (2.80)$$

Upoređivanjem jednačina (2.76) i (2.78) sledi:

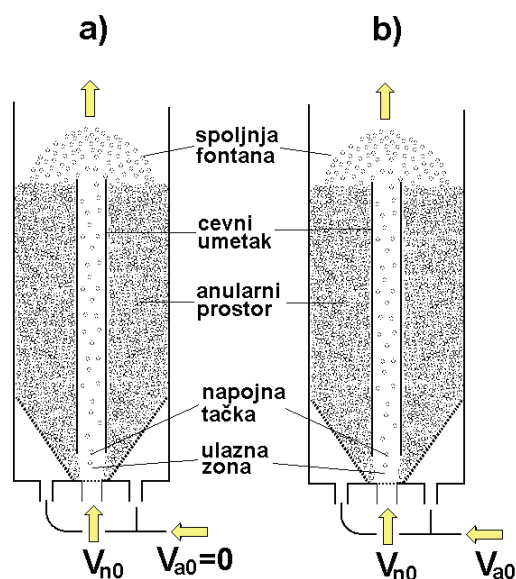
$$\frac{1 - \varepsilon_v}{\varepsilon_v} = \frac{1 - \varepsilon}{\varepsilon} \frac{v}{u} \quad (2.81)$$

da bi volumetrijska i stvarna poroznost bile jednake jedino u slučaju kada bi brzina čestica bila jednaka brzini fluida. S obzirom da je u transportnoj cevi relativna brzina između fluida i čestica $u_s > 0$, to znači da je volumetrijska poroznost uvek veća od stvarne poroznosti u transportnoj cevi.

2.3. OPŠTE KARAKTERISTIKE FONTANSKIH I FONTANSKO-FLUIDIZOVANIH SLOJEVA SA CEVNIM UMETKOM

Fontanski sloj, koji su originalno razvili Mathur i Gishler /1955/ za sušenje žitarica, je našao uspešnu primenu u različitim procesima, kao što su hemijske reakcije, termička obrada čvrstih materijala, smešavanje, kotiranje čestica, itd. /Mathur i Epstein, 1974/. U cilju poboljšanja performansi, efikasnosti prenosa toplote i boljeg kontakta gasa i čestica razvijena je modifikacija klasičnog fontanskog sloja uvođenjem dodatnog toka gasa kroz anularni prostor, tzv. fontansko-fluidizovani sloj /Vuković, 1983/. I pored određenih prednosti koje ovakvi sistemi imaju, suštinski nedostaci su ograničena visina sloja koja se može fontanovati, za datu geometriju kolone i veličinu čestica, i visok pad pritiska, što predstavlja nepogodnost pri realizaciji većih sistema. U slojevima veće visine može doći do nestabilnog fontanovanja ili do fluidizacije čestica na vrhu sloja.

U cilju prevazilaženja nedostataka fontanskih i fontansko-fluidizovanih slojeva izvršena je dalja modifikacija postavljanjem cevnog umetka u osu sloja. Na ovaj način je prevaziđeno ograničenje u maksimalnoj visini sloja za fontanovanje, smanjena je vrednost minimalne brzine fontanovanja, cevni umetak primorava sve čestice da pređu isti put i onemogućava penetraciju fluida iz centralnog dela u anularni deo sloja /Grbavčić i dr., 1992; Ishikura i dr., 2003/. Ovako modifikovani sistemi su vrlo fleksibilni, odnosno njihove karakteristike se mogu uskladiti sa karakteristikama procesa, s obzirom da se može podešavati i regulisati protok gasa u mlaznom toku, protok gasa kroz anularni prostor sloja i brzina cirkulacije čestica. U sistemima prikazanim na slici 2.14, za razliku od klasičnih fontanskih i fontansko-fluidizovanih slojeva, nema interakcije čestica i gasa između

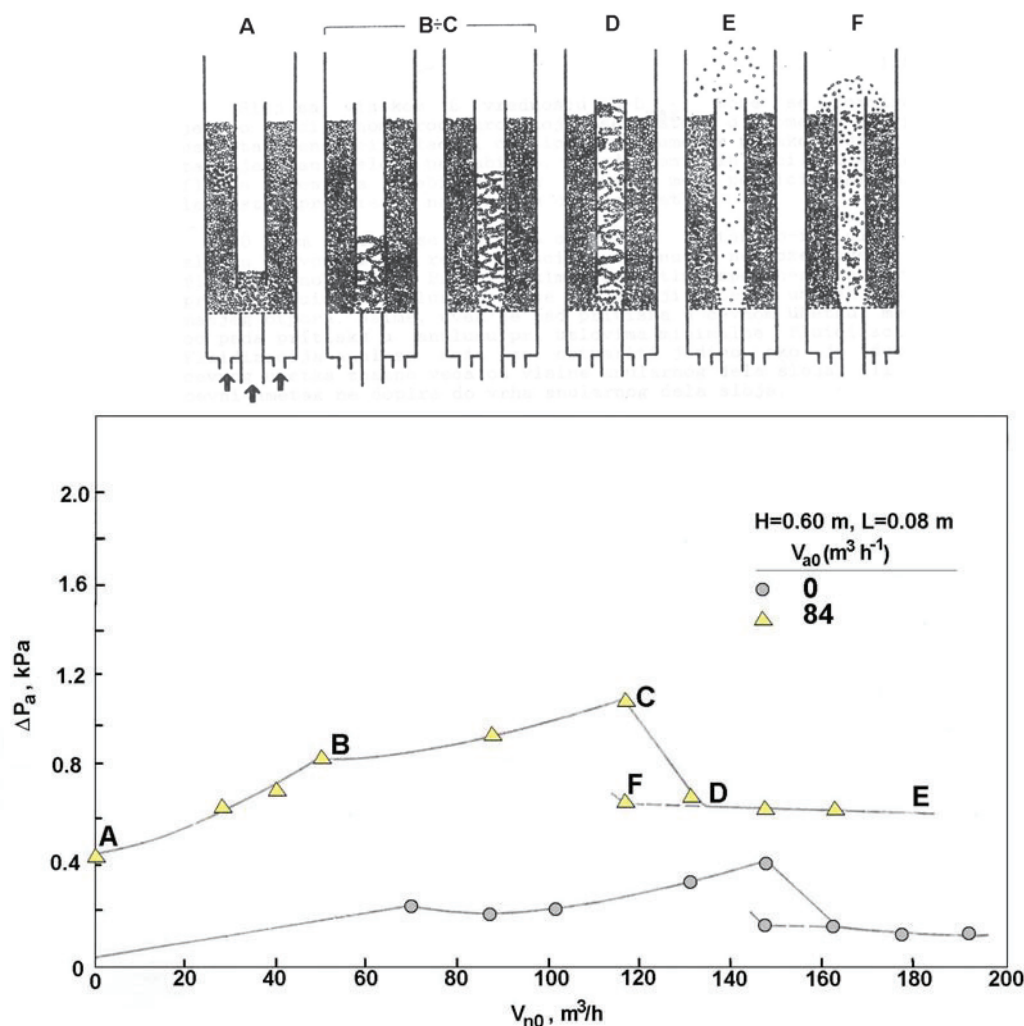


Slika 2.14. Šematski prikaz fontanskog i fontansko-fluidizovanog sloja sa kontrolisanom cirkulacijom čestica i karakterističnim zonama

centralne i anularne zone sloja, sem na vrhu sloja, tj. u spoljnoj fontani, i na dnu sloja, tj. u delu sloja ispod cevnog umetka (ulazna zona). Mlaz gasa (V_{n0}) usisava čestice iz anularnog dela ulazne zone, potiskuje ih kroz cevni umetak, gde se odvija pneumatski transport čestica, koje se na izlazu iz cevnog umetka odvajaju iz struje gasa, padaju na vrh anularnog dela sloja, koji se kreće na dole u vidu pakovanog sloja prema ulaznoj zoni gde otpočinje sledeći ciklus recirkulacije čestica.

Formiranje sloja se najlakše definiše pomoću zavisnosti pada

pritiska od protoka fluida. Na slici 2.15 /Grbavčić i dr., 1982/ je prikazana zavisnost pada pritiska kroz sloj od protoka vazduha na ulazu u sloj za sistem vazduh-CaCO₃ sfere i šematski prikaz dešavanja pri formiranju sloja. Visina sloja čestica u cevnom umetku iznosi 30-80 mm pre početka uvođenja vazduha. Povećanjem protoka vazduha kroz mlaznicu, za određenu vrednost protoka vazduha na ulazu u anularni deo sloja, povećava se pad pritiska po liniji AB. U tački B počinje fluidizacija čestica koje se nalaze na dnu cevnog umetka. Daljim povećanjem protoka vazduha duž linije BC fluidizovani sloj ekspanduje, pri čemu se formiraju agregati čestica i mehuri gasa. U tački C pojedini agregati čestica stižu na vrh cevnog umetka, dok se ostali dezintegrišu u manje agregate pri čemu dolazi do interne recirkulacije čestica. Neznatno povećanje protoka vazduha prouzrokuje izbacivanje čestica iz cevnog umetka i smanjenje pada pritiska. U tački D je uspostavljen stabilan redak pneumatski transport, što ujedno odgovara i početku stabilne cirkulacije čestica kroz zone sloja. Protok vazduha koji odgovara tački D predstavlja minimalan protok za cirkulaciju čestica. Povećanjem protoka vazduha od tačke D pad pritiska ostaje konstantan (DE).



Slika 2.15. Pad pritiska kroz sloj u funkciji protoka vazduha na ulazu u kolonu za sistem vazduh-CaCO₃ sfere (iz Grbavčić i dr., 1982)

Smanjenjem protoka vazduha na vrednost koja odgovara minimalnom protoku za cirkulaciju čestica duž linije DF ne remeti pneumatski transport čestica, sve do tačke F. Međutim, smanjenje protoka vazduha dovodi do kvalitativne promene režima transporta. Pri brzinama fluida većim od minimalne brzine za cirkulaciju, čestice se kreću po paralelnim strujnicama u retkom vertikalnom transportu. Smanjenjem brzine vazduha ispod minimalne vrednosti za cirkulaciju, zapreminska koncentracija čestica se povećava uz formiranje klastera. Neposredno pre dostizanja tačke F, dolazi do gustog pneumatskog transporta čestica sa pojavom mehura gasa, i u tački F dolazi do zagušivanja. Brzina vazduha u ovoj tački odgovara brzini zagušenja, pri kojoj pneumatski transport čestica kroz cevni umetak prestaje, a samim tim i cirkulacija čestica /Claflin, 1982; Grbavčić i dr., 1982/. Na osnovu rezultata ispitivanja, Grbavčić i dr. /1982/ su zaključili da je minimalna brzina fluida za cirkulaciju čestica manja od minimalne brzine za fontanovanje.

Kod ovakvih sistema je dužina cevi, tj. visina sloja, jedino ograničena raspoloživom energijom struje gasa koja se uvodi na dnu kolone /Yang i Keairns, 1983; Claflin i Fane, 1983/. Ulazna zona ispod cevnog umetka ima ključnu ulogu u raspodeli protoka gasa između cevnog umetka i anularnog dela sloja, a samim tim i direktan uticaj na praktičnu primenu slojeva sa cevnim umetkom. Takođe, cirkulacija čestica je jedan od najkritičnijih parametara u predviđanju performansi ovih sistema. U literaturi postoji veliki broj radova koji se bave ispitivanjem karakteristika i primene fontanskih i fontansko-fluidizovanih slojeva sa cevnim umetkom, a sa aspekta hidrodinamičkih ispitivanja najviše pažnje je posvećeno penetraciji gasa u ulaznoj zoni sloja i cirkulaciji čestica. Freitas i Freire /2002/ smatraju da još uvek ima malo objavljenih rezultata i podataka koja se odnose na fundamentalne karakteristike ovakvih sistema.

2.3.1. Stabilnost sloja

Za slojeve sa cevnim umetkom teorijski ne postoji ograničenje u maksimalnoj visini sloja koja se može fontanovati, za razliku od klasičnih slojeva gde postoji maksimalna visina sloja kroz koju mlaz gasa ne može da penetrira i tako oformi fontanu. Međutim, kod sistema sa cevnim umetkom postoje dve granične vrednosti rastojanja cevnog umetka od mlaznice na dnu kolone /Grbavčić i dr., 1982/ između kojih je moguće ostvariti stabilan rad sistema podešavanjem protoka fluida kroz mlaznicu. Ispod neke minimalne vrednosti rastojanja ne može se ostvariti cirkulacija čestica, pošto površina granice fontana-anulus u ulaznoj zoni (slika 2.14) nije dovoljna za slobodno uticanje čestica iz anularnog dela u fontanu ispod cevnog umetka. S druge strane, iznad određene vrednosti rastojanja ne može se ostvariti vertikalni pneumatski transport kroz cevni umetak, s obzirom da povećavanjem protoka gasa veći deo penetrira kroz kanale u anularni deo sloja i pri dovoljno velikom protoku otpočeće i fluidizacija čestica u anularnom delu sloja /Grbavčić i dr., 1982; Ishikura i dr., 2003/. Sloj je vrlo nestabilan usled periodičnog izbacivanja čestica kroz cevni umetak i fluidizacije čestica u anularnom delu sloja. Sa aspekta stabilnosti sistema

neophodno je izbeći punjenje cevnog umetka česticama, s obzirom da se pri narednom startovanju sistema neće uspostaviti cirkulacija čestica usled prevelikog otpora pakovanog sloja protoku fluida. Ovo se može rešiti pomoću pokretne mlaznice ili pokretnog cevnog umetka, čime bi se fizički razdvajala fontana od anulusa u ulaznoj zoni pri prekidanju rada /Grbavčić i dr., 1982; Grbavčić, 1989/ ili pažljivim simultanim smanjivanjem oba protoka fluida, i kroz mlaznicu i kroz anularni deo sloja /Grbavčić i dr., 1992/. Yang i Keairns /1983, diskusija na str. 363/ takođe ukazuju na smanjenje stabilnosti sloja pri velikim rastojanjima cevnog umetka od dna, što prouzrokuje probleme u narednom startovanju sistema, i što je manja vrednost rastojanja (do neke minimalne vrednosti) to je sloj stabilniji. Yang i Keairns /1983/ su zapazili da na stabilnost sloja ima uticaj i vrsta čestica, napr. transport sitnog peska kroz cevni umetak se odvija u vidu klipova, a ne u režimu retkog dvofaznog toka. Ishikura i dr. /2003/ su ispitivali stabilnost fontanskog sloja sa cevnim umetkom (poroznim i neporoznim) za sistem vazduh-binarna smeša sitnih staklenih sfera i ustanovili da direktan uticaj na stabilnost imaju ukupna cirkulacija čestica i poroznost u cevnom umetku, odnosno da pri koncentraciji čestica $(1-\epsilon) \approx 0.6$ počinje nestabilan pneumatski transport, tj. zagušivanje. Ishikura i dr. /2003/ takođe ukazuju na činjenicu da pri velikim prečnicima cevnog umetka i velikim rastojanjima cevnog umetka od mlaznice sistem počinje nestabilno da se ponaša. Claflin i Fane /1984/ su u svoj hidrodinamički model uključili i proveru sklonosti fontanskog sloja sa cevnim umetkom ka zagušivanju, prema kriterijumu Yang-a /1973/.

2.3.2. Kretanje čestica i ukupna cirkulacija čestica

Čestice usisane iz anularnog dela sloja dobijaju naglo ubrzanje usled trenja između fluida i čestica, nakon čega se usporavaju usled savlađivanja otpora pri proticanju kroz cevni umetak. Na izlazu iz cevnog umetka, u spoljnoj fontani, čestice padaju na vrh anularnog dela sloja i kao gusto pakovan sloj se kreću na dole. Koncentracija čestica u cevnom umetku zavisi od rastojanja cevnog umetka od mlaznice, protoka fluida kroz mlaznicu i protoka nezavisnog anularnog toka fluida. Brzinu čestica u cevnom umetku je moguće odrediti praćenjem obeleženih čestica na transparentnom zidu polukolone korišćenjem brzih kamera /Freitas i Freire, 2001/. Brzina čestica kroz anularni deo sloja se sa zadovoljavajućom tačnošću određuje merenjem vremena za koje obeležene čestice pređu određeno rastojanje /Grbavčić, 1989; Freitas i Freire, 2001, Ishikura i dr., 2003/. Na osnovu analize fotografija Grbavčić /1989/ je ustanovio da uniformnost raspodele brzine obeleženih čestica koje se kreću naniže kroz anularni deo sloja zavisi od vrste čestica i koeficijenta trenja čestice-zid cevnog umetka. Takođe je zaključio da je potrebno više ciklusa za potpuno smešavanje čestica u slučaju njihovog uniformnog kretanja u vidu klipova kroz anularni deo sloja. Druga najčešće korišćena metoda određivanja brzine čestica kroz anularni deo sloja je indirektno određivanje pomoću korelacije između gradijenta pritiska i brzine čestica uspostavljene na osnovu eksperimenata vršenih u

pakovanom sloju čestica /Claflin, 1982; Yang i Keairns, 1983; Grbavčić i dr., 1992; Ishikura i dr., 2003/. Ukupna cirkulacija čestica kroz cevni umetak se izračunava na osnovu izmerene, ili izračunate, brzine čestica kroz anularni deo sloja i izmerene, ili pretpostavljene, (uglavnom je to vrednost koja odgovara minimalno fluidizovanom stanju) vrednosti poroznosti u anularnom delu sloja:

$$G_p = v_a A_a \rho_p (1 - \varepsilon_a) \quad (2.82)$$

Ishikura i dr. /2003/ su lokalnu brzinu čestica u cevnom umetku merili pomoću specijalne sonde sa tri optička vlakna (jedno upravlja laserom koji osvetljava staklene čestice u pokretu, a ostala dva reflektovanu svetlost konvertuju u električni signal). Na osnovu izmerene vrednosti brzine čestica u cevnom umetku su određivali koncentraciju čestica, odnosno poroznost:

$$(1 - \varepsilon) = G_p / v A_d \rho_p \quad (2.83)$$

Ukupna cirkulacija čestica se povećava sa povećanjem rastojanja između cevnog umetka i mlaznice, protoka fluida na mlaznici, sa povećanjem visine sloja, prečnika cevnog umetka, ali se mora voditi računa o granicama u kojima egzistira stabilan sloj /Claflin i Fane, 1983; Grbavčić, 1989; Ishikura i dr., 2003/. Na primer, Claflin i Fane /1984/ su na osnovu eksperimentalnih podataka postavili empirijsku jednačinu za određivanje cirkulacije zrna pšenice u fontanskom sloju sa cevnom umetkom u zavisnosti od većine navedenih parametara:

$$G_p = 224.2(L \cdot V_{n0})^{0.7} M_{sl}^{0.3} D_d^{1.22} \quad (2.84)$$

2.3.3. Raspodela fluida

Ulazna zona ima izuzetan značaj na fizičku razmenu gasa i čestica između anularnog dela sloja i fontane ispod cevnog umetka. Da bi se definisala raspodela brzina gasa u ulaznoj zoni najjednostavnije je poći od pretpostavke da se ulazna zona ponaša identično klasičnom fontanskom, odnosno fontansko-fluidizovanom sloju. Epstein i Grace /1984/ i Bridgwater /1985/ su dali pregled najrelevantnijih korelacija i modela za predviđanje ponašanja klasičnih slojeva. Buchanan i Wilson /1965, referenca iz /Eng i dr., 1989// su zapazili da je raspodela gasa u ulaznoj zoni ekvivalentna raspodeli u klasičnom fontanskom sloju visine H_m , tako da se procena raspodele brzina gasa u ulaznoj zoni može izvršiti na osnovu korelacije predložene od Mamuro-a i Hattori-a /1968, referenca iz /Epstein i Grace, /1984/;Bridgwater, 1985//.

Za fontanski sloj visine H_m , Mamuro i Hattori su postavili pojednostavljen bilans sila za diferencijalni element anularnog dela sloja visine dz . Bazirajući se na pretpostavci da se Darcy-jev zakon može primeniti na vertikalnu komponentu brzine fluida kroz anularni deo sloja i na pretpostavci da su čestice na vrhu anularnog dela ($H=H_m$) u stanju minimalne fluidizacije, tj. brzina gasa na H_m je U_{mF} , Mamuro i Hattori su došli do izraza za brzinu fluida kroz anularni deo sloja /Epstain i Grace, 1984; Bridgwater, 1985/:

$$\frac{U_{aH}}{U_{mF}} = 1 - \left(1 - \frac{H}{H_m}\right)^3 \quad (2.85)$$

Međutim, prethodna jednačina važi samo za slojeve maksimalne visine H_m . Grbavčić /1975, referenca iz /Grbavčić, 1989// je proširio model Mamuro-a i Hattori-a za slojeve čija je visina manja od H_m :

$$\frac{U_a}{U_{mF}} = 1 - \left(1 - h \frac{z}{H}\right)^3, \quad h = \frac{H}{H_m} \quad (2.86)$$

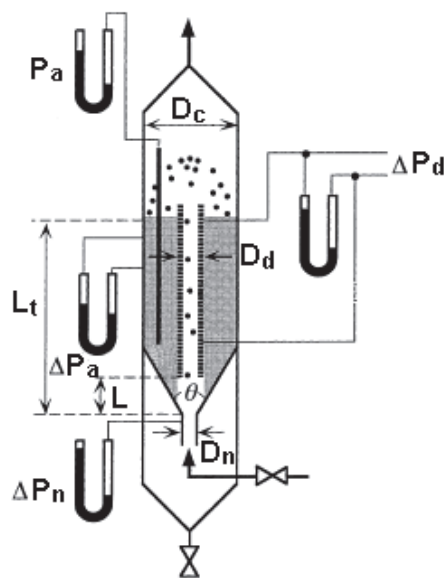
Proširenjem modela Grbavčić-a /1975, referenca iz /Grbavčić, 1989// na fontansko-fluidizovani sloj dolazi se do zavisnosti brzine fluida u anulusu od visine sloja /Hadžismajlović i dr., 1982/:

$$\frac{U_a}{U_{mF}} = 1 - \left(1 - \frac{U_{a0}}{U_{mF}}\right) \left(1 - h \frac{z}{H}\right)^3, \quad h = \frac{H}{H_m} \quad (2.87)$$

Kada nema dodatnog protoka fluida u anularni prostor sloja, tj. $U_{a0}=0$, prethodna jednačina se svodi na izraz za fontanski sloj (jednačina 2.86). Za ulaznu zonu visine L ispod cevnog umetka jednačina (2.87) prelazi u oblik:

$$\frac{U_a}{U_{mF}} = 1 - \left(1 - \frac{U_{a0}}{U_{mF}}\right) \left(1 - \frac{z}{L}\right)^3 \quad (2.88)$$

Eng i dr. /1989/ su koristili modifikovanu korelaciju Mamuro-a i Hattori-a /1968, referenca iz /Epstein i Grace, /1984//; Bridgwater, 1985//, koristeći rastojanje L umesto H_m . Yang i Kearins /1983/ i Berruti i dr. /1988/ su ukazali da na cirkulaciju čestica znatno utiče konfiguracija ulazne zone, tj. različiti projektni i operativni parametri utiču na različitu raspodelu gasa između anularnog prostora i fontane. Mathew i dr. /1988/ su takođe zaključili da se ulazna zona ponaša kao klasičan fontanski sloj. Cecen /2003/ je vršila ispitivanja raspodele fluida u ulaznoj zoni fontansko-fluidizovanog sloja sa cevnom umetkom metodom injektovanja rastvora NaCl određene koncentracije, ili u tok fluida za fontanovanje ili u anularni tok fluida, dok je koncentracija NaCl u izlaznim tokovima registrovana konduktometrijskom metodom. Na osnovu eksperimentalnih rezultata je zapazila da kad postoji nezavisan anularni tok fluida uvek je prisutno i strujanje fluida od anularnog dela ka fontani u ulaznoj zoni ispod cevnog umetka. U slučaju fontanskog sloja postoji samo "by-pass" dela fluida od fontane ka anularnom delu. Prema uslovima Cecen-inih /2003/



Slika 2.16. Šema padova pritiska u fontanskom sloju sa cevnom umetkom

eksperimenata ($U_a < U_{mf}$ i $H < L_c$) izgleda da je moguć unakrsni tok fluida, tj. od anularnog dela sloja ka fontani i od fontane ka anularnom delu), tako da su neto protoci fluida iz obe zone sloja i profili pritiska rezultat razmene fluida u ulaznoj zoni. Na osnovu Cecen-inih /2003/ rezultata se može zaključiti da interakcije u ulaznoj zoni mogu biti kompleksnije u odnosu na uobičajene pretpostavke da “by-pass” fluida postoji samo u smeru ka anularnom delu sloja.

2.3.4. Pad pritiska

Za klasičan fontanski i fontansko-fluidizovani sloj je karakterističan visok pad pritiska fluida na mlaznici. Korišćenjem cevnog umetka ovaj pad pritiska se smanjuje, s obzirom da je u ovakvom sistemu potreban manji protok fluida za ostvarivanje stabilnog rada, smanjuje se i količina fluida koja prolazi kroz mlaznicu. Protok fluida kroz mlaznicu, potreban za ostvarenje minimalne cirkulacije čestica, se može smanjiti povećanjem nezavisnog protoka fluida koji se uvodi u anularni deo sloja. Na slici 2.16 su šematski prikazane pozicije za merenje odgovarajućih padova pritisaka u sistemima sa cevnom umetkom.

2.3.4.1. Pad pritiska u anularnom delu sloja

Pad pritiska u anularnom delu po visini sloja se može dobiti uz pretpostavku da se strujanje fluida može opisati Darcy-evim zakonom (prema Mamuro-u i Hattori-u /1968/, referenca iz /Rovero i dr., 1983; Bridgwater, 1985; Grbavčić, 1989//):

$$-\frac{dP_a}{dz} = KU_a \quad (2.89)$$

Pad pritiska u anularnom delu po visini sloja se može prikazati jednačinom koja se zasniva na Ergun-ovoj /1952/ jednačini (proširenje modela Mamuro-a i Hattori-a /1968/) /Epstein i Grace, 1984; Bridgwater, 1985/:

$$-\frac{dP_a}{dz} = K_1 U_a + K_2 U_a^2 \quad (2.90)$$

$$K_1 = 150 \frac{\mu(1-\varepsilon_{mf})^2}{(\psi d_p)^2 \varepsilon_{mf}^3}; \quad K_2 = 1.75 \frac{\rho_f(1-\varepsilon_{mf})}{(\psi d_p) \varepsilon_{mf}^3}$$

Paterson i dr. /1992/ su naveli da su neki autori doveli u pitanje pouzdanost koeficijenata 150 i 1.75 iz Ergun-ove /1952/ jednačine, s obzirom da oni zavise od oblika, raspodele veličina i hrapavosti površine čestica. Ovi koeficijenti se uglavnom primenjuju za čestice glatke površine, međutim, i tada može doći do odstupanja usled načina pakovanja čestica u sloju. Paterson i dr. /1992/ su određivali razlike između statičnog pakovanog sloja i pakovanog sloja koji se kreće na niže suprotno-strujno u odnosu na kretanje fluida na osnovu merenja pada pritiska kroz sloj. Za staklene sfere prečnika 3 mm dobili su slaganje eksperimentalnih rezultata sa Ergun-ovom /1952/ jednačinom sa koeficijentima 189 i 1.59.

Njihov generalni zaključak je da je srednja poroznost pokretnog pakovanog sloja, pri istim uslovima, veća od poroznosti nepokretnog gusto pakovanog sloja.

Autori uglavnom daju empirijske zavisnosti pada pritiska u anularnom prostoru od brzine fluida (U_a), koje su Ergun-ovog ili Darcy-evog tipa /napr., Claflin i Fane, 1983; Cecen, 2003/.

2.3.4.2. Pad pritiska u cevnom umetku

Kao osnova za postavljanje modela za pad pritiska u cevnom umetku koristi se pristup za predviđanje pada pritiska u vertikalnom retkom pneumatskom transportu. Ukupni pad pritiska se sastoji iz tri komponente: pada pritiska usled ubrzanja fluida i čestica (ΔP_u), pada pritiska usled delovanja sile teže (ΔP_g) i pada pritiska usled trenja gasa i čestica o zid cevnog umetka (ΔP_w):

$$\Delta P_d = \Delta P_u + \Delta P_g + \Delta P_w \quad (2.91)$$

Prema Yang-u /1978/ ove komponente se mogu predstaviti sledećim izrazima:

pad pritiska usled ubrzanja od $z=0$ do $z=L_t^*$,

$$dP_u = \int_0^{L_t^*} \rho_p (1-\varepsilon) g dL_t^* + \int_0^{L_t^*} \frac{2f_f \rho_f u^2}{D_d} dL_t^* + \int_0^{L_t^*} \frac{2f_p \rho_p (1-\varepsilon) v^2}{2D_d} dL_t^* + \left[\rho_p (1-\varepsilon) v^2 \right]_{na L_t^*} \quad (2.92)$$

pad pritiska usled delovanja sile teže van zone ubrzanja od $z=L_t^*$ do $z=L_t$,

$$\Delta P_g = \rho_p (1-\varepsilon) g (L_t - L_t^*) \quad (2.93)$$

i pad pritiska usled trenja smeše sastoji se iz pada pritiska usled trenja fluid-zid cevi i čestice-zid cevi,

$$\begin{aligned} \Delta P_w &= \Delta P_f + \Delta P_p = \\ &= F_w = F_f + F_p = \frac{4\tau_w}{D_d} \end{aligned} \quad (2.57)$$

Padovi pritiska usled trenja fluid-zid cevi i čestice-zid cevi se predstavljaju jednačinama Fanning-ovog tipa (jednačine 2.58 i 2.59).

Uobičajen pristup većine autora /napr. Capes i Nakamura, 1973; Yang, 1978; Grbavčić, 1989; Littman i dr., 1993, Garić i dr., 1995/ je da se koeficijent trenja fluid-zid cevi, definisan jednačinom (258), može prikazati korelacijom za stacionarno turbulentno strujanje fluida bez prisustva čestica kroz glatke cevi /Bird et al., 1960/ (jednačina 2.60).

Koeficijent trenja čestice-zid transportne cevi se može odrediti na osnovu brojnih literaturnih korelacija za režim retkog toka (reference i neke od korelacija su navedene u Poglavlju 2.2).

Na osnovu analize eksperimentalnih podataka Grbavčić /1989/ je ustanovio da pad pritiska na mlaznici praktično ne zavisi od visine sloja i da dominantan uticaj imaju zbivanja u cevnom umetku. Takođe je zaključio da su padovi pritiska u anularnoj zoni i u cevnom umetku približno jednaki.

2.3.5. Hidrodinamički modeli

Jedan od važnih problema pri analizi fontanskog i fontansko-fluidizovanog sloja sa cevnom umetkom je korelisanje ponašanja i osobina ovih modifikovanih slojeva u odnosu na klasični fontanski i fontansko-fluidizovani sloj. Polazna osnova za prevazilaženje ovog problema su zajedničke karakteristike klasičnih i modifikovanih slojeva. Praćenjem uticaja protoka fluida kroz mlaznicu na pad pritiska u sloju uočeno je da je pad pritiska pri formiranju fontane u ulaznoj zoni visine L ispod cevnog umetka jednak padu pritiska u cevnom umetku kroz koji se ostvaruje pneumatski transport. S obzirom da raspodela brzina fluida u anularnom prostoru ispod i iznad cevnog umetka ostaje nepromenjena proizilazi da je moguće koristiti teorije uspostavljene za klasični fontanski i fontansko-fluidizovani sloj. Ulazna zona je neophodna da se uključi u model (analizu) da bi se proračunala fizička razmena gasa i čestica između anulusa i fontane ispod cevnog umetka.

Većina autora dvofazni tok gas-čestice u cevnom umetku razmatra kao redak pneumatski transport, a kretanje čestica na niže kroz anularni deo kao kretanje pakovanog sloja /Claflin, 1982; Yang i Keairns, 1983; Claflin i Fane 1984; Grbavčić i dr., 1992; Ishikura i dr., 2003/.

Claflin i Fane /1983, 1984/ su postavili numerički model za predviđanje hidrodinamičkih parametara fontanskog sloja sa cevnom umetkom, tj. za predviđanje ukupnog pada pritiska, vreme zadržavanja čestica i količine fluida koja penetrira u anularni deo sloja. Polazeći od bilansa sila za čestice:

$$\Delta P_u = \Delta P_D + \Delta P_b - \Delta P_g - \Delta P_w \quad (2.94)$$

dobili su zavisnost promene brzine čestica duž cevnog umetka:

$$v \frac{dv}{dz} = \frac{3 C_{Ds0} \rho_f (u-v)^2}{4 \varepsilon^{4.7} \rho_p d_p} + \frac{(\rho_f - \rho_p)g}{\rho_p} - \frac{f_p v^2}{2D_d} \quad (2.95)$$

Na osnovu bilansa sila za fluid u cevnom umetku (jednačina 2.91) dobija se promena pritiska za diferencijalni element visine dz :

$$\frac{dp_d}{dz} = (1-\varepsilon)\rho_p v \frac{dv}{dz} + (\rho_p(1-\varepsilon) + \rho_f\varepsilon)g + \frac{2\rho_f f_f u^2}{D_d} + \frac{\rho_p f_p (1-\varepsilon)v^2}{2D_d} \quad (2.96)$$

Uz pretpostavku da je $-dp_d/dz \approx -dp_a/dz$, određuje se brzina fluida kroz anularni deo sloja (U_a) na osnovu empirijske korelacije $-dp_a/dz - U_a$:

$$\frac{dp_a}{dz} = \frac{dp_d}{dz} = 1.75 U_a^{1.38} \quad (2.97)$$

Poroznost u cevnom umetku je:

$$\varepsilon = 1 - \left(\frac{G_p}{\rho_p A_d v} \right) \quad (2.98)$$

Konstatovali su izuzetnu osetljivost modela na poroznost anularnog dela sloja i koeficijent trenja čestice-zid cevnog umetka.

Matthew i dr. /1988/ su postavili matematički model strujanja fluida u anularnom delu sloja, za koje ne važi Darcy-ev zakon, baziran na vektorskom obliku Ergun-ove jednačine. Jednačina kontinuiteta za fluid u anularnom delu sloja u vektorskom obliku je:

$$\nabla \vec{U} = 0 \quad (2.99)$$

Promena pritiska preko vektorskog oblika Ergun-ove jednačine je:

$$\nabla p = \vec{U} \left(K_1 + K_2 |\vec{U}| \right) \quad (2.100)$$

Divergiranjem jednačine (2.100) i kombinovanjem sa jednačinom (2.99) dobija se parcijalna diferencijalna jednačina drugog reda po pritisku:

$$\nabla^2 p = -K_2 \left(\vec{U} \cdot \nabla |\vec{U}| \right) \quad (2.101)$$

Matthew i dr. /1988/ su dobili dobro slaganje njihovih eksperimentalnih podataka sa predloženim modelom. Zaključili su da se ulazna zona može interpretirati kao klasičan fontanski sloj i da se granični uslovi Morgan-a i Littman-a /1980, referenca iz /Matthew i dr., 1988/ mogu upotrebiti za predviđanje promena pritiska duž granice fontana-anulus unutar ulazne zone.

Grbavčić i dr. /1992/ su predložili model za predviđanje brzine cirkulacije čestica u fontansko-fluidizovanom sloju sa cevnom umetkom korišćenjem modelskih jednačina vertikalnog dvofaznog toka van zone ubrzavanja čestica, tj. jednačina (2.66), (2.56)÷(2.60), (2.24)÷(2.28), (2.69)÷(2.73), prikazanih u Poglavlju 2.2. Pored navedenih jednačina, brzina fluida kroz anularni deo sloja (U_a) se izračunava iz empirijske zavisnosti $-dP_a/dz$ od U_a dobijene na osnovu eksperimentalnih podataka strujanja fluida u pakovanom sloju. Brzina fluida kroz cevni umetak se određuje na osnovu masenog bilansa:

$$U A_d = V_0 - U_a A_a \quad (2.102)$$

Za određivanje koeficijenta trenja fluid-zid cevnog umetka koristi se Blasius-ova korelacija za strujanje fluida kroz glatke cevi (jednačina 2.60), a za određivanje koeficijenta trenja čestice-zid koristi se empirijska korelacija, dobijena u njihovim prethodnim ispitivanjima:

$$f_p = 0.0311 g D_d / v^2 \quad (2.103)$$

Model daje vrednosti brzine čestica i poroznosti u cevnom umetku, na osnovu kojih se izračunava ukupna cirkulacija čestica. Model je u vrlo dobroj saglasnosti sa eksperimentalnim podacima.

Freitas i Freire /2001b/ su postavili model za predviđanje brzina gasa i čestica, statički pritisak i poroznost duž fontane u ulaznoj zoni i duž cevnog umetka pomoću sledećih diferencijalnih jednačina (*oznake koje se u listi simbola odnose samo na cevni umetak, ovde važe za celu fontanu i u ulaznoj zoni i u cevnom umetku*):

$$\frac{dU}{dz} = -U \left[\frac{d\varepsilon/dz}{\varepsilon} + \frac{d\rho_f/dz}{\rho_f} - \frac{dG_d/dz}{G_d} \right] \quad (2.104)$$

$$\frac{dc_s}{dz} = \frac{c_s(z=0) - c_s}{G_p} \frac{dG_p}{dz} + \frac{g}{c_s} \left[\frac{\rho_f}{\rho_p} - 1 \right] + \frac{3}{4} \frac{C_D \rho_f (U - c_s)^2}{d_p \rho_p c_s} - \frac{dP_d}{\rho_p c_s dz} - \frac{2c_s}{D_d} f_p \quad (2.105)$$

$$\frac{dP_d}{dz} = \frac{U}{\varepsilon A_d} \frac{dG_d}{dz} - \rho_f U \frac{dU}{dz} - \frac{3 C_D (1-\varepsilon) \rho_f (U - c_s)^2}{4 d_p \varepsilon} - \rho_f g + \frac{(1-\varepsilon)g(\rho_f - \rho_p)}{\varepsilon} - \frac{2\rho_f U^2}{D_d} f_f \quad (2.106)$$

$$\frac{d\varepsilon}{dz} = -(1-\varepsilon) \left[\frac{dc_s/dz}{c_s} - \frac{dG_p/dz}{G_p} \right] \quad (2.107)$$

U anularnom delu sloja maseni bilans za fluid je:

$$G_a = U \rho_f \varepsilon A_a$$

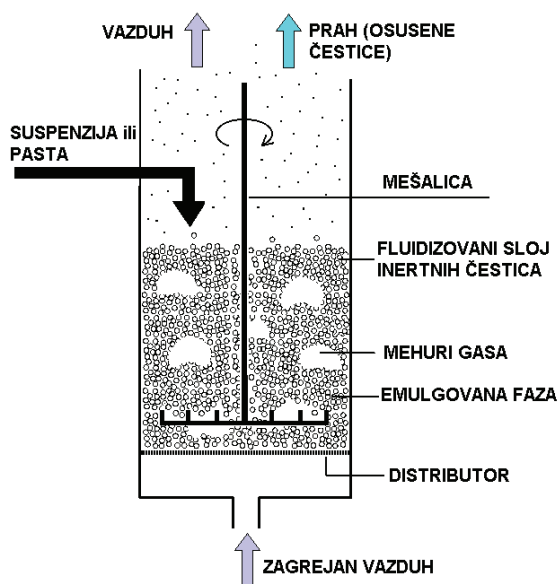
$$\frac{dG_d}{dz} = -\frac{dG_a}{dz} \quad (2.108)$$

Raspodela protoka gasa i maseni protok čestica su predstavljeni empirijskim jednačinama. Freitas i Freire /2002/ su ispitivali osetljivost prethodno prikazanog hidrodinamičkog modela na važne hidrodinamičke parametre: brzinu gasa, brzinu čestica, poroznost duž fontane u ulaznoj zoni i duž cevnog umetka, količinu gasa koja penetrira u anularni deo sloja, koeficijent trenja gas-čestice i brzinu cirkulacije čestica. Zaključili su da osetljivost modela zavisi od ulaznog protoka gasa i visine sloja. Pri brzinama gasa bliskim minimalnim vrednostima za fontanovanje osetljivost modela je visoka u odnosu na sve ispitivane parametre. Generalno, U , c_s i ε su umereno do veoma osetljivi na raspodelu gasa u sloju, dok sa druge strane, ovi parametri pokazuju malu osetljivost na koeficijent trenja gas-čestice i brzinu cirkulacije čestica. Na pouzdanost predviđanja parametara modela veliki uticaj ima izbor korelacija za koeficijente trenja gas-zid i čestice-zid.

3. SUŠENJE U FLUIDIZOVANOM SLOJU INERTNIH ČESTICA

3.1. MEHANIZAM SUŠENJA U FLUIDIZOVANOM SLOJU INERTNIH ČESTICA

Ako se fluidizacija pogodnih (inertnih) čestica vrši zagrejanim vazduhom, a u sloj se uvodi suspenzija doći će do isparavanja vlage, odnosno do sušenja suspenzije. Suspenzija se može uvoditi u sloj inertnih čestica bilo raspršivanjem na gornju površinu sloja, bilo jednostavno ukapavanjem u sloj (slika 3.1).



Slika 3.1. Šematski prikaz sušenja u fluidizovanom sloju inertnih čestica

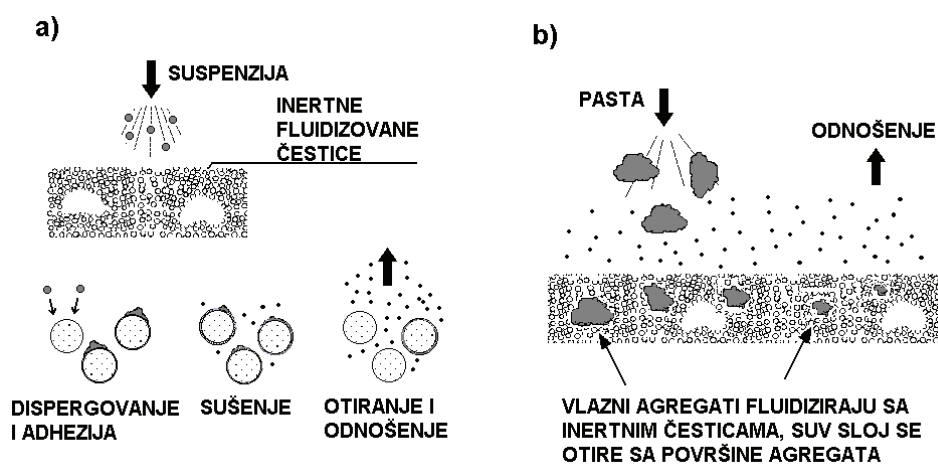
Mehanizam sušenja zavisi od gustine i viskoziteta suspenzije koja se dozira. Ako je u pitanju tečljiva suspenzija, u fluidizovanom sloju inertnih čestica teku simultano tri procesa, kako je šematski prikazano na slici 3.2-a. U prvoj fazi suspenzija se disperguje i adhezionim silama vezuje za površinu dela inertnih čestica. U drugoj fazi naneti film suspenzije se suši na inertnoj čestici, a potom u trećoj fazi dolazi do otiranja osušenog filma i odnošenja praha sušenog materijala iz sloja. Sva tri procesa teku istovremeno u različitim zonama sloja. Ako se u sloj dozira pasta, tj. suspenzija sa malim sadržajem tečnosti, tada je mehanizam sušenja nešto drugačiji (slika 3.2-b). Vlažni komadi (agregati) paste fluidizuju zajedno sa inertnim česticama. Kako se površinski sloj agregata paste suši, čestice praha se otiru, a veličina agregata se postepeno smanjuje do njihovog potpunog nestanka.

Kada se postupak sušenja suspenzija odvija nanošenjem na inertne čestice u fluidizovanom sloju, poželjno je da su inertne čestice što približnijeg oblika, veoma uskog opsega prečnika i istih gustina. U praksi se za sušenje suspenzija najčešće koriste monodisperzni slojevi relativno krupnih sferičnih inertnih čestica prečnika od 1 do 3 mm /Kudra i Mujumdar, 1995; 2002/. U ispitivanim sistemima za sušenje suspenzija u fluidizovanom sloju iz ovog rada su kao inertne čestice korišćene monodisperzne staklene

sfere. Ovakav izbor inertnih čestica obezbeđje njihovu ravnomernu fluidizaciju, njihovo dobro mešanje, poželjnu kinetiku procesa i ravnomerno sušenje nanetog sloja suspenzije i, ujednačenost sadržaja vlage u sušenom materijalu.

Uloga inertnih staklenih sfera je dvojaka:

- a) Budući da su relativno teške za njihovu fluidizaciju potrebna je relativno velika brzina vazduha, što znači da se u sistem može uneti velika masa vazduha (koji je nosioc toplote), najmanje 100 puta više nego kada bi se fluidizovao samo vlažan prah produkta. Velika brzina vazduha obezbeđuje veoma turbulentne uslove, a sa tim i visoke vrednosti koeficijenta prenosa toplote i mase. Međutim, visina sloja ne sme biti prevelika, da bi se pad pritiska održao u razumnim granicama;
- b) Prisustvo inertnih sfera razvija površinu za razmenu toplote i mase.



Slika 3.2. Mehanizam sušenja u fluidizovanom sloju inertnih čestica
a) tečljiva suspenzija, b) pasta

3.2. OPIS EKSPERIMENTALNIH SISTEMA

Eksperimentalna ispitivanja termičkog sušenja suspenzija su obavljena na dva laboratorijska uređaja. Preliminarna istraživanja su obavljena na laboratorijskom uređaju nominalnog kapaciteta isparavanja $1.5 \text{ dm}^3\text{H}_2\text{O}/\text{h}$ (prečnik kolone $D_c=72 \text{ mm}$) u cilju postavljanja podloga za projektovanje i izradu uvećanog laboratorijskog (poluindustrijskog) postrojenja izabranog kapaciteta. Druga serija ogleđa obavljena je na uvećanom laboratorijskom (poluindustrijskom) demonstracionom postrojenju nominalnog kapaciteta isparavanja $15\text{-}20 \text{ dm}^3\text{H}_2\text{O}/\text{h}$ (prečnik kolone $D_c=215 \text{ mm}$) u cilju dobijanja što pouzdanijih podataka za uvećanje razmera procesa i postrojenja.

U obe serije ogleđa prvo su određeni fluido-dinamički parametri fluidizovanog sloja inertnih čestica, zatim kapacitet isparavanja vode, a potom se pristupilo sušenju suspenzija sa različitim sadržajem vode. Obavljeni su ogleđi sušenja od lako tečljivih suspenzija, sa visokim sadržajem vode, do sušenja polusuvih pasta, sa niskim sadržajem vode.

Najveći broj ogleđa obavljen je pri sušenju Cineb fungicida [cink(II)-etilen-bis-(ditiokarbamat), polimer], bakar(II)-hidroksida i kalcijum(II)-karbonata. Obavljene su i kvalitativne probe sušenja suspenzija različitih fungicida i pesticida (Ziram [cink(II)-bis-(dimetil-ditiokarbamat)], Propineb [cink(II)-propilen-bis-(ditiokarbamat), polimer], Mangozeb [mangan(II)-etilen-bis-(ditiokarbamat), polimerni kompleks sa cink(II) soli], bakar(II)-oksihlorid, bakar(II)-oksi-sulfat, bakar(II)-sulfat, Bordovska čorba [smeša kalcijum(II)-hidroksida i bakar(II)-tetra-okso-sulfata] i Tiram [bis-(dimetil-tiokarbamil)-disulfid], suspenzija neorganskih jedinjenja (kalcijum(II)-sulfat, kobalt(II)-karbonat, elektrolitički bakar, natrijum-hlorid), suspenzije kompleksnog jedinjenja organo-bentonita [klasa hidratiranih aluminijum-silikata], suspenzije nekoliko organskih i bioloških materijala (kalcijum(II)-stearat, vinska kiselina, pivski kvasac, sojino mleko, smeše sojinog mleka sa različitim biokulturama, lipozomi, paradajz kaša, sirova jaja, skrob). U tabeli P1.1 iz Priloga 1 su prikazani trivijalni nazivi, CAS oznake, IUPAC nomenklatura, hemijske i strukturne formule, hemijska klasa jedinjenja i neke osnovne karakteristike većine sušenih materijala.

U većini eksperimenata korišćen je materijal (suspenzija, odnosno pasta) direktno iz odgovarajuće tehnološke faze u procesu proizvodnje odgovarajućih preparata pretežno iz HI ŽUPA, Kruševac (Cineb, bakar(II)-hidroksid, Ziram, Propineb, Mangozeb, Bordovska čorba i Tiram). Deo preparata obezbeđen je iz HI ZORKA-Zaštita bilja, Šabac (bakar(II)-oksihlorid i bakar(II)-oksi-sulfat), HIP AZOTARA, Pančevo (kalcijum(II)-karbonat), RTB BOR-Topionica i rafinacija, Bor (elektrolitički bakar) i Instituta za tehnologiju nuklearnih i drugih mineralnih sirovina (ITNMS), Beograd (kalcijum(II)-sulfat, kobalt(II)-karbonat i organo-bentonit). Manji deo ogleđa obavljen je sa suspenzijama koje su formirane ponovnim dispergovanjem prethodno osušenog praškastog proizvoda u vodi.

Obavljeno je ukupno 327 ogleđa, od čega 28 u prvoj seriji (u koloni prečnika 72 mm) i 299 u drugoj seriji (u koloni prečnika 215 mm). Od ukupno 327 ogleđa, 130 se odnosilo na isparavanje vode (tj. sušenje "idealne suspenzije"), a 197 na sušenje različitih suspenzija.

Navedena ispitivanja su obuhvatila definisanje suspenzija koje se mogu sušiti na predloženi način, ocenu kvaliteta produkta, definisanje optimalnih parametara (ulazna temperatura, temperatura sloja, brzina vazduha) za svaku suspenziju pojedinačno, uticaj protoka vazduha na karakteristike procesa, uticaj veličine inertnih čestica na karakteristike procesa, uticaj predgrevanja suspenzije na karakteristike procesa, stepen otiranja inertnih čestica i uticaj mehaničke agitacije sloja.

3.2.1. Laboratorijski sistem sa fluidizovanim slojem inertnih čestica, kapaciteta isparavanja $1.5 \text{ dm}^3_{\text{H}_2\text{O}}/\text{h}$

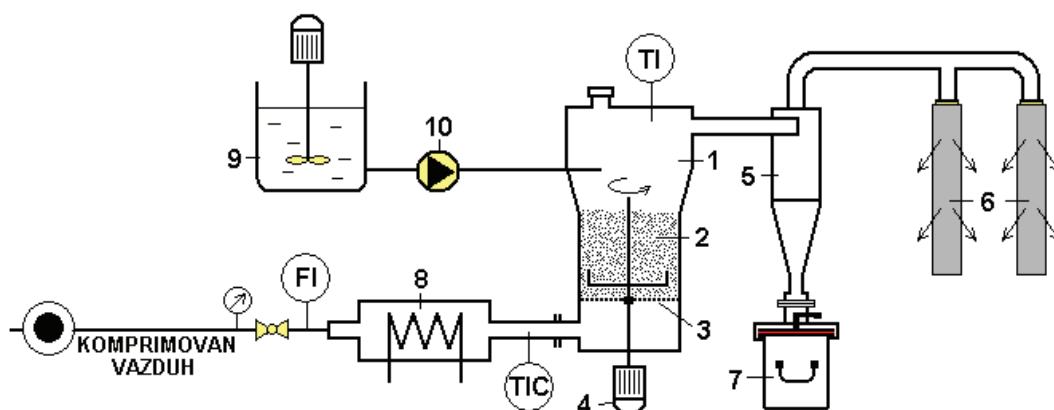
Laboratorijski uređaj nominalnog kapaciteta isparavanja $1.5 \text{ dm}^3_{\text{H}_2\text{O}}/\text{h}$ (slika 3.3) sastoji se od staklene fluidizacione kolone prečnika 72 mm u donjem delu i prečnika 100 mm u gornjem delu, ukupne visine 300 mm. Kolona je snabdevena mehaničkom mešalicom čija je uloga razbijanje eventualno nastalih agregata vlažnih čestica, kao i kontrola veličine mehura na taj način što se mehaničkim “sečenjem” sprečava porast veličine mehura po visini sloja. Sistem je snabdeven standardnim ciklonom $\phi 40 \times 100$ mm (centrifugalnim separatorom) za izdvajanje osušenih čestica produkta, rezervoarom za prihvatanje praškastog produkta i cilindričnim filter vrećama dimenzija $\phi 150 \times 800$ mm. Fluidizaciona kolona se snabdeva vazduhom iz kompresora, čija se temperatura održava na željenoj vrednosti na ulazu u sloj inertnih čestica pomoću električnog predgrejača i sistema za kontrolu temperature (TIC). Protok vazduha se meri rotametrom. Suspenzija se priprema u rezervoaru i održava u homogenom stanju pomoću mešalice. Doziranje suspenzije u sloj inertnih čestica se vrši peristaltičkom pumpom sa promenljivim brojem obrtaja koja je snabdevena elastičnim silikonskim crevom prečnika 6 mm. Suspenzija je ukapavana u sredinu sloja inertnih čestica na 200 mm od dna kolone. Merenje protoka suspenzije vršeno je na taj način što je rezervoar, koji je elastičnim crevom povezan sa peristaltičkom pumpom, bio postavljen na vagu nosivosti do 5 kg. Protok suspenzije je određivan praćenjem promene mase rezervoara sa vremenom. Za svaku formiranu suspenziju određivan je sadržaj vode i gustina suspenzije. U ogleđima u kojima je isparavana tečna faza vode, voda (“idealna suspenzija”) je dozirana pomoću kalibrisane laboratorijske klipne pumpe sa promenljivim hodom klipa. Fluidizovani sloj u koloni je formiran od inertnih čestica - staklenih sfera srednjeg prečnika 0.835 mm (polidisperzna frakcija veoma uskog opsega prečnika čestica koja se koristi u kugličnim mlinovima).

Temperature su merene digitalnim meračima sa Ni-CrNi termoparovima. Treba napomenuti da nije postojala mogućnost praćenja relativne vlažnosti vazduha. Vrednost relativne vlažnosti ulaznog vazduha je pretpostavljena, dok vrednost relativne vlažnosti vazduha na izlazu iz sušnice proizilazi iz odgovarajućih proračuna.

Tokom sušenja suspenzija u fluidizovanom sloju inertnih čestica usled učestalih sudara i trenja postoji mogućnost pojave statičkog naelektrisanja sitnih čestica sušenog materijala. Stoga je ceo laboratorijski sistem dobro uzemljen u cilju prevazilaženja elektrostatičkih efekata,

tj. obezbeđenja kontrolisanog električnog pražnjenja čestica sušenog materijala. Ostale karakteristike eksperimentalnog sistema navedene su u tabeli 3.1.

U laboratorijskom sistemu vršeni su ogledi sa doziranjem vode (“idealna suspenzija”) i ispitivan je proces sušenja suspenzije Cineba (hemijska klasa: tiokarbamati, tabela P1.1 u Prilogu 1). U ogledima u kojima je dozirana voda varirani su protok vazduha, ulazna temperatura vazduha i protok vode. U ogledima u kojima je sušena suspenzija varirani su protok vazduha, ulazna temperatura vazduha i sadržaj vode u suspenziji. U većini ogleda određivan je sadržaj vlage i aktivne materije u dobijenom prahu, kao i granulometrijski sastav praha.



Slika 3.3. Šematski prikaz laboratorijskog postrojenja za sušenje suspenzija

1 - fluidizaciona kolona, 2 - inertne čestice, 3 - distributivna ploča (i nosač sloja), 4 - mešalica, 5 - ciklon, 6 - filter vreće, 7 - prihvatna posuda za suv prah, 8 - električni grejač, 9 - rezervoar suspenzije sa mešalicom, 10 - dozir pumpa, FI - merac protoka vazduha, TI - indikacija temperature, TIC - indikacija i kontrola temperature

Tabela 3.1. Karakteristike fluidizacione kolone ($D_c=72$ mm) i sloja inertnih čestica

Parametar	Simbol	Laboratorijski uređaj
Prečnik kolone (mm)	D_c	72
Prečnik inertnih čestica (mm)	d_p	0.835
Gustina inertih čestica (kg/m^3)	ρ_p	2640
Statička visina sloja (m)	H_0	0.06
Masa sloja (kg)	M_{sl}	0.85
Masa jedne inertne čestice (mg)	m_p	0.849
Broj čestica ($\times 10^6$) (kom.)	N	0.448
Ukupna površ. inertnih čestica (m^2)	A_p	1.018
Min. brzina fluidizacije (20°C) (m/s)	* U_{mF}	0.537
Brzina odnošenja čestica (20°C) (m/s)	** U_t	7.52
Pad pritiska u sloju (Pa)	ΔP	901

*određeno iz Ergun-ove /1952/ jednačine

**određeno prema Kunii-u i Levenspiel-u /1969/

Potrebno je napomenuti da su preliminarna ispitivanja izvršena na eksperimentalnom sistemu koji nije sasvim adekvatan u pogledu stabilnosti protoka i kontrole ulazne temperature vazduha. Takođe, moguće je da u svim ogledima nisu do kraja bili uspostavljeni stacionarni uslovi. I pored toga, posmatrano u celini, kvalitet preliminarnih podataka je zadovoljavajući i podaci su iskorišćeni za analizu procesa.

3.2.2. Uvećani laboratorijski (poluindustrijski) sistem sa fluidizovanim slojem inertnih čestica, kapaciteta isparavanja 15-20 dm³H₂O/h

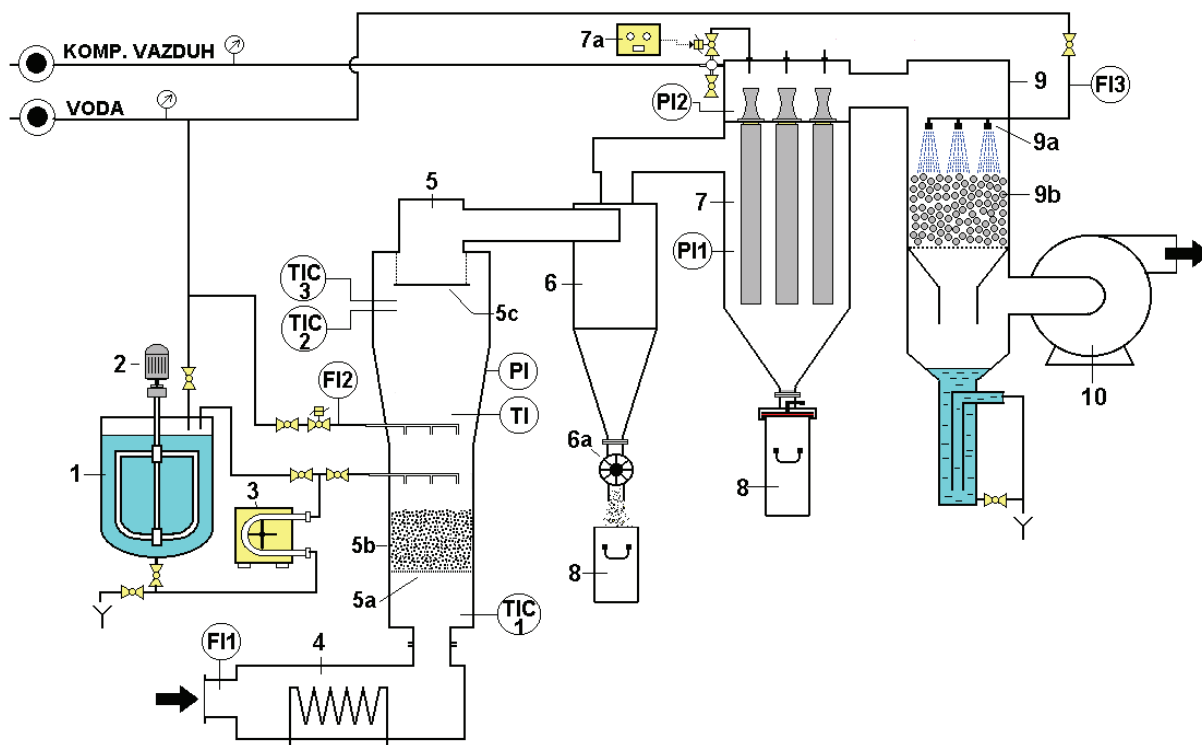
U cilju dobijanja što pouzdanijih podataka za uvećanje razmera procesa i postrojenja za sušenje, izgrađeno je poluindustrijsko postrojenje, koje bi omogućilo dobijanje realnijih podataka u odnosu na laboratorijski sistem.

Poluindustrijski uređaj za sušenje suspenzija u fluidizovanom sloju inertnih staklenih sfera je šematski prikazan na slici 3.4 i sastoji se od fluidizacione kolone (komore za sušenje), koja na dnu ima raspodeljivač vazduha, preko koga je postavljena mreža od nerđajućeg čelika nominalne veličine okaca od 0.2 mm. Vazduh iz ventilatora se zagreva pomoću električnog predgrejača koji je spregnut sa regulatorom temperature (TIC1). Suspenzija se iz rezervoara, koji je snabdeven mešalicom, pomoću peristaltičke pumpe direktno dozira u fluidizovani sloj na 100 mm iznad raspodeljivača vazduha. U nekoliko ogleda, kada je vlažni materijal bio u obliku guste paste, doziranje je izvođeno pužnim transporterom. U ovim ogledima fluidizaciona kolona je bila snabdevena mehaničkom mešalicom ($\approx 30 \text{ min}^{-1}$) radi sprečavanja stvaranja većih vlažnih agregata. Sistem za doziranje je spregnut sa regulatorom temperature (TIC2) postavljenim na 0.7 m od dna kolone, čime je omogućeno održavanje zadate izlazne temperature vazduha (T_{ge}). Izlazna temperatura gasa iz kolone je usvojena i kao temperatura "sušenja". Regulator temperature (TIC3), postavljen na istoj poziciji kao i TIC2, setovan je na vrednost koja je za 20°C viša od zadate temperature sušenja i uloga TIC3 je da doziranjem tečne faze vode u sistem (zaštitni krug) spreči pregrevanje sloja usled eventualnih poremećaja u radu sistema za doziranje. Izlazna temperatura gasa iz kolone je usvojena i kao temperatura "sušenja".

Tokom izvođenja procesa vazduh iznosi prah osušenog produkta iz fluidizovanog sloja inertnih čestica. Separacija osušenog produkta iz iskorišćenog vazduha se vrši u tri uzastopna uređaja: ciklonu, vrećastom filtru i skruberu. Standardni ciklon sa tangencijalnim uvođenjem vazduha (centrifugalni separator) prečnika $\phi 200 \text{ mm}$ u cilindričnom delu i vrećasti filter sa 5 cilindričnih filter vreća ukupne površine 3.46 m² su procesni uređaji, tj. služe za izdvajanje korisnog produkta. Pre ispuštanja u atmosferu izlazni vazduh prolazi kroz skruber sa inertnim punjenjem (plastični rašigovi prstenovi). Srednje efikasni skruber, niskog pada pritiska, je prvenstveno u ekološkoj funkciji jer pored uklanjanja najsitnijih čestica osušenog materijala dolazi i delimično do apsorpcije gasova (mirisa) u tečnosti skruberu (vodi).

Iz šematskog prikaza na slici 3.4, uočava se da je ventilator postavljen na kraju procesne linije tako da ceo sistem radi pod vakuumom u odnosu na ambijetalni pritisak. Na ovaj način je sprečeno isticanje i vazduha i osušenog praškastog produkta iz postrojenja za sušenje, što doprinosi efikasnosti izvođenja procesa i ekološkoj zaštiti radnog okruženja.

Protok vazduha se meri pomoću prigušne ploče, a temperature ispred sloja, u sloju i iza sloja se mere digitalnim meračima temperature. Tokom eksperimenata su ulazne i izlazne temperature kontinualno registrovane pomoću računarskog sistema za automatsko prikupljanje i obradu podataka (akvizicioni sistem). Kao u laboratorijskom sistemu i u ovom sistemu nije postojala mogućnost praćenja relativne vlažnosti vazduha. Vrednost relativne vlažnosti ulaznog vazduha je pretpostavljena, dok vrednost relativne vlažnosti vazduha na izlazu iz sušnice proizilazi iz odgovarajućih proračuna. Takođe je i ovaj sistem dobro uzemljen u cilju prevazilaženja elektrostatičkih efekata, tj. obezbeđenja kontrolisanog električnog pražnjenja čestica sušenog materijala. Fotografija opisanog poluindustrijskog demonstracionog sistema je prikazana na slici 3.5.



Slika 3.4. Šematski prikaz uvećanog laboratorijskog (poluindustrijskog) sistema za sušenje sa fluidizovanim slojem inertnih čestica

1 - rezervoar, 2 - mešalica, 3 - pumpa, 4 - grejač vazduha, 5 - fluidizaciona kolona, 5a - distributor, 5b - inertne čestice, 5c - deflektor, 6 - ciklon, 6a - rotacioni ventil, 7 - vrećasti filter, 7a - programator vrećastog filtera, 8 - prihvatni sudovi za produkt, 9 - skruber, 9a - mlaznica, 9b - punjenje, 10 - ventilator, FI - merač protoka, PI - indikator pritiska, TI - pokretni termopar, TIC - indikacija i kontrola temperature

Zapreminski protok suspenzije (V_{sus}) je određivan na osnovu merenja promene nivoa u dozirnomo rezervoaru sa vremenom. Maseni protok suspenzije ($G_{\text{sus}} = V_{\text{sus}} \cdot \rho_{\text{sus}}$) je izračunavan korišćenjem odgovarajućih vrednosti gustine suspenzije (ρ_{sus}), koje su

eksperimentalno određivane za svaku pojedinačnu suspenziju. Pokušaji da se protok suspenzije meri elektronskim meračem zapreminskog protoka su uglavnom bili neuspešni budući da periodično dolazi do raslojavanja i taloženja suspenzije u mernoj cevi, promene otpora i promene protoka. U tim slučajevima bilo je neophodno periodično naglo povećati protok (da se izbije nastali “čep” staloženog materijala), a nakon toga protok ponovo regulisati na zadatu vrednost. Posledica ovakvog načina doziranja je da se pri ovim intervencijama u sloj ubaci previše suspenzije, tako da su ovi ogledi uglavnom okarakterisani povišenim sadržajem vlage u dobijenom prahu.



- 1 - fluidizaciona kolona
- 2 - ciklon
- 3 - vrećasti filter
- 4 - električni predgrejač vazduha (32 kW)
- 5 - komandni ormar
- 6 - sistem za doziranje paste
- 7 - kontrola i automatsko prikupljanje podataka
- 8 - indikacija procesa
- 9 - razvod fluida
- 10 - rezervoar za prihvatanje produkta

Slika 3.5. Mobilno poluindustrijsko demonstraciono postrojenje za sušenje suspenzija i pasta u fluidizovanom sloju inertnog materijala

Komora za sušenje se sastoji od vertikalne cilindrične cevi prečnika $D_c=215$ mm i visine 300 mm, na koju se nastavlja konični deo prečnika 320 mm i gornji cilindrični deo visine 300 mm. Ukupna visina komore je 1200 mm, pri čemu efektivna visina, iznad raspodeljivača vazduha, iznosi 900 mm. Za formiranje fluidizovanog sloja korišćene su tri vrste monodisperznih sferičnih inertnih čestica: staklene sfere prečnika $d_p=0.93$ mm (gustina

$\rho_p=2640 \text{ kg/m}^3$), $d_p=1.2 \text{ mm}$ (gustina $\rho_p=2640 \text{ kg/m}^3$) i $d_p=1.94 \text{ mm}$ (gustina $\rho_p=2460 \text{ kg/m}^3$). Relevantne karakteristike slojeva inertnih čestica su prikazane u tabeli 3.2. Površinska brzina vazduha (obračunata za sobnu temperaturu) je varirana od 0.96 do 2.45 m/s, temperatura ulaznog vazduha (T_{gi}) je varirana između 121°C i 430°C, temperatura izlaznog vazduha (T_{ge}) je održavana u intervalu od 43 do 128°C, dok je razlika temperatura ($T_{gi} - T_{ge}$) pri navedenim uslovima iznosila od 47 do 317°C. Sadržaj vlage u polaznom materijalu koji se suši (suspenziji) je varirao u granicama od 0.51 do 0.95 $\text{kg}_{\text{H}_2\text{O}}/\text{kg}_{\text{sus}}$.

U radu su prikazane dve serije ogleada, u prvoj seriji je dozirana čista voda, a u drugoj seriji sušene su suspenzije Cineba ($[\text{CH}_2\text{-NH-CS}_2]_2\text{-Zn}$), bakar(II)-hidroksida ($\text{Cu}[\text{OH}]_2$) i kalcijum(II)-karbonata (CaCO_3). Staklene sfere prečnika 1.94 mm su korišćene u svim oglecima, osim u nekoliko ogleada sušenja suspenzije Cineba gde su korišćene sitnije sfere. U oglecima u kojima je dozirana čista voda (“idealna suspenzija”) varirani su protok vazduha, ulazna temperatura vazduha i protok vode. U oglecima u kojima su sušene suspenzije varirani su protok vazduha, ulazna temperatura vazduha i sadržaj vode u suspenziji. U svim oglecima određivan je sadržaj vlage i aktivne materije u dobijenom prahu, a za prah Cineb fungicida određivan je i granulometrijski sastav.

U ovom eksperimentalnom sistemu su uspešno sušeni i drugi materijali: fungicidi i pesticidi (Ziram, Propineb, Mangozeb, bakar(II)-oksi-hlorid, bakar(II)-oksi-sulfat, bordovska čorba), neorganska jedinjenja (kalcijum(II)-sulfat, kobalt(II)-karbonat, elektrolitički bakar, natrijum-hlorid) i kompleksno jedinjenje organo-bentonit. Eksperimentalne probe sušenja nekoliko organskih i bioloških materijala, kao što su kalcijum(II)-stearat, vinska kiselina, pivski kvasac, sojino mleko, smeše sojinog mleka sa biokulturama, lipozomi, paradajz kaša, sirova jaja, skrob, su bile neuspešne.

Tabela 3.2. Karakteristike fluidizacije kolone ($D_c=215 \text{ mm}$) i slojeva inertnih čestica

Parametar	Simbol	Uvećani laboratorijski uređaj (poluindustrijski uređaj)					
		215		1.2		1.94	
Prečnik kolone (mm)	D_c	215					
Prečnik inertnih čestica (mm)	d_p	0.925	1.2	1.94			
Gustina inertnih čestica (kg/m^3)	ρ_p	2640	2640	2460			
Statička visina sloja (m)	H_0	0.08	0.1	0.08	0.1	0.095	0.122
Masa sloja (kg)	M_{sl}	4.53	5.75	4.45	5.75	5.3	6.79
Masa jedne inertne čestice (mg)	m_p	1.094	2.39	9.4			
Broj čestica ($\times 10^6$) (kom)	N	4.14	5.26	1.86	2.41	5.99	7.22
Ukupna površ. inertnih čestica (m^2)	A_p	11.12	14.13	8.42	10.89	6.8	8.54
Min. brzina fluidizacije (20°C) (m/s)	* U_{mf}	0.603	0.785	1.114			
Brzina odnošenja (20°C) (m/s)	** U_t	7.92	9.02	11.07			
Pad pritiska u sloju (Pa)	ΔP	1201	1501	1201	1501	1329	1707

*određeno iz Ergun-ove /1952/ jednačine

**određeno prema Kunii-u i Levenspiel-u /1969/

3.3. MODELOVANJE PROCESA U SUŠNICI SA FLUIDIZOVANIM SLOJEM INERTNIH ČESTICA

Pregledom literature je ustanovljeno da postoji veliki broj radova koji se bavi ispitivanjem kinetike sušenja različitih suspenzija na pojedinačnim inertnim česticama /napr. Konovalov i dr., 2003; Leontieva i dr., 2004/, kao i u šaržnim procesima u sušnicama sa fluidizovanim slojem inertnih čestica /napr. Lee i Kim, 1999; Heinrich i dr., 2003/. Modela za kontinualno sušenje suspenzija u fluidizovanom sloju inertnih čestica ima vrlo malo, i uglavnom se baziraju na ukupnim bilansima mase i toplote /napr. Taruna i Jindal, 2002/. Generalno, za konvektivne sisteme sušenja na inertnim česticama veći broj autora pretpostavlja formiranje tankog uniformnog filma suspenzije na površini inertnih čestica, a s obzirom da inertne čestice u sloju obezbeđuju veliku površinu kontakta, procesi prenosa toplote i mase su brzi čak i kad je povećan sadržaj vlage u agensu za sušenje (atmosferskom vazduhu), s obzirom da se ovakav vazduh, usled načina izvođenja procesa, i dalje nalazi u stanju udaljenom od stanja termodinamičke ravnoteže sa kondenzatom vlage. Stoga se smatra da nema otpora difuziji vlage i prenosu toplote kroz film suspenzije i da se sušenje odvija u periodu "kvazi-konstantne" brzine sušenja. U tom periodu temperatura površine inertnih čestica ostaje približno konstantna i bliska je temperaturi adijabatskog zasićenja vazduha (T_{wb}) a sva dovedena toplota se koristi samo na isparavanje vlage /napr. Lee i Kim, 1993, 1999; Szentmarjay i dr., 1996; Kerkhof, 2000; Leontieva, 2002; Kudra i Mujumdar, 2002; Kutsakova, 2004/. Jedna od osnovnih pretpostavki je da je u fluidizovanom sloju ostvareno idealno mešanje, što znači da su sve inertne čestice u sloju na istoj temperaturi i da je isti sadržaj vlage u filmu suspenzije na površini inertnih čestica /Lee i Kim, 1999; Kerkhof, 2000/. Iz ove pretpostavke proizilazi da procesom sušenja upravljaju samo spoljni prenos toplote i mase. Kao rezultat idealnog mešanja u sloju će biti uniformna raspodela i temperature i sadržaja vlage sušenog materijala. Ova pretpostavka se može delimično prihvatiti, s obzirom da je brzina sušenja vlažnog materijala koji se nalazi na površini inertne čestice sporija u odnosu na brzinu dispergovanja (mešanja) inertnih čestica u sloju /Trojowski i dr., 1989/. Trojowski i dr. /1989/ su na osnovu ispitivanja stepena okvašenosti staklenih čestica tečnom fazom vode zaključili da intenzitet mešanja inertnih čestica u fluidizovanom sloju nije dovoljan da se obezbedi apsolutno uniformna distribucija tečne faze po celoj zapremini sloja.

3.3.1. Bilansi prenosa toplote i mase

Teorijski se kapacitet isparavanja vlage može odrediti iz konvencionalne jednačine brzine prenosa mase:

$$W_{H_2O} = k_y A_p \Delta y_{lm} \quad (3.1)$$

ako se temperatura površine čestice može odrediti sa zadovoljavajućom tačnošću. U ovom izrazu k_y je koeficijent prenosa mase, A_p je ukupna površina inertnih čestica i Δy_{lm} je srednja

logaritamska pogonska sila. Markowski /1992/ je dobio zadovoljavajuće slaganje eksperimentalnih podataka za sušenje suspenzije životinjske krvne plazme na inertnim česticama u “režimu brzog fontanovanja u plitkom sloju”. Sledeći rad Lykov-a /1967/, Markowski je koristio rešenje Fourier-ove jednačine za nestacionarni prenos toplote za predviđanje temperature na površini inertnih čestica, ukupnog koeficijenta prenosa toplote u sloju i predložio je metodu za određivanje pogonske sile za spoljnji prenos mase. Međutim, ovaj pristup se ne može tako jednostavno proširiti na sušnicu sa fluidizovanim slojem inertnih čestica. Ovaj pristup se može primeniti samo za rastvore i suspenzije gde se pretpostavka da je film uniformno raspodeljen po celokupnoj masi inertnih čestica čini prihvatljivom. U fluidizovanom sloju je, međutim, samo deo inertnih čestica obložen filmom suspenzije. Sa druge strane, ako je vlažan materijal u vidu paste, u sloju će egzistirati i vlažni agregati. Do sada još uvek ne postoji način da se u fluidizovanom sloju inertnih čestica odredi stvarno raspoloživa kontaktna površina.

Za svrhu projektovanja i simulacije sušenja mnogo jednostavniji pristup pri modelovanju je postavljanje ukupnog bilansa toplote za ceo sloj:

$$G_v C_{pg}(T_{gi} - T_{ge}) = G_m C_{pm}(T_{ge} - T_{0A}) + G_{H_2O} [C_{pw}^L(T_{ge} - T_{0A}) + r_w] + Q_g \quad (3.2)$$

gde su G_v , G_m i G_{H_2O} - maseni protoci vlažnog vazduha, suve materije u suspenziji i vode u suspenziji na ulazu u sušnicu, C_{pg} , C_{pm} i C_{pw}^L - specifične toplote ovih komponenti, r_w - latentna toplota isparavanja vode, a Q_g - toplotni gubici. Kako je maseni protok suspenzije:

$$G_{SUS} = G_m + G_{H_2O} \quad (3.3)$$

i ako je sadržaj vode u suspenziji definisan kao:

$$x_0 = \frac{G_{H_2O}}{G_{SUS}} \quad (3.4)$$

sledi da je

$$G_m = (1 - x_0) G_{SUS} = \frac{(1 - x_0)}{x_0} G_{H_2O} \quad (3.5)$$

Zamenom jednačine (3.5) u jednačinu (3.4) dobija se izraz za određivanje kapaciteta isparavanja tečne faze vode:

$$G_{H_2O} = \frac{G_v C_{pg}(T_{gi} - T_{ge}) - Q_g}{[(1 - x_0)/x_0] C_{pm}(T_{ge} - T_{0A}) + C_{pw}^L(T_{ge} - T_{0A}) + r_w} \quad (3.6)$$

Ako se zanemare toplotni gubici (Q_g), jednačina (3.6) postaje:

$$W_{H_2O} = \frac{G_{H_2O}}{A_c} = \frac{1}{A_c} \frac{G_v C_{pg}(T_{gi} - T_{ge})}{[(1 - x_0)/x_0] C_{pm}(T_{ge} - T_{0A}) + C_{pw}^L(T_{ge} - T_{0A}) + r_w} \quad (3.7)$$

gde je W_{H_2O} - specifična brzina isparavanja tečne faze vode, a A_c - površina poprečnog preseka komore za sušenje neposredno iznad distributora vazduha.

U slučaju da se ne zanemaruju toplotni gubici (Q_g):

$$Q_g = F_g G_v C_{pg} (T_{gi} - T_{ge}) \quad (3.8)$$

jednačina (3.6) postaje:

$$W_{H_2O} = \frac{G_{H_2O}}{A_c} = \frac{1}{A_c} \frac{(1-F_g) G_v C_{pg} (T_{gi} - T_{ge})}{[(1-x_0)/x_0] C_{pm} (T_{ge} - T_{0A}) + C_{pw}^L (T_{ge} - T_{0A}) + r_w} \quad (3.9)$$

gde je F_g faktor gubitaka toplote.

Pretpostavlja se da gubitke toplote iz sušnice kontroliše prelaz toplote slobodnom (prirodnom) konvekcijom i razmenjena toplota sa okolinom zračenjem od zida komore za sušenje u okolinu.

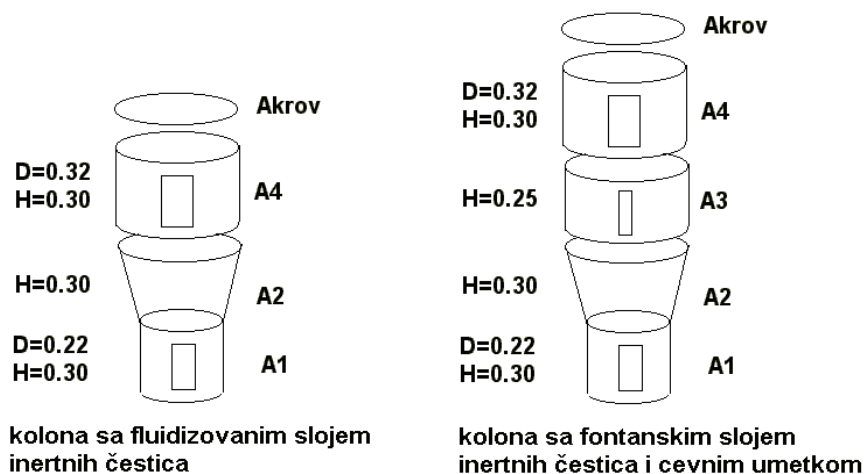
Gubici toplote prelazom toplote prirodnom konvekcijom se izračunavaju iz sledećih izraza /Đorđević i dr., 1997/:

$$\begin{aligned} Gr \cdot Pr &= \frac{g D e_{pk}^3 \rho_{fsr}^2 C_{psr} (T_{ge} - T_{0A})}{\mu_{sr} \lambda_{gsr} (273 + T_{sr})} \\ Nu_{pk} &= 0.135 (Gr \cdot Pr)^{0.33} \\ Q_{gpk} &= \frac{Nu_{pk} \lambda_{sr}}{De_{pk}} \cdot A_g \cdot (T_{ge} - T_{0A}) \end{aligned} \quad (3.10)$$

Gubici toplote usled razmenjene toplote sa okolinom zračenjem se izračunavaju iz sledećeg izraza /Đorđević i dr., 1997/:

$$Q_{gzs} = \varepsilon_1 \cdot C_c \cdot A_g \left[\left(\frac{T_{ge} + 273}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_{0A} + 273}{100} \right)^4 \right] \quad (3.11)$$

gde su: $\varepsilon_1 = 0.52$ stepen crnoće za poliran čelik, $C_c = 5.77 \cdot 10^{-3}$ kW/(m²K⁴) konstanta zračenja apsolutno crnog tela, $A_g (= A_1 + A_2 + A_4 + A_{krov})$, slika 3.6) površina za toplotne gubitke.



Slika 3.6. Skica površina za razmenu toplote prirodnom konvekcijom i zračenjem

Ostali relevantni parametri konvektivne sušnice su:

$$\text{- specifična potrošnja vazduha:} \quad SV = \frac{G_v}{G_{H_2O}} \quad (3.12)$$

- specifični utrošci toplote

$$\text{u odnosu na razliku } (T_{gi}-T_{0A}): \quad q' = \frac{G_v \cdot C_{pg} \cdot (T_{gi} - T_{0A})}{G_{H_2O}} \quad (3.13)$$

$$\text{u odnosu na razliku } (T_{gi}-T_{ge}): \quad q = \frac{G_v \cdot C_{pg} \cdot (T_{gi} - T_{ge})}{G_{H_2O}} \quad (3.14)$$

U tabeli 3.3 su prikazane temperaturne zavisnosti relevantnih fizičko-hemijskih parametara za suv vazduh, suvozasicenu vodenu paru i vodu u tečnoj fazi, korišćenih u proračunu.

Tabela 3.3. Fizičko-hemijski parametri suvog vazduha, vodene pare i tečne vode u zavisnosti od temperature /Đorđević i dr., 1997/

suv vazduh	$C_{pgsv} = 1.006 + 1.152 \cdot 10^{-5} T_g + 5.077 \cdot 10^{-7} T_g^2 - 3.612 \cdot 10^{-10} T_g^3$	$T_g=0^\circ\text{C}$
	$\mu_{sv} = (17.039 + 4.742 \cdot 10^{-2} T_g - 2.262 \cdot 10^{-5} T_g^2 + 1.497 \cdot 10^{-10} T_g^3) \cdot 10^{-6}$	$\div 350^\circ\text{C}$
tečna voda	$\rho_w^l = 1000.155 - 0.0113 \cdot T_g - 4.87 \cdot 10^{-3} T_g^2 + 7.7027 \cdot 10^{-6} T_g^3$	$T_g=0^\circ\text{C}$ $\div 200^\circ\text{C}$
	$r_w = 2495.413 - 2.033 \cdot T_g - 3.537 \cdot 10^{-3} T_g^2$	$T_g=0^\circ\text{C}$ $\div 200^\circ\text{C}$
	$T_{wb} = 30.2858 \cdot p_s + \frac{75.3953 \cdot p_s}{0.0749 + p_s}$	
	$p_s = -3.299 \cdot 10^{-3} + 2.728 \cdot 10^{-3} T_g - 8.603 \cdot 10^{-5} T_g^2 + 1.593 \cdot 10^{-6} T_g^3$	
za proračun toplotnih gubitaka u okolinu	$T_{sr} = \frac{T_{ge} - T_{0A}}{2}$	$T_{sr}=0^\circ\text{C}$ $\div 120^\circ\text{C}$
	$C_{psr} = \frac{(28.75 + 5.718 \cdot 10^{-3}) T_{sr}}{M_{sv}}$	
	$\lambda_{sr} = (2.377 \cdot 10^{-2} + 6.844 \cdot 10^{-5} T_{sr}) \cdot 10^{-3}$	
	$\mu_{sr} = (17.22 + 3.996 \cdot 10^{-2} T_{sr}) \cdot 10^{-6}$	

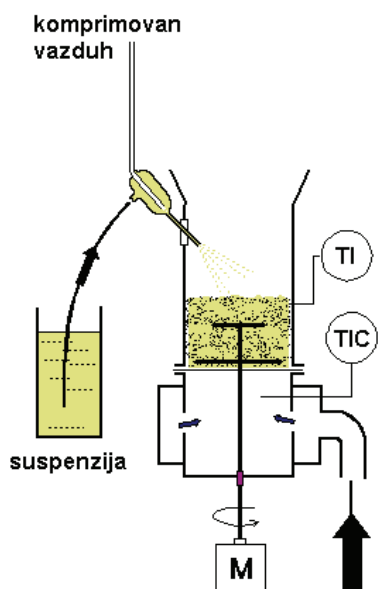
3.4. PRELIMINARNA ISPITIVANJA SUŠENJA SUSPENZIJA NA LABORATORIJSKOM UREĐAJU KAPACITETA 1.5 l_{H2O}/h

3.4.1. Izbor adekvatnog sistema za doziranje suspenzija

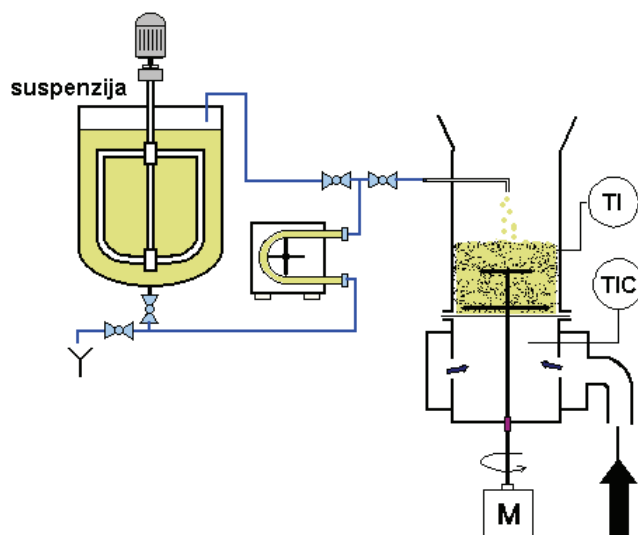
Na početku ispitivanja sušenja najveći eksperimentalni problem je bio da se obezbedi stabilno doziranje suspenzija i pasta u fluidizovani sloj inertnih čestica i dosta vremena je utrošeno da se obezbedi konstantan protok suspenzije u cilju dobijanja pouzdanih podataka. Ispitivano je nekoliko varijanti sistema za doziranje suspenzija, a za testiranje tih sistema su korišćene suspenzije Cineba i bakar(II)-hidroksida, različitog sadržaja vlage.

Doziranje vakuum pumpom (dvofluidnom mlaznicom). U ovom slučaju se vazduh iz kompresora protokom od $V_0=8$ m³/h uvodio u vakuum pumpu prečnika 5 mm koja je postavljena na zidu kolone pod uglom od 30°, tako da je mlaz usmeren na centar gornje površine sloja fluidizovanih inertnih čestica (slika 3.7), a usisno crevo uronjeno je u rezervoar suspenzije koja se stalno meša. Na ovaj način se u sloj dozira suspenzija u vidu fine disperzije kapljica. Kontrola doziranja vršena je manuelno na osnovu praćenja temperature sloja. Ovim postupkom temperatura sloja je održavana približno konstantnom. Ovakvo doziranje ograničeno je na tečljive suspenzije, i utvrđeno je da je donja granica sadržaja vode za Cineb oko 69%, a za bakar(II)-hidroksid oko 76% vode.

Doziranje peristaltičkom pumpom. U ovom slučaju se suspenzija iz rezervoara, koji je snabdeven mešalicom, pomoću peristaltičke pumpe direktno usipa u fluidizovani sloj inertnih čestica. Kontrola doziranja je vršena pomoću regulatora temperature postavljenog iznad sloja. Na ovaj način se mogu dozirati relativno retke (tečljive) suspenzije (slika 3.8).



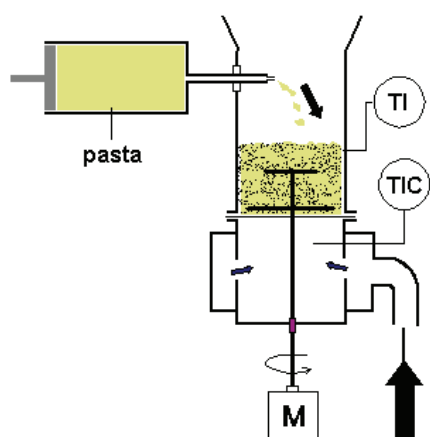
Slika 3.7. Šema doziranja suspenzije vakuum pumpom



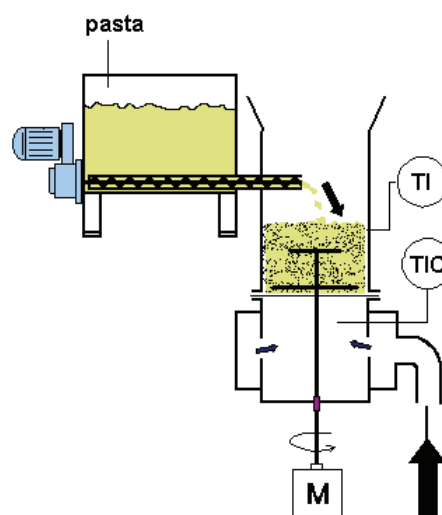
Slika 3.8. Šema doziranja suspenzije peristaltičkom pumpom

Doziranje klipnom pumpom. Da bi se omogućilo doziranje suspenzija sa manjim sadržajem vode, odnosno pasta, na kolonu je postavljena klipna pumpa (slika 3.9) koja ima dimenzije cilindra $\phi 100 \times 300$ mm. Manuelnim pokretanjem klipa pasta se potiskuje i u komadićima ubacuje u centar sloja fluidizovanih inertnih čestica. Ubačeni agregati vlažne paste se odmah po ubacivanju u sloj razbijaju pomoću inertnih čestica i mehaničke mešalice na manje agregate veličine oko 3-4 mm, koji fluidizuju zajedno sa inertnim česticama i postepeno se suše. U ovom slučaju brzina doziranja (tj. brzina pomeranja klipa) je podešavana u skladu sa vizuelnim praćenjem temperature sloja. Na ovaj način mogle su se dozirati paste Cineba sa oko 60% vode i bakar(II)-hidroksida sa oko 68% vode.

Doziranje pužnim transporterom (slika 3.10). Ispitivanja su pokazala da se bakar(II)-hidroksid sa 50% vode može transportovati pužnim transporterom. Kontrola doziranja je vršena pomoću regulatora temperature postavljenog iznad sloja. Ispitivanja su pokazala da i u ovom slučaju sistem radi stabilno. Ubačeni komadi paste se odmah po ubacivanju u sloj razbijaju inertnim česticama i mehaničkom mešalicom na manje agregate veličine oko 3-4 mm, koji fluidizuju sa inertnim česticama i postepeno se suše.



Slika 3.9. Šema doziranja paste klipnom pumpom



Slika 3.10. Šema doziranja paste pužnim transporterom

Na osnovu rezultata dobijenih iz testiranja navedenih varijanti za doziranje suspenzija, za tečljive suspenzije, sa manjim sadržajem vode, je izabran sistem sa peristaltičkom pumpom, a za guste suspenzije, odnosno paste, sistem sa pužnim transporterom, koji su korišćeni i u laboratorijskom i u poluindustrijskom uređaju za sušenje suspenzija. U tabeli 3.4 su prikazani rezultati testiranja mogućnosti doziranja vodenih suspenzija Cineba, $\text{Cu}(\text{OH})_2$ i CaCO_3 različitog sadržaja vlage, kao i optimalni sadržaj vlage za doziranje peristaltičkom pumpom (gušće paste se doziraju pužnim transporterom).

Tabela 3.4. Ocena gustoće i tečljivosti pasti Cineba, $\text{Ca}(\text{OH})_2$ i CaCO_3

suspenzija/ pasta	x_0 $\text{kg}_{\text{H}_2\text{O}}/\text{kg}_{\text{sus}}$	ocena gustoće	optimalni sadržaj vlage za peristaltičku pumpu
Cineb	0.5514	Polusuva vrlo gusta pasta	pasta Cineba sa 62 do 65% vode, zadovoljavajuća sa aspekta mogućnosti doziranja
	0.6177	Viskozna ređa pasta	
	0.6301	Ređa homogena pasta	
	0.6370	- -	
	0.6435	- -	
	0.6509	Retka homogena pasta	
	0.6556	- -	
	0.6611	Lakopokretna retka pasta	
$\text{Cu}(\text{OH})_2$	0.5413	Gusta homogena pasta	pasta $\text{Cu}(\text{OH})_2$ sa 55- 60% vode, zadovoljavajuća sa aspekta mogućnosti doziranja
	0.5565	- -	
	0.5627	Fina gusta homogena pasta	
	0.5655	- -	
	0.5845	Ređa homogena pasta	
	0.5929	Retka homogena pasta	
	0.6697	Relativno retka suspenzija	
CaCO_3	0.5193	Polusuva vrlo gusta pasta	pasta CaCO_3 sa 60% vode, zadovoljavajuća sa aspekta mogućnosti doziranja
	0.5546	Vrlo gusta pasta	
	0.5720	Gusta pasta	
	0.5771	- -	
	0.6137	Viskozna ređa pasta	

3.4.2. Rezultati preliminarnih ispitivanja sušenja suspenzija na laboratorijskom uređaju

Sušenje suspenzija je izvođen kontinualno u laboratorijskom sistemu. Izvršene su dve grupe ogleada: u prvoj grupi ogleada je dozirana tečna faza vode, kao "idealna suspenzija", a u drugoj grupi ogleada sušena je suspenzija tehničkog Cineb fungicida.

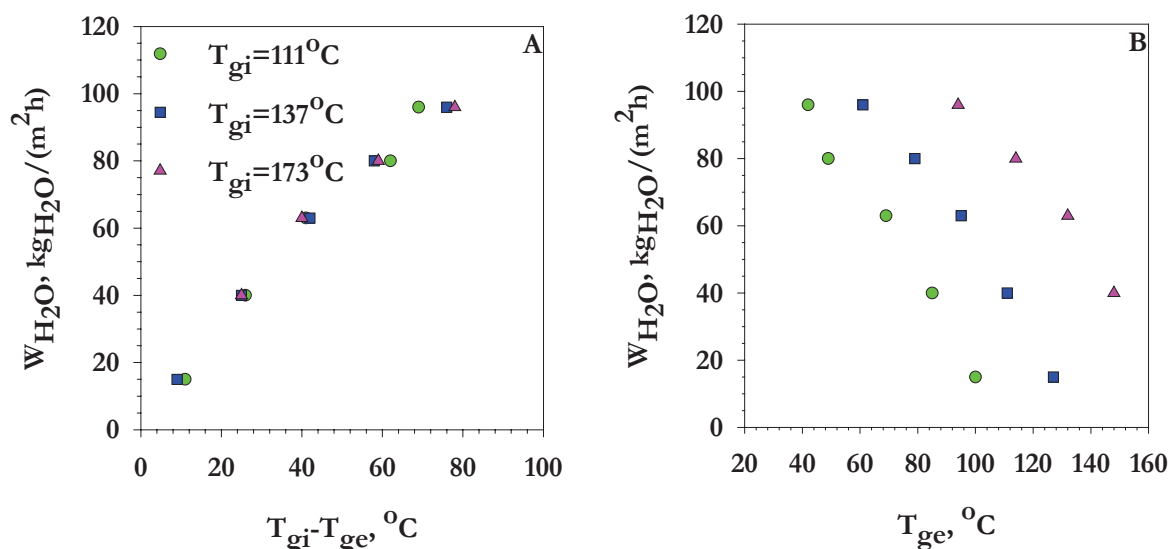
U oglecima u kojima je dozirana tečna faza vode, protok vazduha je bio konstantan u skladu sa maksimalnim mogućnostima kompresora, tako da je i površinska brzina vazduha bila konstantna i imala vrednost $U_0=0.914$ m/s (na $T_{0A}=15^\circ\text{C}$), koja je 1.81 puta veća od vrednosti minimalne brzine fluidizacije (U_{mF}) na istoj temperaturi. U ovim oglecima varirana je ulazna temperatura vazduha i ulazni protok vode. Eksperimenti su vršeni na taj način što su u svakom ogledu bili fiksirani protok vazduha i ulazna temperatura vazduha, a variran je protok vode koja se isparava. Maksimalni protok vode koji se pri datim uslovima može tretirati određivan je vizuelnim praćenjem kvaliteta fluidizacije inertnih čestica, tj. da li dolazi do zagušivanja sloja.

Eksperimentalni rezultati prikazani su u tabeli P2.1 u Prilogu 2, dok su ključni parametri: specifična brzina isparavanja tečne faze vode (specifični kapacitet isparavanja vode), specifični utrošak toplote i specifična potrošnja vazduha prikazani na slikama 3.11, 3.12 i 3.13.

Na slici 3.11-A prikazana je zavisnost specifičnog kapaciteta isparavanja vode ($W_{\text{H}_2\text{O}}$) u funkciji razlike temperatura između ulaznog vazduha u sloj i vazduha na izlazu iz sloja ($\Delta T=$

$T_{gi}-T_{ge}$), a na slici 3.11-B u funkciji temperature sušenja (T_{ge}), pri konstantnoj temperaturi ulaznog vazduha (T_{gi}) i konstantnoj površinskoj brzini ($U_0 = 0.914$ m/s) za ogledе u kojima je dozirana tečna faza vode.

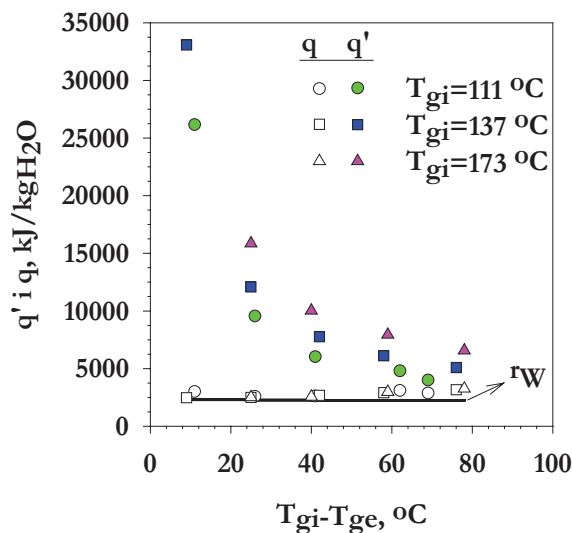
Na osnovu slika 3.11-A i 3.11-B se uočava da je kapacitet isparavanja direktno proporcionalan pogonskoj sili, tj. razlici temperatura $\Delta T = T_{gi} - T_{ge}$. Može se smatrati da je temperatura izlaznog vazduha praktično jednaka temperaturi samog sloja, s obzirom da je u većini ogleda konstatovano da je temperatura izlaznog vazduha za nekoliko stepeni iznad temperature sloja. Sa slika se uočava da kapacitet isparavanja može biti veoma visok, i do $100 \text{ kg}_{H_2O}/\text{m}^2\text{h}$.



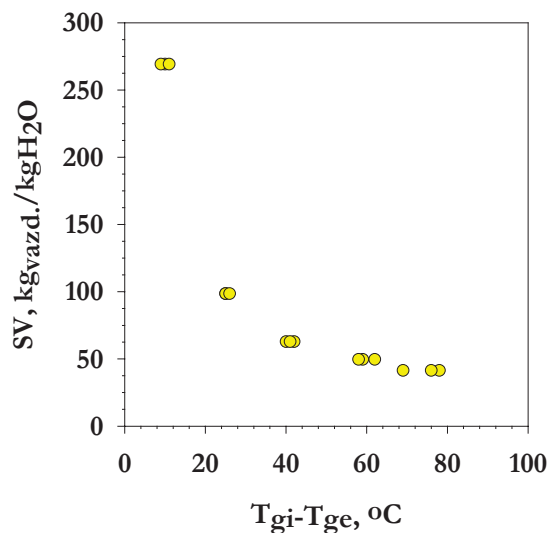
Slika 3.11. Specifični kapacitet isparavanja vode u funkciji razlike temperatura (A) i temperature sušenja (B) pri doziranju tečne faze vode

Na slici 3.12 prikazana je specifična potrošnja toplote pri doziranju tečne faze vode. Specifična potrošnja toplote je obračunata na dva načina: kao utrošak u odnosu na stvarnu pogonsku silu (vrednost označena sa q), odnosno utrošak baziran na razlici temperatura između ulaznog i izlaznog vazduha $\Delta T = T_{gi} - T_{ge}$ i kao utrošak u odnosu na stvarno unetu količinu toplote (vrednost označena sa q'), odnosno utrošak baziran na stvarnoj razlici temperatura $\Delta T = T_{gi} - T_{0A}$, gde je T_{0A} - temperatura okoline. Treba napomenuti da je realni utrošak toplote veći od vrednosti dobijenih za q' za faktor efikasnosti generatora toplote. U ovom sistemu je eksperimentalno utvrđeno da efikasnost električnog predgrejača vazduha iznosi 80%. Specifična potrošnja toplote (q) je približno konstantna, tj. nezavisna od ulazne temperature vazduha (T_{gi}) i od protoka vode (G_{H_2O}) i neznatno je iznad latentne toplote isparavanja vode (r_w). Stvarni utrošak toplote (q'), obračunat u odnosu na razliku temperatura $\Delta T = T_{gi} - T_{0A}$, veoma zavisi od načina izvođenja procesa. Za male razlike temperatura između ulaznog i izlaznog vazduha ($\Delta T = T_{gi} - T_{ge}$) specifični utrošak toplote (q') je veoma visok (i do $35000 \text{ kJ}/\text{kg}_{H_2O}$), a veći je što se koriste više ulazne temperature vazduha. Specifični utrošak toplote (q') opada sa povećanjem razlike temperatura, asimptotski težeći vrednosti latentne toplote isparavanja vode.

Na slici 3.13. prikazan je specifični utrošak vazduha (SV) pri doziranju tečne faze vode. Može se uočiti da specifična potrošnja suvog vazduha opada sa povećanjem razlike temperatura $\Delta T = T_{gi} - T_{ge}$ i da se svi podaci mogu prikazati jednom linijom, što znači da je ovaj utrošak nezavisan od ulazne temperature vazduha (T_{gi}) i protoka vode (G_{H_2O}).



Slika 3.12. Specifična potrošnja toplote pri doziranju tečne faze vode u funkciji razlike temperatura

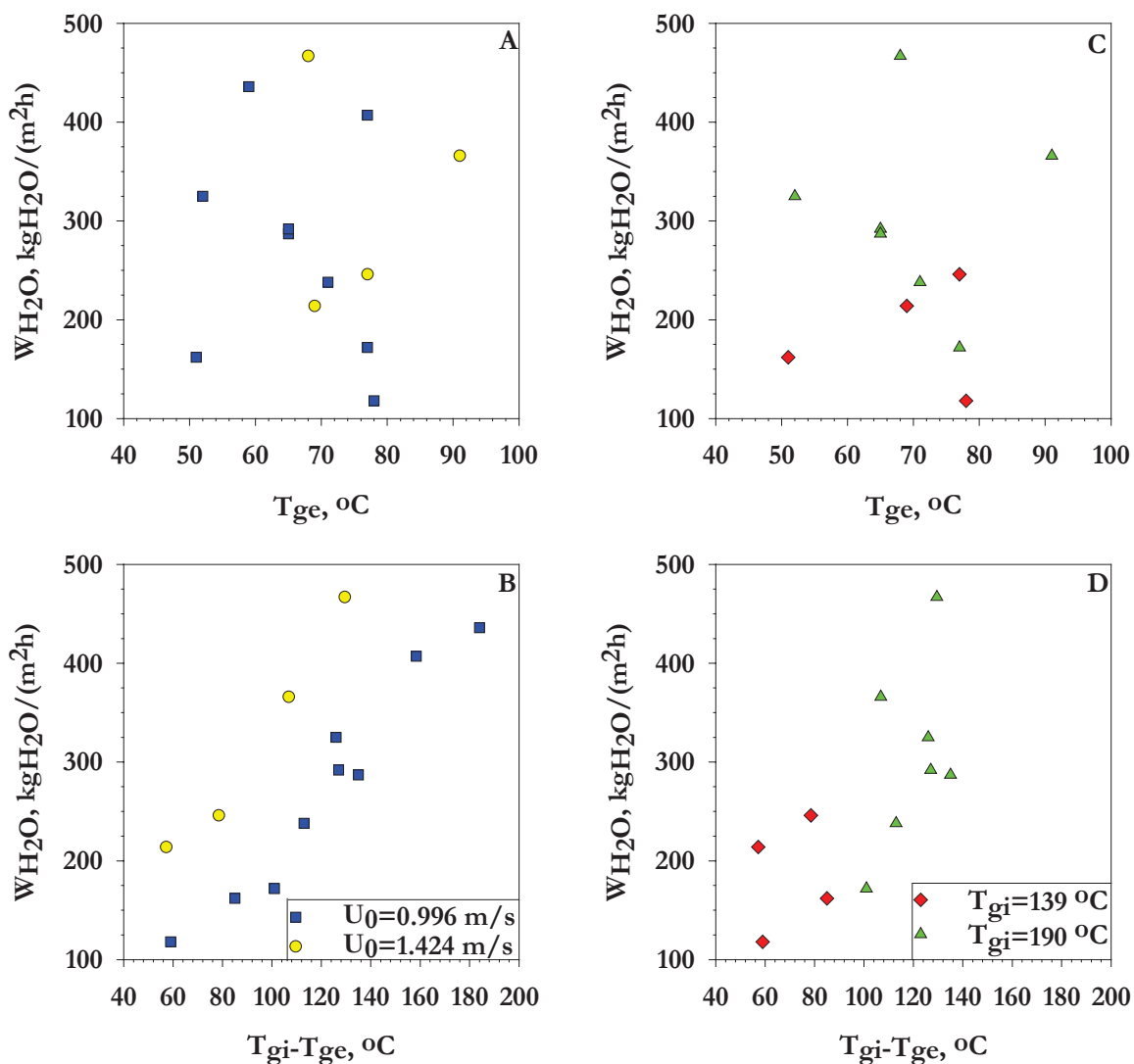


Slika 3.13. Specifična potrošnja vazduha pri doziranju tečne faze vode u funkciji razlike temperatura

Praćenjem stabilnosti rada sušnice tokom doziranja tečne faze vode, primećeno je da pri temperaturi ulaznog vazduha $T_{gi} < 100^\circ\text{C}$ i pri istovremeno veoma malim protocima vode $G_{H_2O} < 0.257 \text{ kg/h}$ dolazi do narušavanja stabilnosti rada eksperimentalnog sistema, odnosno do smanjenja intenziteta fluidizacije, tj. zagušivanja sloja inertnih čestica. Zbog toga se u ogleđima sušenja suspenzija nisu koristile niske ulazne temperature vazduha. Razlozi usled kojih dolazi do zagušivanja sloja inertnih čestica detaljnije su opisani u Poglavlju 3.5 (Ispitivanja sušenja suspenzija na uvećanom laboratorijskom (poluindustrijskom) uređaju kapaciteta $15\text{-}20 \text{ dm}^3_{H_2O}/\text{h}$).

Druga serija ogleđna na laboratorijskom uređaju obuhvatila je sušenje suspenzija tehničkog Cineba. Da bi se omogućilo potiskivanje suspenzije peristaltičkom pumpom, početna suspenzija, odnosno pasta Cineba je razblaživana vodom. Utvrđeno je da se suspenzija sa 65% vode može dozirati pumpom na zadovoljavajući način (tabela 3.4). Ovi ogleđi izvršeni su pri dva fiksirana protoka vazduha, tako da su površinske brzine vazduha u ovim ogleđima bile $U_0 = 0.996 \text{ m/s}$ (što je 1.98 puta više od minimalne brzine fluidizacije na istoj T_{0A}) i $U_0 = 1.424 \text{ m/s}$ (što je takođe 1.98 puta više od minimalne brzine fluidizacije na istoj T_{0A}). Da bi se sprečila termička degradacija aktivne materije, ovi ogleđi vršeni su na taj način što je temperatura sušenja, odnosno temperatura izlaznog vazduha, održavana na vrednosti ispod 90°C . Rezultati ispitivanja prikazani su u tabeli P2.2 u Prilogu 2, dok su ključni parametri: specifična brzina isparavanja tečne faze vode (specifični kapacitet isparavanja vode), specifični utrošak toplote i specifična potrošnja vazduha prikazani na slikama 3.14, 3.15 i 3.16.

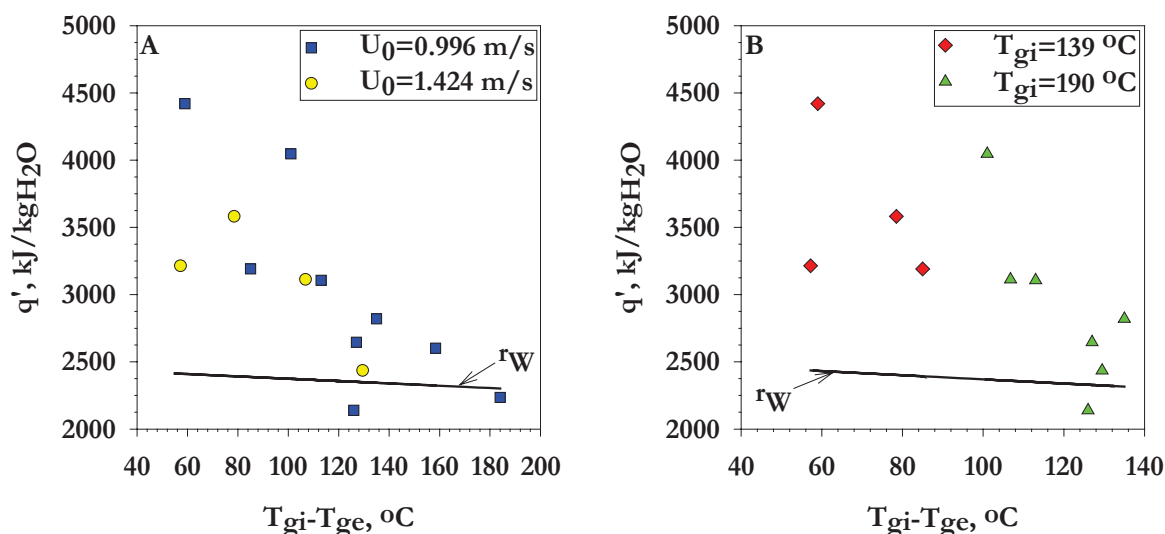
Generalno, svi zaključci vezani za oglede sa doziranjem tečne faze vode u laboratorijskom uređaju važe i za sušenje vodene suspenzije tehničkog Cineba. U pogledu specifičnog kapaciteta isparavanja vode (slika 3.14) može se uočiti da je za svaku konstantnu brzinu vazduha (odnosno maseni protok vazduha) kapacitet isparavanja direktno proporcionalan razlici temperatura $\Delta T = T_{gi} - T_{ge}$. U pogledu specifične potrošnje toplote (slika 3.15) i specifične potrošnje vazduha, takođe, važe isti zaključci kao za oglede sa doziranjem tečne faze vode, s tim što se na ovim dijagramima može uočiti nešto veće rasipanje podataka koje je posledica nemogućnosti održavanja apsolutno konstantnog protoka suspenzije.



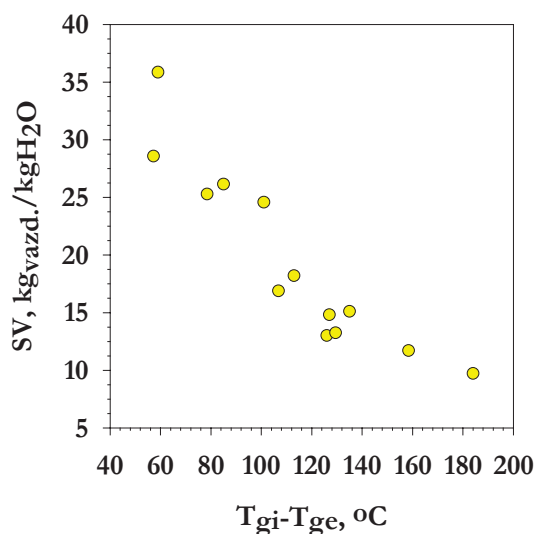
Slika 3.14. Specifični kapacitet isparavanja vode pri sušenju tehničkog Cineba u funkciji razlike temperatura i temperature sušenja, za $U_0 \sim \text{const.}$ (A, B) i za $T_{gi} \sim \text{const.}$ (C, D)

Na slici 3.17 je prikazano poređenje eksperimentalnih podataka sa vrednostima specifične brzine isparavanja vode (W_{H_2O}) dobijenim na osnovu jednačine (3.9). Srednje apsolutno odstupanje između eksperimentalnih i izračunatih vrednosti iznosi 29.8% (za doziranje tečne faze vode odstupanje je 13.0%, a za sušenje vodene suspenzije Cineba odstupanje je 46.6%). Preliminarna ispitivanja su izvršena na eksperimentalnom sistemu koji nije sasvim adekvatan u pogledu stabilnosti protoka i kontrole ulazne temperature vazduha.

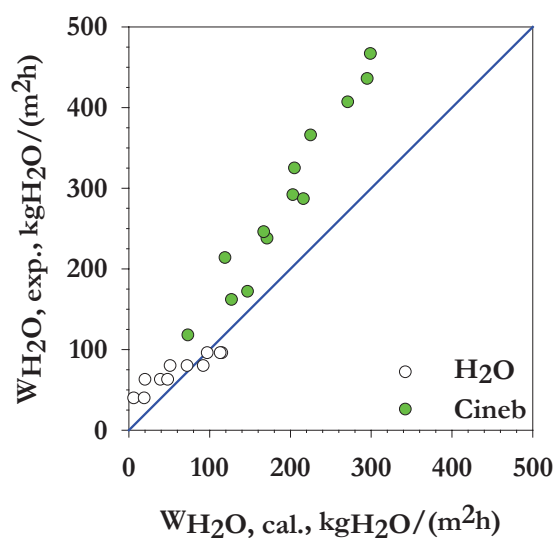
Takođe, moguće je da u svim ogledima nisu do kraja bili uspostavljeni stacionarni uslovi izvođenja procesa. I pored toga, generalno, kvalitet preliminarnih podataka je zadovoljavajući.



Slika 3.15. Specifična potrošnja toplote pri sušenju tehničkog Cineba u funkciji razlike temperatura (A- $U_0 \sim \text{const.}$, B- $T_{gi} \sim \text{const.}$)



Slika 3.16. Specifična potrošnja vazduha pri sušenju tehničkog Cineba u funkciji razlike temperatura



Slika 3.17. Poređenje eksperimentalnih i izračunatih vrednosti specifične brzine isparavanja vode

Na osnovu izvršenih preliminarnih ispitivanja na laboratorijskom uređaju je ustanovljeno da eksperimentalni sistem radi stabilno i da ga generalno karakteriše visoka efikasnost. Specifični kapacitet isparavanja vode je vrlo visok, i do 300 kW/m²_{sloja} za ogleda sa doziranjem vode. Iskorišćenje energijskog potencijala vazduha je, takođe, vrlo visoko. Vlažnost vazduha se na putu kroz fluidizovani sloj poveća od 4 do 11 puta, zavisno od uslova izvođenja ogleda.

Visoka efikasnost u pogledu specifičnog utroška toplote (q') i specifičnog utroška vazduha (SV) je posledica visoke razlike temperatura, $\Delta T = T_{gi} - T_{ge}$, pri čemu se temperatura sušenja (T_{ge}) održava na željenoj (dozvoljenoj) vrednosti. Zahvaljujući intenzivnom mešanju inertnih čestica, usled fluidizacije i mehaničkog mešanja, temperatura sloja je ravnomerna po volumenu, čime se umanjuje opasnost od lokalnog pregrevanja sušenog materijala u sloju.

Utrošak toplote obračunat u odnosu na razliku temperatura $T_{gi} - T_{ge}$ (q), je blizu teorijski potrebnog za faznu transformaciju vode tečnost-gas, tj. kreće se oko latentne toplote isparavanja vode. Utrošak toplote obračunat u odnosu na stvarnu razliku temperatura $T_{gi} - T_{0A}$ (q') je najveći pri najmanjoj razlici $T_{gi} - T_{ge}$, i do 35000 kJ/kg_{H₂O} za ogleda sa doziranjem vode, a asimptotski se približava teorijskom utrošku sa porastom ove razlike temperatura.

U svim preliminarnim ogledima vlažnost dobijenog praha Cineba je nešto veća od zahtevane (1%) i kreće se od 5.44 - 6.70% u ogledima sa manjom brzinom vazduha ($U_0 = 0.997$ m/s), odnosno 1.81 - 2.51% u ogledima sa većom brzinom vazduha ($U_0 = 1.445$ m/s). Može se očekivati da bi povećanje protoka vazduha za oko 25% rezultiralo zadovoljavajućom vlažnošću produkta. Ovo, međutim, nije bilo moguće proveriti u ovoj fazi preliminarnih ispitivanja usled tehničke nemogućnosti povećanja protoka vazduha.

Oko 90 - 95% suvog praha se prikupi u ciklonu, a ostatak u vrećastom filtru, što je u saglasnosti sa granulometrijskim analizama produkta.

U laboratorijskom uređaju su izvršene i uspešne probe sušenja bakar(II)-hidroksida. Ovi ogledi su izvedeni samo kvalitativno, tako da kvantitativni parametri nisu mereni.

Probe sušenja vodenog rastvora vinske kiseline (sa 5, 10 i 20 % suve materije) su bile bezuspešne, budući da vrlo brzo nakon početka doziranja vodenog rastvora vinske kiseline u sloj dolazi do slepljivanja inertnih čestica i mehaničkog blokiranja sloja. Kvalitativno ispitivanje sušenja vodene suspenzije Tirama ([bis-(dimetil-tiokarbamil)-disulfid], tabela P1.1, Prilog 1) u laboratorijskom uređaju je takođe bilo neuspešno s obzirom da je došlo do nekontrolisanog porasta temperature, sinterovanja sušenog materijala i mehaničkog blokiranja sloja inertnih čestica, verovatno usled termičke degradacije sušenog materijala.

3.5. ISPITIVANJA SUŠENJA SUSPENZIJA NA UVEĆANOM LABORATORIJSKOM (POLUINDUSTRIJSKOM) UREĐAJU KAPACITETA 15-20 dm³H₂O/h

Rezultati preliminarnih ispitivanja sušenja na laboratorijskom nivou su bili podloga za razvoj i projektovanje poluindustrijskog uređaja za sušenje suspenzija. U cilju dobijanja što pouzdanijih podataka za dalje uvećanje razmera procesa i postrojenja izvršena su ispitivanja na poluindustrijskom uređaju.

Sušenje suspenzija je izvođeno kontinualno u poluindustrijskom sistemu. U svakom ogledu su podešavani protok vazduha i temperatura ulaznog vazduha (pomoću regulatora temperature TIC1, slika 3.4) na određenu vrednost. Proces doziranja suspenzije u sistem otpočinje onog momenta kada je temperatura izlaznog vazduha dostigla setovanu vrednost. U toku izvođenja procesa temperatura izlaznog vazduha je održavana na konstantnoj vrednosti, s obzirom da regulator temperature TIC2 (slika 3.4) kontroliše dinamiku doziranja suspenzije u sistem (doziranje se izvodi diskontinualno, tj. “on-off” regulacijom protoka). Stacionarni rad sistema se uspostavlja nekoliko minuta nakon što temperatura ulaznog vazduha dostigne zadatu vrednost (TIC1). Rad sistema za doziranje je podešen tako da je aktivni period doziranja sa “on-off” regulacijom protoka suspenzije iznosio 75% od ukupnog vremena doziranja.

Za pouzdan rad sistema ključna su tri parametra: brzina vazduha, ulazna temperatura vazduha i temperatura sušenja, tj. temperatura sloja. Brzina vazduha određena je uslovima fluidizacije inertnih čestica i fiksirana je. Temperatura sušenja određena je termičkom stabilnošću materijala koji se suši i željenom izlaznom rezidualnom vlagom praškastog produkta. Za fiksiranu brzinu i ulaznu temperaturu vazduha, željena temperatura sušenja se održava kontrolom doziranja suspenzije materijala koji se suši.

Sistem za sušenje radi veoma stabilno, odnosno u toku sušenja variranja temperature izlaznog vazduha (ΔT_{ge}) su manje od 2°C.

Za svaku od ispitivanih suspenzija određivan je sadržaj vode, gustina i raspodela veličine čestica. Izvršena je karakterizacija dobijenih praškastih produkata, odnosno određivana je rezidualna vlaga praha i raspodela veličine čestica. U oglecima sa suspenzijom Cineba dodatno je određivan i sadržaj aktivne materije pre sušenja, u polaznoj suspenziji, i nakon sušenja, u dobijenom suvom produktu. Generalno se oko 95% praha prikupi u ciklonu, a ostatak u vrećastom filtru. Ovo je u saglasnosti sa granulometrijskom analizom produkta, koji je praktično jednak granulometrijskom sastavu polazne suspenzije.

Za sušenje suspenzija su najčešće korišćene staklene sfere prečnika 1.94 mm kao inertne čestice u fluidizovanom sloju. Naime, ove relativno krupne staklene čestice po pravilu pripadaju D grupi prema Geldart-ovoj /1973/ klasifikaciji fluidizacionih osobina materijala ($d_p > 1.5-2$ mm). Primena ove grupe čestica u fluidizaciji nije uobičajena, s obzirom da dolazi do pojave mehura gasa i klipova čestica, što u velikoj meri smanjuje efikasnost kontakta između gasovite i čvrste faze. U našem sistemu navedene pojave nisu toliko

izražene, odnosno nema značajnijeg uticaja na smanjenje kvaliteta fluidizacije, s obzirom da je prečnik staklenih sfera bliži donjoj granici prečnika čestica koje se svrstavaju u D grupu. Sa smanjenjem prečnika čestica koje se fluidizuju, povećava se broj čestica po zapremini sloja, a samim tim i raspoloživa površina za kontakt sa suspenzijom. Sa druge strane, ako su čestice suviše sitne, energija usled sudara između njih nije više dovoljna za efikasno otiranje suve skrame suspenzije sa njihove površine, kao i za drobljenje eventualno nastalih aglomerata materijala koji se suši. Granična veličina inertnih čestica zavisi od karakteristika materijala koji se suši, tj. od viskoziteta i kohezionih efekata između ovlaženih čestica. U opsegu operativnih uslova pod kojima su vršena ispitivanja sušenja suspenzija pokazalo se da je optimalna veličina staklenih čestica 1.2 mm i 1.94 mm, uzimajući u obzir dva kontradiktorna faktora, tj. specifičnu kontaktnu površinu i prečnik čestica. Eksperimentalni rezultati sušenja suspenzija na poluindustrijskom uređaju su prikazani u tabelama P2.3 i P2.4 u Prilogu 2.

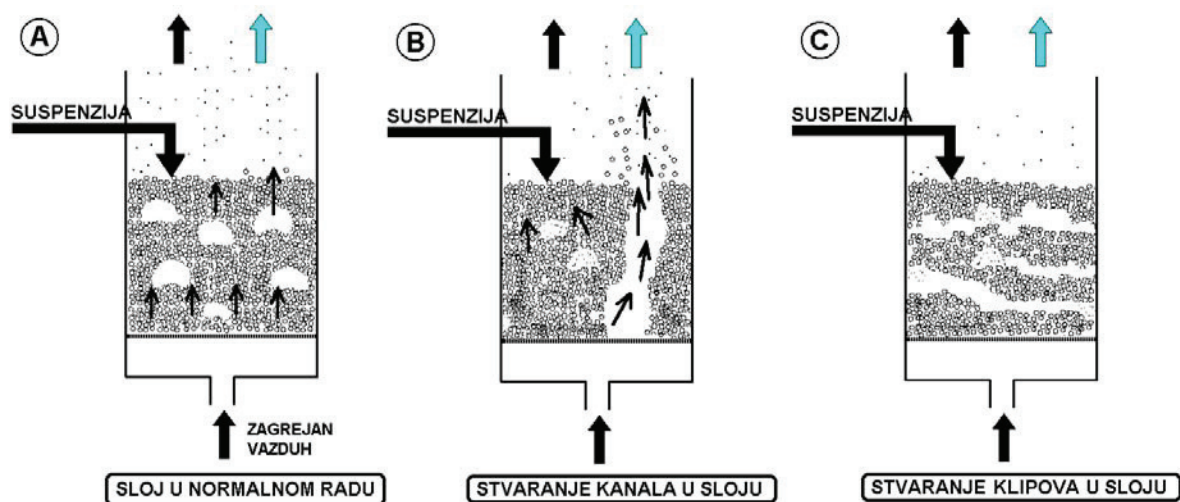
3.5.1. Maksimalni protok suspenzije

Do naglog opadanja intenziteta fluidizacije dolazi kada se suspenzija dozira u sistem brže u odnosu na brzinu sušenja vlažnog materijala i brzinu otiranja suvog sloja produkta sa površine inertnih čestica. U tom slučaju povećava se debljina filma vlažnog materijala na površini inertnih čestica, da bi vremenom inertne čestice prestale da fluidizuju usled prevelike mase pojedinačnih inertnih čestica ili aglomerata nastalih slepljivanjem više inertnih čestica, pri čemu prestaje formiranje i elutacija suvog produkta iz sloja.

U oglecima u kojima je dozirana tečna faza vode ("idealna suspenzija") u sistem, maksimalno mogući protok tečne faze vode (pri fiksiranom protoku vazduha i ulaznoj temperaturi vazduha) određivan je tako da ne ugrozi stabilnost rada sušnice. Uočeno je da temperatura sloja ne sme biti niža od 35°C. Daljim povećavanjem protoka tečne faze vode, tj. snižavanjem temperature sloja, inertne čestice se slepljuju formirajući krupne i vlažne agregate, prouzrokujući nestabilnu i neuniformnu fluidizaciju, kanalisanje vazduha kroz sloj i konačno potpunu blokadu sloja (slika 3.18).

U oglecima u kojima su sušene vodene suspenzije Cineba i $\text{Cu}(\text{OH})_2$, temperatura sušenja (tj. temperatura izlaznog vazduha iz sloja) je određivana na osnovu zahtevanih karakteristika izlaznog suvog praha. Niska temperatura sušenja rezultuje u visokoj rezidualnoj vlazi produkta, dok visoka temperatura sušenja prouzrokuje smanjenje sadržaja aktivne materije. Uočeno je da vrednost maksimalnog protoka suspenzije pri kom se održava stabilan rad sistema raste sa povećanjem ulazne temperature vazduha. Vrednost maksimalnog protoka suspenzije takođe raste sa povećanjem statičke visine sloja inertnih čestica, pošto je za prenos toplote i mase raspoloživa veća kontaktna površina. Maksimalni protok suspenzije se povećava sa povećanjem površinske brzine vazduha kao rezultat intenzivnije fluidizacije i povećane brzine isparavanja vode usled većih vrednosti koeficijenta prenosa toplote i mase.

Navedene procesne parametre treba uskladiti tako da se obezbedi optimalna brzina doziranja suspenzija i sa aspekta energetske efikasnosti i sa aspekta zahtevanog kvaliteta produkta.



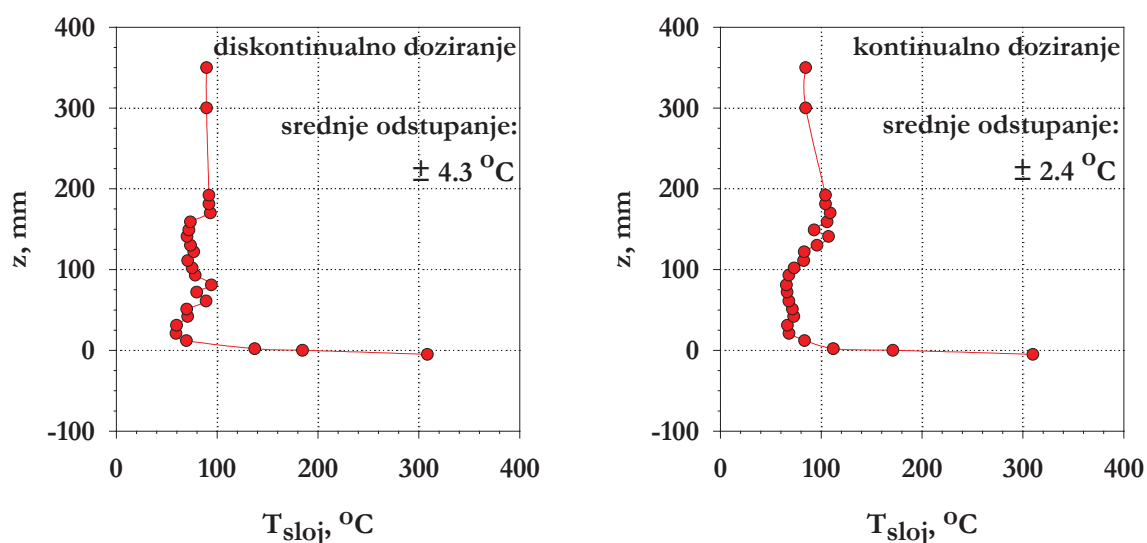
Slika 3.18. Šematski prikaz fluidizovanog sloja stabilnih i nestabilnih hidrodinamičkih karakteristika

3.5.2. Temperatura u sloju

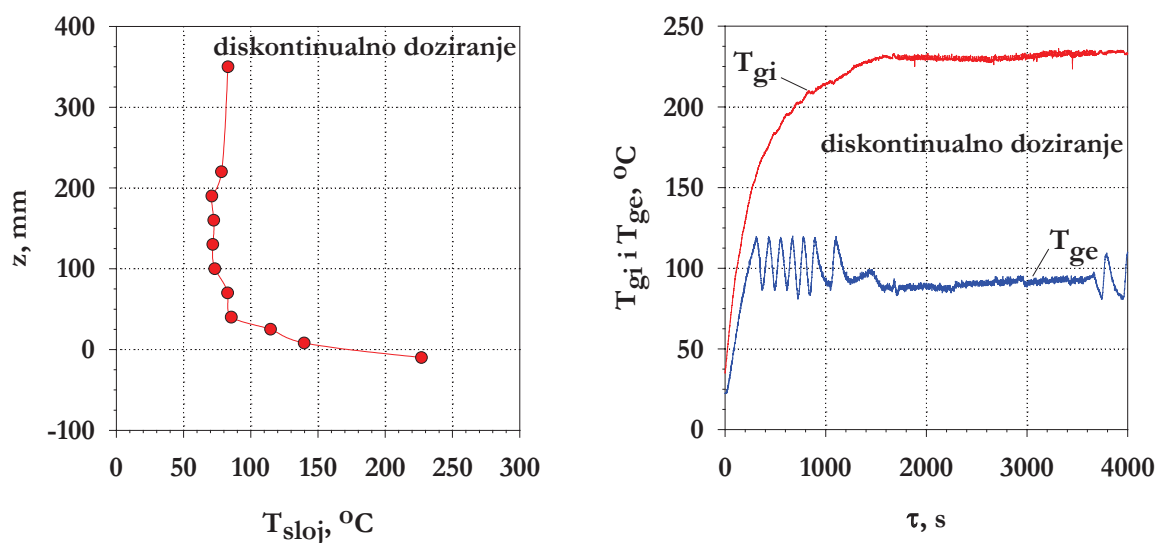
Na slici 3.19-A prikazan je karakterističan aksijalni profil temperatura u fluidizovanom sloju inertnih čestica pri sušenju vodene suspenzije CaCO_3 sa diskontinualnim načinom doziranja, tj. “on-off” regulacijom protoka suspenzije. U ovom slučaju su termoparovi bili postavljeni duž fluidizovanog sloja radijalno na 70 mm od zida kolone. Može se uočiti da temperatura sloja na vrlo kratkom rastojanju od raspodeljivača vazduha postaje približno konstantna u masi sloja. Vrednosti temperatura u sloju, prikazane na slici 3.19-A, predstavljaju usrednjene vrednosti. Odstupanja od srednjih vrednosti su u granicama od $\pm 4.3^\circ\text{C}$. Ogljed je ponovljen sa kontinualnim doziranjem suspenzije u sloj pomoću peristaltičke pumpe. Dobijeni su praktično isti rezultati kao i pri diskontinualnom doziranju sa “on-off” regulacijom protoka, sa jedinom razlikom što su u ovom slučaju odstupanja od srednjih vrednosti manja, tj. $\pm 2.4^\circ\text{C}$. Isti zaključak se može izvesti i na osnovu aksijalnog profila temperatura u sloju izmerenih pri sušenju vodene suspenzije Cineba, prikazanog na slici 3.19-B. Promena temperatura ulaznog i izlaznog vazduha iz sloja tokom procesa sušenja za isti ogled sušenja suspenzije Cineba (slika 3.19-B), merena pomoću računarskog sistema za automatsko prikupljanje podataka, je data kao ilustracija da su tokom stabilnog rada sistema obe temperature praktično konstantne. U početnom periodu termostatiranja sistema (približno 18 minuta) je dozirana čista voda, a nakon toga je dozirana suspenzija Cineba.

Sa slika 3.19-A i 3.19-B se može uočiti da je temperatura sloja oko 15°C niža od temperature izlaznog vazduha, što je u saglasnosti sa rezultatima drugih autora da je temperatura čestica sušenog materijala u sloju iznad temperature adijabatskog zasićenja vazduha, a u isto vreme ispod temperature izlaznog gasa i da se razlika između temperatura

inertnih čestica i izlaznog vazduha povećava što je ulazna temperatura gasa niža /Trojoski i dr., 1989 Markowski, 1992; Mujumdar i Kudra, 2002/. Ovi rezultati ukazuju na to da nije celokupna površina inertnih čestica u sloju prekrivena filmom suspenzije, tako da se sušenje, pored konvektivnog odvija delimično i konduktivnim mehanizmom, što je u skladu sa rezultatima Trojoski-og i dr. /1989/ da intenzitet mešanja inertnih čestica u fluidizovanom sloju nije dovoljan da se obezbedi apsolutno uniformna distribucija tečne faze po celoj zapremini sloja. Takođe, u trenutku otiranja suve skrame sa površine inertnih čestica temperatura čestica je viša od temperature adijabatskog zasićenja vazduha, s obzirom da ovaj proces počinje kada je dostignuta kritična vrednost sadržaja vlage koja je bliska konačnoj vrednosti.



Slika 3.19-A. Aksijalni profili temperatura suspenzija CaCO_3 , $G_{\text{sus}} = 35 \text{ kg/h}$, $x_0 = 0.7$, $T_{\text{gi}} = 308^\circ\text{C}$, $T_{\text{ge}} = 96^\circ\text{C}$



Slika 3.19-B. Aksijalni profil temperatura i promena temperature ulaznog i izlaznog vazduha iz sloja suspenzija Cineb, $G_{\text{sus}} = 27 \text{ kg/h}$, $x_0 = 0.64$, $T_{\text{gi}} = 230^\circ\text{C}$, $T_{\text{ge}} = 89^\circ\text{C}$

Kao što se može videti sa slika 3.19-A i 3.19-B veći deo sloja se ponaša svojstveno agregativnoj fluidizaciji, tj. usled intenzivnog mešanja inertnih čestica ostvaruju se približno izotermni uslovi. Međutim, temperatura manjeg dela sloja, neposredno iznad raspodeljivača vazduha ($z=0$), je viša i to u izvesnim aplikacijama može predstavljati problem. Pri sušenju termoosetljivih materijala u ovoj zoni sloja temperatura može dostići vrednost njihove tačke topljenja, tako da dolazi do promene reoloških karakteristika sušenog materijala i slepljivanja sloja. Ako materijal koji se suši sadrži lepljive i lako topljive komponente vrlo je verovatno da će doći do blokade sloja i pri njihovom kratkotrajnom zadržavanju u toplijoj zoni. Moguća rešenja za prevazilaženje ovog problema su da se suspenzija uvodi pri dnu fluidizovanog sloja inertnih čestica i na taj način vrši kontinualno pothlađivanje toplije zone ili da se sušenje vrši pri umerenim ulaznim temperaturama vazduha (ispod 100°C), mada će u ovom slučaju kapacitet isparavanja vlage i ukupna efikasnost procesa biti znatno manji. U oba slučaja je preporučljiva upotreba mehaničke agitacije u cilju sprečavanja stvaranja većih aglomerata. Pri ovome treba imati u vidu da ostali procesni parametri budu optimalno usklađeni da bi se održala ravnoteža između brzine sušenja filma suspenzije i brzine otiranja osušenog produkta sa površine inertnih čestica. O sušenju lepljivih i termoosetljivih materijala će biti nešto više reči kasnije, u Poglavlju 3.5.9.

Nepogodna situacija do koje može doći pri sušenju suspenzija u fluidizovanom sloju inertnih čestica je istovremeno doziranje suspenzije i zaštitne vode u sloj. Regulator temperature (TIC3) je podešen na vrednost koja je oko 20°C iznad temperature sušenja i reguliše doziranje tečne faze vode u sistem, što predstavlja “prvi zaštitni krug” pri termostatiranju sloja pre početka doziranja suspenzije, a “drugi zaštitni krug” u toku sušenja suspenzije za sprečavanje pregrevanja sloja usled eventualnih poremećaja u radu sistema (slika 3.4). Sinterovanje dela sloja može nastati usled topljenja i menjanja reološkog stanja sušenog materijala u toploj zoni pri dnu sloja, usled izraženih adhezivnih karakteristika sušenog materijala ili usled prekoračenja vrednosti maksimalnog protoka suspenzije za stabilan rad sušnice. Pri tome sloj inertnih čestica počinje otežano da fluidizuje i predgrejani ulazni vazduh kanališe kroz sloj. U tom slučaju počinje istovremeno doziranje i suspenzije i vode, s obzirom da regulatori temperature za kontrolu njihovog doziranja (TIC2 i TIC3) primaju pogrešnu informaciju da je temperatura sloja znatno viša od stvarne, s obzirom da registruju temperaturu zagrejanog ulaznog vazduha koji kanališe kroz sloj. Na ovaj način dolazi do prekomernog natapanja sloja tečnošću.

3.5.3. Opšte karakteristike sušenja suspenzija i analiza rezultata

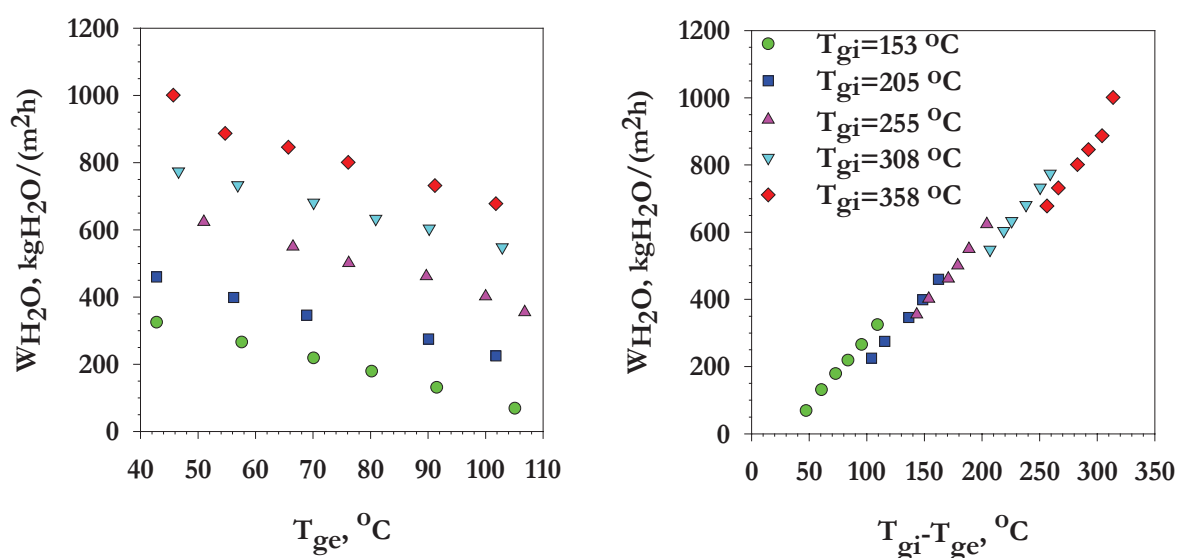
U tabeli 3.5 prikazani su podaci za jedan tipičan ogled sušenja vodene suspenzije Cineba u fluidizovanom sloju inertnog materijala.

Na slici 3.20 prikazan je specifični kapacitet isparavanja vode (ogledi sa doziranjem tečne faze vode) obračunat po jedinici poprečnog preseka sloja ($\text{kg}_{\text{H}_2\text{O}}/\text{m}^2\text{h}$), u zavisnosti temperature sušenja (T_{ge}) i razlike temperatura ($T_{\text{gi}}-T_{\text{ge}}$), pri konstantnim temperaturama

ulaznog vazduha (T_{gi}) i konstantnoj površinskoj brzini vazduha ($U_0 = 1.77$ m/s). Sa slike se uočava da kapacitet isparavanja vode može biti veoma visok, i do 1000 $\text{kg}_{\text{H}_2\text{O}}/\text{m}^2\text{h}$. Zahvaljujući intenzivnom mešanju inertnih čestica u sloju, izlazna temperatura vazduha je praktično jednaka temperaturi sloja, što je generalna karakteristika agregativno fluidizovanih sistema. Može se uočiti da je kapacitet isparavanja vode, pri konstantnoj brzini vazduha, direktno proporcionalan razlici temperatura ulaznog i izlaznog vazduha iz sloja ($T_{gi}-T_{ge}$). Treba napomenuti da od ogleada do ogleada nije bilo moguće održati apsolutno konstantnu temperaturu ulaznog vazduha, pa su podaci selektovani za približno iste temperature. Na primer, linija za srednju ulaznu temperaturu $T_{gi} = 308^\circ\text{C}$ obuhvata oglede u kojima je ulazna temperatura vazduha varirala u opsegu od 305.7°C do 309.8°C . Isto važi i za brzinu vazduha tako da se srednja vrednost od $U_0=1.77$ m/s odnosi na interval od 1.60 do 1.92 m/s.

Tabela 3.5. Tipičan ogled sušenja u fluidizovanom sloju inertnog materijala (suspenzija Cineb fungicida, $x_0 = 0.70$ $\text{kg}_{\text{H}_2\text{O}}/\text{kg}_{\text{sus}}$, inertne čestice $d_p=0.93$ mm)

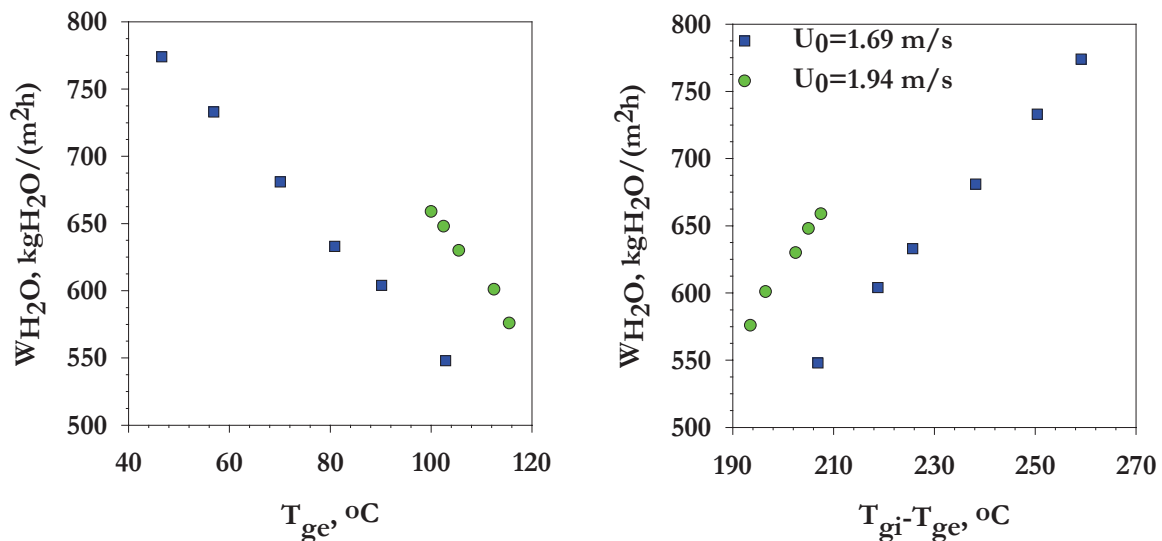
Zapreminski protok vazduha (20°C), m^3/h	V_0	270
Površinska brzina vazduha (20°C), m/s	U_0	2.07
Ulazna temperatura vazduha, $^\circ\text{C}$	T_{gi}	195
Izlazna temperatura vazduha, $^\circ\text{C}$	T_{ge}	67
Protok suspenzije, $\text{kg}_{\text{sus}}/\text{h}$	G_{SUS}	25.48
Ekspanzija sloja, odnos dinamičke visine sloja/statičke visine sloja		2.50
Protok vode (u suspenziji), $\text{kg}_{\text{H}_2\text{O}}/\text{h}$	$G_{\text{H}_2\text{O}}$	17.84
Protok suve materije (u suspenziji), $\text{kg}_{\text{dm}}/\text{h}$	G_m	7.64
Specifična isparljivost, $\text{kg}_{\text{H}_2\text{O}}/\text{m}^2\text{h}$	$W_{\text{H}_2\text{O}}$	491
Specifična potrošnja vazduha, $\text{kg}_{\text{vazd.}}/\text{kg}_{\text{H}_2\text{O}}$	SV	18.25
Specifična potrošnja toplote (na osnovu $T_{gi}-T_{ge}$), $\text{kJ}/\text{kg}_{\text{H}_2\text{O}}$	q	2357
Specifična potrošnja toplote (na osnovu $T_{gi}-T_{0A}$), $\text{kJ}/\text{kg}_{\text{H}_2\text{O}}$	q'	3315
Vlažnost produkta, %	x_f	0.78
“Hold-up” suspenzije i čestica produkta u sloju, %	h	7.1



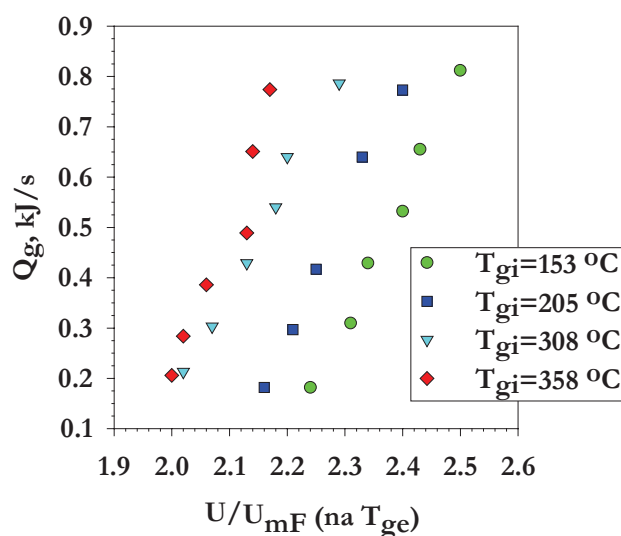
Slika 3.20. Specifična brzina isparavanja vode (doziranje tečne faze vode) za $U_0=1.77$ m/s, inertne čestice $d_p=1.94$ mm

Na slici 3.21 prikazan je specifični kapacitet isparavanja vode (ogledi sa doziranjem tečne faze vode) u zavisnosti temperature sušenja (T_{ge}) i razlike temperatura ($T_{gi}-T_{ge}$), pri konstantnoj temperaturi ulaznog vazduha (T_{gi}) i dve vrednosti površinske brzine vazduha. Može se uočiti da je kapacitet isparavanja vode, za svaku konstantnu vrednost brzine vazduha, takođe, direktno proporcionalan pogonskoj sili, tj. razlici temperatura ($T_{gi}-T_{ge}$).

Toplotni gubici u okolinu su računati prema jednačini (3.8) i dobijeni rezultati su prikazani na slici 3.22. Sa povećanjem fluidizacionog broja i povećanjem ulazne temperature vazduha povećavaju se i toplotni gubici u okolinu, pošto se povećava razlika temperatura između sušnice i okoline.



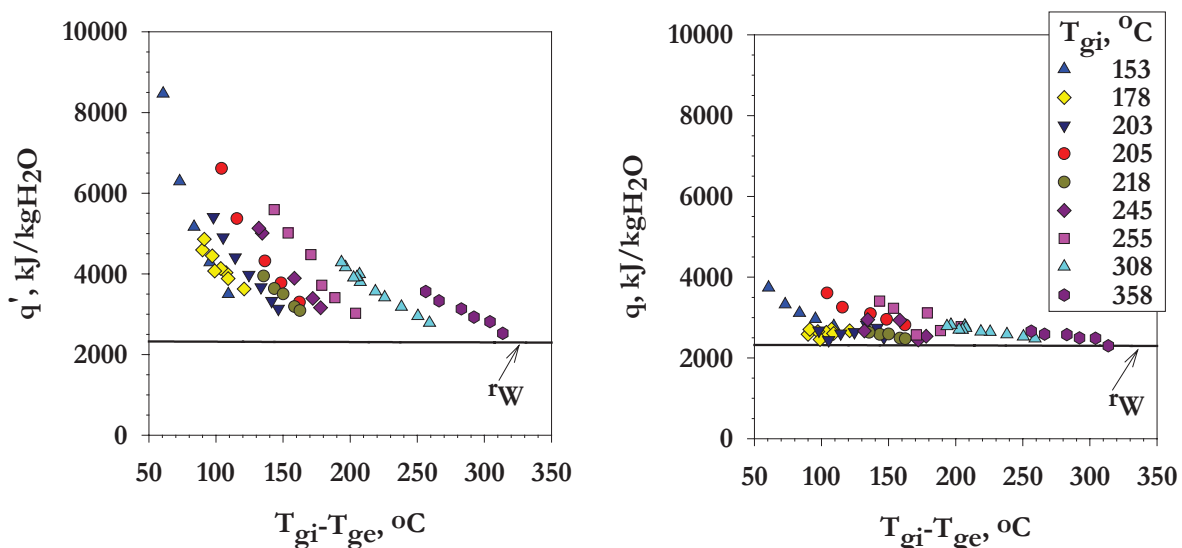
Slika 3.21. Specifična brzina isparavanja vode (doziranje tečne faze vode) za $T_{gi}=308^{\circ}C$ inertne čestice $d_p=0.93$ mm za set ogleđa sa $U_0=1.94$ m/s inertne čestice $d_p=1.94$ mm za set ogleđa sa $U_0=1.69$ m/s



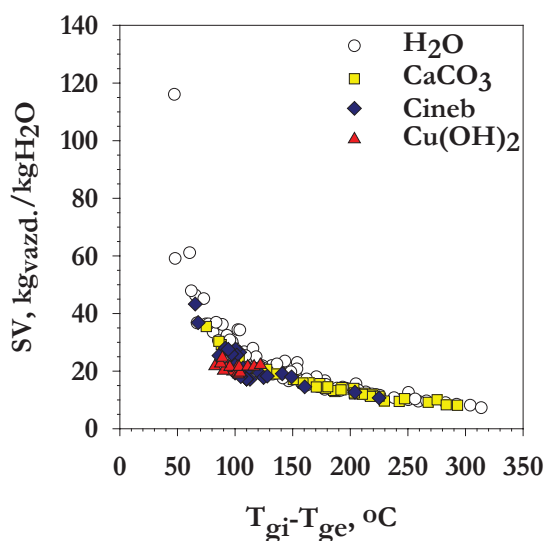
Slika 3.22. Toplotni gubici u funkciji fluidizacionog broja (doziranje tečne faze vode), inertne čestice $d_p=1.94$ mm

Na slici 3.23 prikazan je specifični utrošak toplote pri isparavanju vode u funkciji razlike temperatura $T_{gi}-T_{0A}$, gde je T_{0A} temperatura okoline. Utrošak toplote je obračunat na dva načina: kao utrošak na stvarnu pogonsku silu (vrednost označena sa q), tj. utrošak obračunat na razliku temperatura između ulaznog i izlaznog vazduha ($T_{gi}-T_{ge}$) i kao utrošak u odnosu na stvarnu unetu količinu toplote (vrednost označena sa q'), tj. utrošak obračunat na stvarnu razliku temperatura ($T_{gi}-T_{0A}$). Realni utrošak toplote veći je od q' za faktor efikasnosti generatora toplote. U našem

sistemu eksperimentalno utvrđena efikasnost električnog predgrejača vazduha iznosi 82%. Specifični utrošak toplote (q) je približno konstantan, tj. nezavisan od ulazne temperature vazduha (T_{gi}) i od protoka vode (G_{H_2O}) i neznatno je iznad latentne toplote isparavanja vode (r_w). Stvarni utrošak toplote (q') veoma zavisi od načina izvođenja procesa. Kao što se vidi sa slike, stvarna specifična potrošnja toplote se smanjuje sa povećanjem razlike temperatura $\Delta T = T_{gi} - T_{ge}$, odnosno povećanjem pogonske sile. Istovremeno pri višim ulaznim temperaturama vazduha specifična potrošnja toplote je manja. Utrošak toplote je najveći pri najmanjem $\Delta T = T_{gi} - T_{ge}$, a asimptotski se približava teorijskom utrošku sa porastom $\Delta T = T_{gi} - T_{ge}$. Budući da je realno korišćenje energije srazmerno razlici temperatura između ulaznog i izlaznog vazduha ($T_{gi} - T_{ge}$), podaci na ovoj slici sugeriraju zaključak da je sušnica sa fluidizovanim slojem utoliko termički efikasnija ukoliko se proces izvodi pri većoj razlici temperatura između ulaznog i izlaznog vazduha.



Slika 3.23. Specifična potrošnja toplote (doziranje tečne faze vode)



Slika 3.24. Specifična potrošnja vazduha

Specifični utrošak vazduha pri doziranju tečne faze vode je (slika 3.24), takođe, manji što je razlika temperatura ($T_{gi} - T_{ge}$) veća. Kada su ostvareni uslovi za ravnomerno sušenje i isparavanje vlage iz materijala koji se suši, što je niža temperatura vazduha na izlazu iz sušnice to je veće energijsko iskorišćenje rada sušnice i manja potrošnja agensa za sušenje. Sa slike 3.24 se uočava da podaci slede istu liniju.

3.5.4. Efikasnost procesa

Uspešnost rada sušnice, kao i radni režim u kom se odvija sušenje opisuju se pomoću različitih parametara, kao što su volumetrijska brzina isparavanja vlage, gubici toplote u okolinu, specifična potrošnja toplote i termička (energijska) efikasnost. Od svih navedenih parametara u tehničkoj literaturi se najčešće sreće parametar termičke efikasnosti, koji uglavnom povezuje količinu toplote iskorišćene za sušenje vlažnog materijala u sušnici sa ukupnom toplotom dovedenom u sušnicu, koja je obračunata u odnosu na temperaturu površine inertnih čestica (η'_T) /napr. Markowski, 1992/ ili u odnosu na temperaturu okoline (η_T) /napr. Pan i dr., 2001/ i definisana je sledećom jednačinom:

$$\eta'_T = \frac{(T_{gi} - T_{ge})}{(T_{gi} - T_p)}, \quad \text{ili} \quad \eta_T = \frac{(T_{gi} - T_{ge})}{(T_{gi} - T_{0A})} \quad (3.15)$$

Energijska efikasnost sistema se može opisati na različite načine. Generalno, bez obzira na definiciju efikasnosti, pri konvektivnom sušenju sa jednim prolazom agensa za sušenje (vazduha) kroz vlažni materijal, visoke efikasnosti se postižu na račun visoke temperature ulaznog vazduha i ostvarivanja uslova pri kojima je izlazni vazduh što je moguće bliži stanju zasićenja, odnosno, da bi se što potpunije iskoristio energijski potencijal ulaznog vazduha, sušenje bi trebalo da se izvodi na takav način da se stanje vazduha na izlazu iz uređaja što više približi stanju zasićenja vlagom. Na koji god način da se izrazi energijska efikasnost, ona u principu obuhvata kumulativne efekte.

Kudra /1998/ je predložio simultanu analizu lokalne (trenutne) i kumulativne efikasnosti sušenja i energijske efikasnosti u cilju boljeg sagledavanja performansi sušnice i optimizacije uređaja i procesa sa aspekta iskorišćenja energije. Energijska efikasnost (η_E) i efikasnost sušenja (η_D) su definisane i adaptirane za naš sistem preko sledećih izraza:

$$\eta_E = \frac{\text{Energija potrebna za isparavanje}}{\text{Ulaz energije}} = \frac{G_{H_2O,exp} r_w (naT_{ge})}{G_v C_{pg} (naT_{ge}) (T_{gi} - T_{0A})} \quad (3.16)$$

$$\eta_D = \frac{\text{Energija potrebna za isparavanje}}{\text{Ulaz energije} - \text{Izlaz energije}} = \frac{G_{H_2O,exp} r_w (naT_{ge})}{G_v C_{pg} (naT_{ge}) (T_{gi} - T_{ge})} \quad (3.17)$$

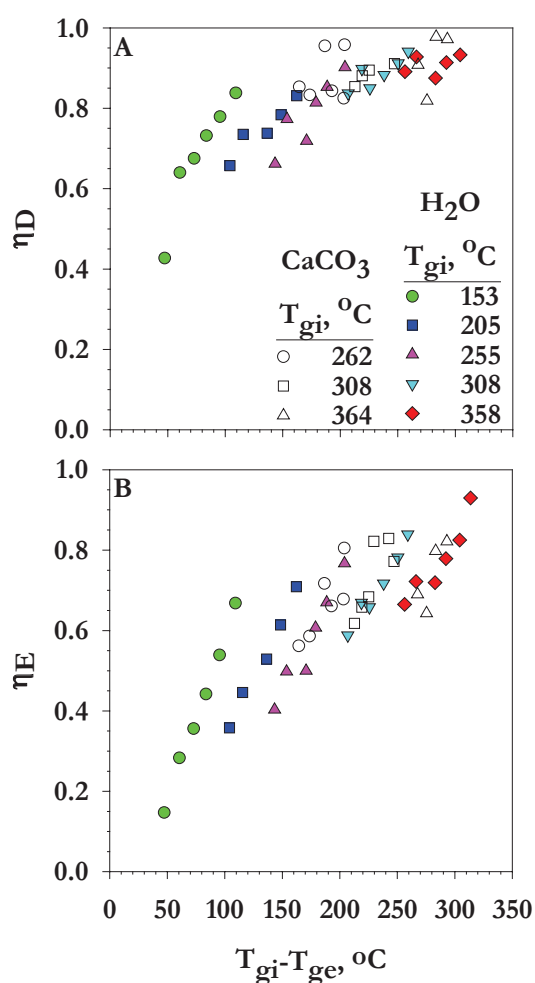
pri čemu je
$$\eta_T = \frac{\eta_E}{\eta_D}$$

Efikasnost sušenja (η_D) i energijska efikasnost (η_E), koje su originalno povezane sa sadržajem vlage u materijalu /Kudra, 1998/, u okviru ove analize su usvojene i adaptirane da se utvrdi njihova zavisnost od razlike temperatura vazduha na ulazu i izlazu iz sušnice $\Delta T = T_{gi} - T_{ge}$ (slike 3.25-A i 3.25-B). Adaptacija je izvršena u smislu usrednjavanja vrednosti efikasnosti sušenja (η_D) i energijske efikasnosti (η_E) za ulazne i izlazne uslove procesa (jednačine 3.16 i 3.17).

U svim ogledima u kojima je rađeno sa doziranjem tečne faze vode efikasnost sušenja (η_D) je varirala od 0.46 do 0.95, a vrednost energijske efikasnosti (η_E) se kretala od 0.14 do 0.90, u zavisnosti od temperature ulaznog vazduha. Visoke vrednosti za η_D i η_E odnose se na ogledu u kojima je temperatura izlaznog vazduha bila neznatno viša (nekoliko stepeni) od temperature adijabatskog zasićenja vazduha, što znači da je krajnji sadržaj vlage u vazduhu blizak maksimalnoj vrednosti, pri čemu je izlazni vazduh i dalje u nezasićenom stanju. U procesu sušenja CaCO_3 suspenzija vrednost η_D je varirala između 0.75 i 0.95, a vrednost η_E između 0.53 i 0.75.

Usrednjene vrednosti za η_D i η_E su veoma korisne sa aspekta poređenja različitih tipova sušnica. Razmatrajući samo podatke za sušenje vodene suspenzije CaCO_3 , proizilazi da su vrednosti za η_D i η_E relativno visoke u poređenju sa drugim sistemima za sušenje suspenzija /Kudra, 1998, 2000/. Ovo ukazuje na dobre performanse tehnologija zasnovanih na sušenju suspenzija nanošenjem na inertne čestice, bilo da se radi o sistemima sa fluidizovanim, fontanskim ili modifikovanim fontanskim slojem. Naime, raspršavanjem i nanošenjem suspenzije materijala koji se suši na inertne čestice u vidu tankog tečnog filma moguće je ostvariti veliku koncentraciju sušenog materijala u raspoloživoj zapremini sušnice. I povećanje površine za razmenu i povećanje koncentracije čestica sušenog materijala vode ka intenzifikaciji procesa u sušnici i povećanoj efikasnosti korišćenja energije, tj. povećan je efekat isparavanja vlage u odnosu na sisteme za sušenje bez inertnih čestica.

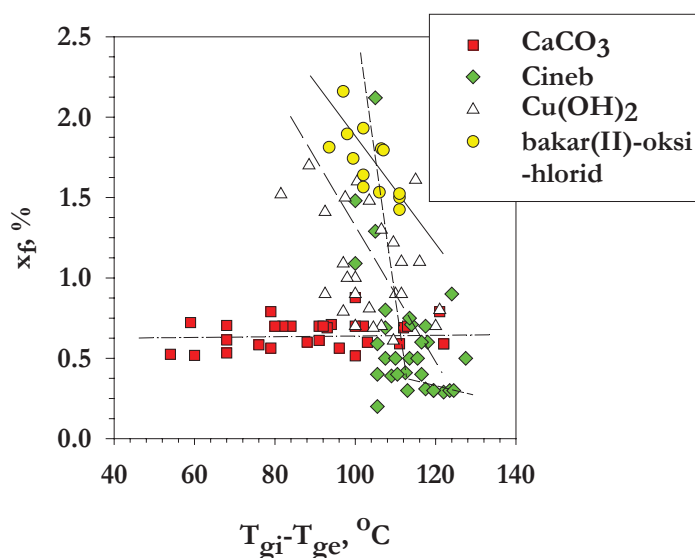
Efikasnost sušnice sa fluidizovanim slojem inertnih čestica može se ilustrovati podatkom da je tipični specifični kapacitet isparavanja vode kod komercijalnih sprej sušnica u proseku $5\text{--}25 \text{ kg}_{\text{H}_2\text{O}}/(\text{m}^2\text{h})$, a kod sušnica sa fluidizovanim slojem inertnih čestica i do $1000 \text{ kg}_{\text{H}_2\text{O}}/(\text{m}^2\text{h})$. Jedino su po kapacitetu isparavanja vode kompetitivne klasične pneumatske sušnice bez inertnih čestica ($250\text{--}1250 \text{ kg}_{\text{H}_2\text{O}}/(\text{m}^2\text{h})$), pri čemu treba imati u vidu da se uglavnom koriste za sušenje vlažnih prahova /AVP Dryer Handbook/.



Slika 3.25. Zavisnost efikasnosti sušenja (A) i energijske efikasnosti (B) od razlike temperatura

Termička efikasnost (η_T) obračunata u odnosu na temperaturu okoline (T_{0A}) prema jednačini (3.15) se u našem sistemu za sve izvedene ogledne kreće u intervalu od 0.911 do 0.344. U odnosu na vrednost termičke efikasnosti od $\eta_T \approx 0.3$ dobijenoj pri sušenju sojinog mleka u vibrofluidizovanom sloju inertnih čestica /Pan i dr., 2001/, za slične operativne uslove ($T_{gi} \approx 150^\circ\text{C}$) u ogledima sa doziranjem tečne faze vode u našem laboratorijskom sistemu je postignuta vrednost od $\eta_T \approx 0.25-0.48$, a u poluindustrijskom sistemu $\eta_T \approx 0.56$.

Da bi se obezbedila maksimalna efikasnost procesa pri zadatoj temperaturi ulaznog vazduha (T_{gi}), potrebno je temperaturu izlaznog vazduha (T_{ge}) održavati na što nižoj mogućoj vrednosti koja je ograničena kvalitetom produkta i kvalitetom fluidizacije. Najčešće je rezidualna vlaga produkta glavni kriterijum za vođenje procesa. Generalno sadržaj vlage u izlaznom prahu opada sa povećanjem temperature sušenja, kao što je prikazano na slici 3.26. Oblik prikazanih zavisnosti zavisi od karakteristika materijala koji se suši. U slučaju sušenja vodene suspenzije CaCO_3 na sadržaj rezidualne vlage u prahu temperatura izlaznog vazduha praktično nema uticaja (slika 3.26). Na slici 3.26 se može uočiti veće rasipanje podataka koje je posledica nemogućnosti održavanja apsolutno konstantnog protoka suspenzija.



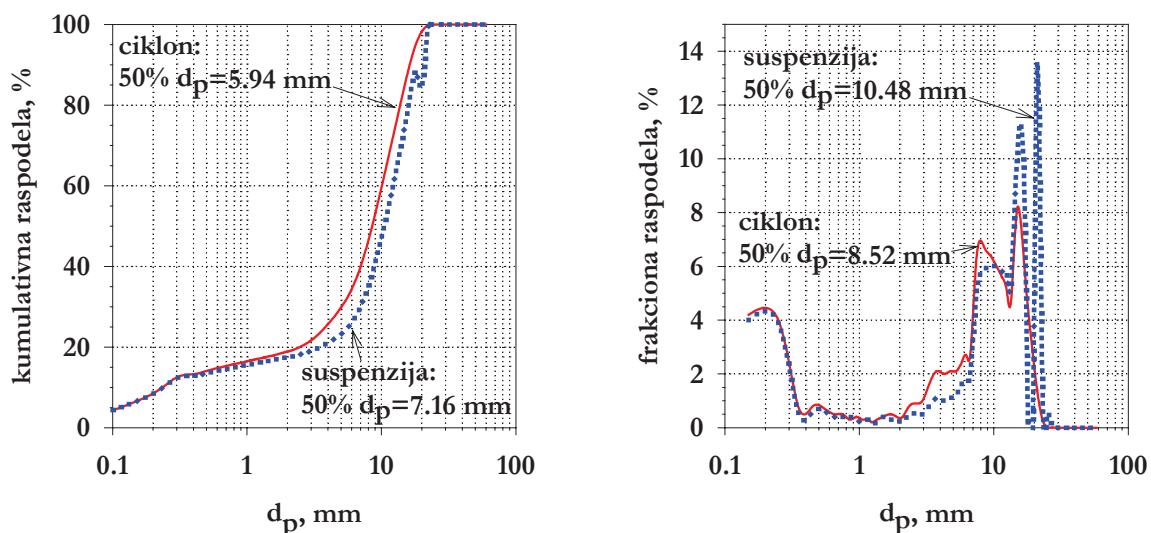
Slika 3.26. Sadržaj vlage u produktu u zavisnosti od temperature sušenja

S obzirom da rezidualna vlažnost praškastog produkta direktno zavisi od temperature sušenja, termička efikasnost opada ako se materijal suši do nižih sadržaja vlage. Termička efikasnost se povećava što je ulazni protok suspenzije veći jer je se povećava razlika temperatura ($T_{gi}-T_{ge}$) kada se ulazna temperatura vazduha održava konstantnom. U slučaju malog protoka suspenzije samo se deo energijskog potencijala vazduha koristi za isparavanje vlage, tako da temperatura izlaznog vazduha ostaje relativno visoka, a samim tim termička efikasnost je niska. Pri većim protocima suspenzije troši se veća količina toplote na isparavanje vlage što vodi porastu termičke efikasnosti. Ovo navodi na zaključak da protok suspenzije treba da bude što je moguće veći sa aspekta maksimalne termičke efikasnosti. Međutim, povećanjem protoka tečne faze snižava se temperatura sušenja i na taj način

povećava rezidualna vlažnost produkta. Pored toga, prekomerno uvođenje tečne faze može prouzrokovati defluidizaciju sloja. Stoga je optimalan onaj protok suspenzije pri kome se ostvaruje maksimalna termička efikasnost za zahtevanu rezidualnu vlažnost produkta. Termička efikasnost sušenja zavisi i od uslova okoline, s obzirom da se u našem sistemu kao gasoviti agens za sušenje koristi atmosferski vlažan vazduh. Tako će u zimskom periodu termička efikasnost rada sušnice biti manja usled povećanih toplotnih gubitaka u okolinu, kao i usled smanjenih potencijala vazduha za prenos toplote i primanje isparene vlage.

3.5.5. Efekat mlevenja i habanje inertnih čestica

Mehanizam sušenja tečnog filma nanetog na površinu inertne čestice obuhvata isparavanje vlage, sušenje filma, skidanje (otiranje) osušenog proizvoda sa površine čestica i drobljenja osušenog materijala usled intenzivnog mešanja u fluidizovanom sloju. Udeo pojedinih mehanizama u ukupnom procesu sušenja određuje granulometrijski sastav praškastog proizvoda i realno je očekivati izvestan stepen usitnjavanja materijala koji se tretira. Na primer, usled karakteristika Cineba trenje i sudari između inertnih čestica u sloju prouzrokuju izvestan stepen sitnjenja, s obzirom da je srednji prečnik čestica dobijenog praha ($8.52 \mu\text{m}$) manji od srednjeg prečnika čestica u polaznoj suspenziji ($10.48 \mu\text{m}$) (slika 3.27). U slučaju $\text{Cu}(\text{OH})_2$ i CaCO_3 suspenzija, granulometrijski sastav suvog praha je skoro identičan granulometrijskom sastavu polazne suspenzije. Prema tome, u većini aplikacija sušenja u pokretnom sloju inertnih čestica u daljem tehnološkom procesu može se izbeći naknadna operacija mlevenja.



Slika 3.27. Raspodela veličine čestica pri sušenju tehničkog Cineb fungicida u sloju staklenih sfera

U navedenim parcijalnim mehanizmima sušenja u fluidizovanom sloju bitnu ulogu ima i vrsta inertnih čestica, s obzirom da izbor čestica mora biti takav da obezbedi termičku stabilnost i odsustvo habanja inertnih čestica, kao i što je moguće bolje prijanjanje tečnog filma po površini čestica sa aspekta maksimalnog iskorišćenja kontaktne površine

raspoložive za prenos toplote i mase. Sa druge strane inertne čestice treba da imaju takvu površinu sa koje će se što lakše odvajati osušeni proizvod. Prema Vieira-i i dr. /2004/ inertne čestice koje imaju veliki kontaktni ugao pospešuju sušenje, pošto je manja adhezija između inertnih čestica i suspenzije. Takođe, geometrijski oblik inertnih čestica određuje efikasnost sušenja suspenzije ili oblaganja suspenzijom. Na osnovu saznanja iz literature najčešće se u praksi koriste sferične inertne čestice prečnika 1÷3 mm od stakla, keramike, bakra, aluminijuma, alumine (Al_2O_3), cirkonijum oksida (ZrO_2), zatim monodisperzne čestice različitih oblika od teflona, polistirena, polietilena i sl.

Tabela 3.6. Karakteristike različitih kuglica i kumulativni gubitak mase nakon 15 časova rada vertikalnog kugličng mlina /<http://www.jyoticeramic.com/>

Karakteristike	Y-ZrO ₂	Mg-ZrO ₂	ZrSiO ₄	Al ₂ O ₃	Staklo	Ce-ZrO ₂
Gustina, g/cm ³	6.0	5.73	3.84	3.70	2.25	6.22
Nasipna gustina, kg/dm ³	3.6	3.59	3.59	2.32	1.55	3.92
Tvrdoća po Moh-ovoj skali	9	8.5	7.5	9.0	5.5	8.0
Srednji prečnik čestica, mm	2.0	1.55	1.50	1.63	1.66	1.00
Sferičnost	> 0.98	0.94	0.97	0.87	0.98	0.94
Boja	biserno bela	zlatno žuta	bela	bela	transparentna	zelenkasta
Za primenu u mlinovima	odličan	dobar	prilično dobar	loš	loš	prilično dobar

Material	Cumulative mass loss (%)
Y-ZrO ₂	0.1
Mg-ZrO ₂	0.8
Ce-ZrO ₂	0.4
ZrSiO ₄	0.4
Al ₂ O ₃	6.0
Staklo	6.6

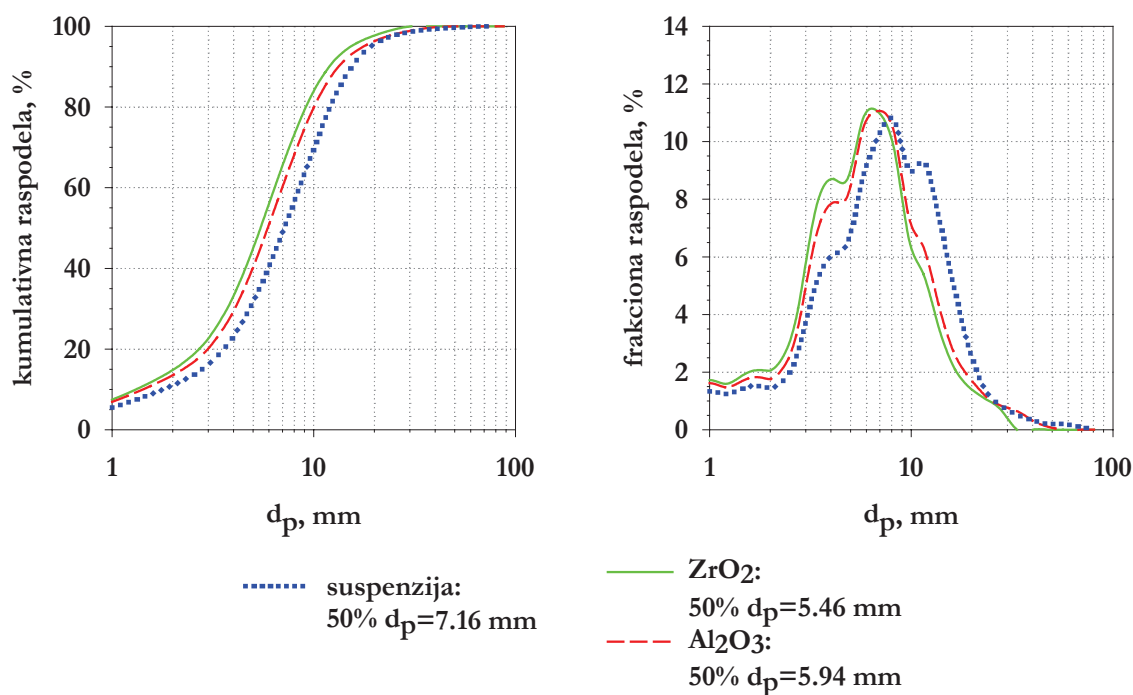
U našim eksperimentalnim sistemima (laboratorijskom i poluindustrijskom) su uspešno izvođeni ogledi sa monodisperznim staklenim sferama prečnika 0.84, 1.2 i 1.94 mm, kao i sa polietilenskim monodisperznim cilindričnim zrnima ekvivalentnog prečnika od oko 3.3 mm (pri nižim ulaznim temperaturama vazduha). Vizuelno nije opaženo mehaničko habanje korišćenih inertnih čestica posle dužeg vremenskog perioda. Za industrijsku primenu fluidizovanog sloja ne sme se zanemariti činjenica da postoji kumulativni efekat habanja inertnih čestica. U tabeli 3.6 su prikazane osnovne karakteristike nekoliko vrsta čestica korišćenih u vertikalnom laboratorijskom kugličnom mlinu, prema podacima firme Jyoticeramic-Japan. U istoj tabeli je prikazan i dijagram kumulativnog

gubitka mase pojedinih vrsta čestica nakon 15 časova neprekidne upotrebe u mlinu. Treba napomenuti da su uslovi pod kojima je testirano mehaničko habanje čestica u mlinu mnogo ekstremniji nego što je to slučaj pri fluidizaciji istih čestica, stoga je i gubitak mase čestica u fluidizovanom sloju znatno manji u odnosu na vrednosti date u tabeli 3.6.

Nekoliko ogleda sušenja vodene suspenzije Cineb fungicida uslužno je obavljeno na poluindustrijskom postrojenju firme NARA Machinery Co. Ltd., Frechen, Nemačka. U tabeli 3.7 su prikazane karakteristike tri vrste inertnih čestica: staklene sfere korišćene u našem poluindustrijskom sistemu i Al_2O_3 i ZrO_2 sfere korišćene u poluindustrijskoj sušnici sa fluidizovanim slojem u NARA Machinery Co. Ltd. za sušenje vodene suspenzije Cineb fungicida.

Tabela 3.7. Karakteristike inertnih čestica

Inertne čestice	d_p (mm)	ρ_p (kg/m^3)	U_{mf} 20°C (m/s)
Staklene sfere	1.2	2640	0.78
Al_2O_3 sfere	3	3400	1.76
Y- ZrO_2 sfere	2.8	7300	2.53



Slika 3.28. Raspodela veličine čestica pri sušenju suspenzije formulisanog Cineba u sloju Al_2O_3 i Y- ZrO_2 sfera

Ispitivanja u NARA Machinery Co. Ltd. su pokazala da između korišćenja staklenih i Al_2O_3 sfera nema bitnih razlika. Korišćenje teških Y- ZrO_2 sfera (ZrO_2 stabilisan itrijumom) obezbeđuje u određenom stepenu niži granulometrijski sastav izlaznog praha. Slika 3.28 pokazuje rezultate ispitivanja sušenja vodene suspenzije formulisanog Cineb fungicida izvedenih u NARA Machinery Co. Ltd.. Uočava se da je sa sferama Al_2O_3 99%

čestica praha Cineba ispod 24.25 μm , dok je sa sferama Y-ZrO₂ 99% čestica praha Cineba ispod 14.80 μm .

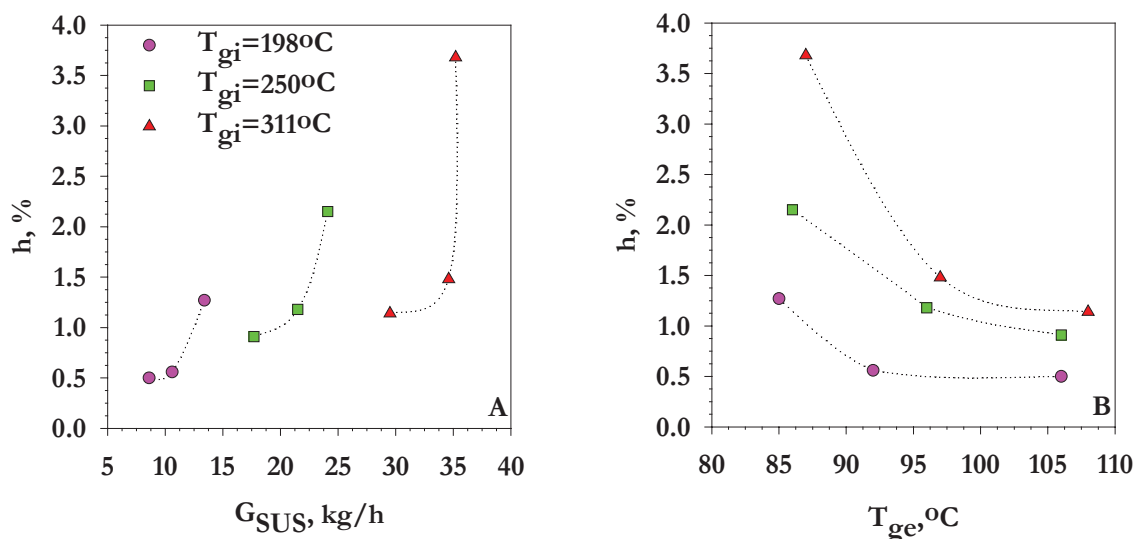
3.5.6. Zadržavanje produkta u sloju (“hold-up”)

Pregledom literature zapaženo je da ispitivanja sušenja različitih vrsta vlažnih materijala ukazuju da postoji značajna akumulacija produkta na površini inertnih čestica. Prema tome, na produktivnost sušnice značajno utiče proces otiranja produkta sa površine inertnih čestica čija dinamika zavisi od stepena adhezivnosti (lepljivosti), pucanja osušene skrame, otiranja osušenog produkta i sličnih fenomena /Vieira i dr., 2004; Leontieva i dr., 2002; Spitzner-Neto i dr., 2002/. Naročito ozbiljni problemi mogu nastati pri sušenju suspenzija velikog viskoziteta ili kada se tokom sušenja materijala formiraju pseudo-plastični filmovi, kao što je slučaj sa voćnim kašama /Reyes i dr., 1998/. Stoga se često koristi mehanička agitacija, koja pospešuje otiranje produkta sa inertnih čestica i istovremeno sprečava pojavu kanalsanja gasa i formiranje klipova inertnih čestica i gasa u fluidizovanom sloju. Pošto se stacionarnost procesa može postići samo u slučaju kad je vreme sušenja kraće od vremena oblaganja inertnih čestica suspenzijom /Kutsakova, 2004/, poznavanje stepena zadržavanja produkta u sloju i srednjeg nominalnog vremena zadržavanja u sušnici je od izuzetnog značaja.

U nekoliko ogleda određivano je zadržavanje (“hold-up”) materijala koji se suši u sloju inertnih čestica analizom uzoraka materijala iz sloja. Pre svakog ogleda je kroz sloj uveden vazduh sa podešenom vrednosti temperature i brzine do uspostavljanja termičke ravnoteže u sloju. Kada su vrednosti temperatura ulaznog i izlaznog vazduha bile približno konstantne, počinjalo je doziranje suspenzije. Po dostizanju stacionarnih uslova procesa, ogledi su izvođeni još 10-15 minuta. Nakon toga je zaustavljan protok vazduha i protok suspenzije u kratkom vremenskom periodu da bi se uzeli uzorci iz sloja. Masa zadržanog sušenog materijala u uzorku je određena iz razlike mase inertnih čestica sa “hold-up”-om i mase čistih inertnih čestica. U ovim ogledima su korišćene suspenzije Cineba i CaCO₃. Statička visina sloja krupnijih inertnih čestica ($d_p = 1.94 \text{ mm}$) je bila 0.11 m, a odgovarajuća masa sloja je iznosila 5.54 kg. Za sitnije inertne čestice ($d_p = 0.93 \text{ mm}$) ove vrednosti su bile 0.8 m i 4.6 kg, respektivno.

U tabeli 3.8 su prikazani operativni uslovi i reprezentativni rezultati opisanih ogleda, dok je na slici 3.29 prikazana promena stepena zadržavanja materijala u sloju (“hold-up”) u zavisnosti od protoka suspenzije i temperature sušenja (temperature vazduha iznad sloja). Za inertne čestice prečnika $d_p = 1.94 \text{ mm}$ “hold-up” sušenog materijala varira između 0.50 i 3.68% u odnosu na ukupnu masu uzorka iz sloja. “Hold-up” sušenog materijala u sloju se smanjuje sa porastom temperature izlaznog vazduha (T_{ge}) pri konstantnoj temperaturi ulaznog vazduha, što je u saglasnosti sa zapažanjem da rezidualna vlaga praha takođe opada sa porastom temperature izlaznog vazduha (slika 3.26). Najverovatnije i sadržaj vlage sušenog materijala koji okružuje inertnu česticu opada sa povećanjem T_{ge} (slika 3.29-B), stoga je

opravdano očekivati da ovaj sadržaj vlage direktno utiče na adhezivnost i “hold-up” u sloju /Leontieva i dr., 2002/. “Hold-up” sušenog materijala se povećava sa povećanjem protoka suspenzije, što se i očekivalo (slika 3.29-A, tabela 3.8). Kritične vrednosti protoka suspenzije, nakon kojih dolazi do naglog porasta “hold-up”-a sušenog materijala, za tri seta podataka pri konstantnim ulaznim temperaturama su aproksimativno 11 kg/h, 22 kg/h i 34 kg/h. Za inertne čestice prečnika $d_p = 0.93$ mm “hold-up” sušenog materijala je znatno veći (5 - 8%).



Slika 3.29. Uticaj protoka suspenzije, temperature ulaznog i izlaznog vazduha na “hold-up” materijala (suspenzija Cineb fungicida)

Tabela 3.8. Zadržavanje (“hold-up”) osušenog materijala u sloju inertnih čestica

Inertne čestice d_p , mm	Suspenzija	U_0 m/s	G_{SUS} kg/h	T_{gi} $^{\circ}C$	T_{ge} $^{\circ}C$	h %	δ_f μm	ϕ_p kg/m ²
0.93	Cineb, $x_0=0.70$	2.10	25.5	195	67	7.10	52.0	0.029
1.94	CaCO ₃ , $x_0=0.70$	1.65	29.3	308	101	1.70	24.9	0.014
1.94	Cineb, $x_0=0.67$	1.70	35.2	311	87	3.68	56.2	0.030
			34.6	311	97	1.48	23.4	0.012
			29.5	311	108	1.14	18.1	0.009
			24.1	250	86	2.15	33.6	0.017
			21.5	250	96	1.18	18.7	0.010
			17.7	250	106	0.91	14.5	0.007
			13.4	198	85	1.27	20.1	0.010
			10.6	198	92	0.56	9.0	0.005
8.6	198	106	0.50	8.0	0.004			

U tabeli 3.8 je za ove čestice ($d_p = 0.93$ mm) naveden samo jedan podatak, s obzirom da za njih nisu određivani hidrodinamički parametri. Masa produkta zadržana na površini inertnih čestica (ϕ_p) varira između 0.03 i 0.01 kg/m². Pod pretpostavkom da je gustina materijala koji se nalazi na površini inertne čestice jednaka aritmetičkoj sredini gustina suspenzije i praha, može se odrediti hipotetička debljina filma vlažnog materijala (δ_f) kojom je obložena inertna

čestica. Iz proračuna proizilazi da hipotetička debljina filma varira između 8 i 50 μm . Ova dva parametra su računata prema sledećim izrazima:

$$\delta_f = 1000 \frac{d_p [\text{mm}]}{2} \left(\sqrt[3]{1 + \frac{h[\%] \rho_p}{100 \rho_{vm}} - 1} \right) \quad (3.18)$$

$$\Phi_p = \frac{M_{sl} h[\%]}{100 A_p [\text{m}^2]} \quad (3.19)$$

Vrednosti debljina slojeva u našim ogledima su niže u odnosu na vrednosti od 60 do 200 μm na teflonskim kockama (3-5 mm) dobijenim pri sušenju životinjske krvi i homogenizovanog žumanceta i belanceta u fluidizovanom sloju /Mujumdar i Kudra, 2002/. Najverovatnije je razlika u tome što su sušeni znatno lepljiviji materijali i što inertne čestice nisu sfernog oblika, i pored toga što su od teflona (manji stepen adhezije u odnosu na staklo /Pan i dr., 2001/), pa je otiranje produkta otežano.

Mehaničko otiranje osušenog produkta sa inertne čestice određuje srednju debljinu sloja na inertnoj čestici, a samim tim i “hold-up” produkta u fluidizovanom sloju, koji uglavnom nije konstantan s obzirom da zavisi od procesnih parametara. Usled toga mehaničko otiranje osušenog produkta nije jednostavno opisati kvantitativno. Ono prvenstveno zavisi od adhezivnih karakteristika materijala koji se suši. Što je viskozitet sušenog materijala veći to će biti izraženiji stepen zadržavanja produkta u sloju /Spitzner-Neto i dr., 2002/. Pored toga, za različite vrste inertnih čestica će biti i različit “hold-up” istog materijala u sloju. Pan i dr. /2001/ su zapazili da je “hold-up” sojinog mleka na teflonskim sferoidima manji za 15% u odnosu na “hold-up” u sloju staklenih sfera. Stabilnost procesa sušenja zavisi od brzine otiranja sušenog materijala i odnošenja suvog praha iz sloja. U slučaju da nisu uspostavljeni stacionarni uslovi, tj. nije uspostavljena ravnoteža između brzine sušenja vlažnog materijala i brzine otiranja osušenog produkta, sušenje veoma lako prelazi u kotiranje i aglomeraciju inertnih čestica. Sistemi sa fluidizovanim slojem se koriste u praksi za procese kotiranja i aglomeracije, međutim u našem slučaju to je predstavljalo neželjen efekat. Ako nema prekomernog “hold-up”-a produkta u sloju, sušenje se može izvoditi u stabilnom režimu uz optimalno podešene radne parametre.

3.5.7. Srednje vreme zadržavanja produkta u sloju

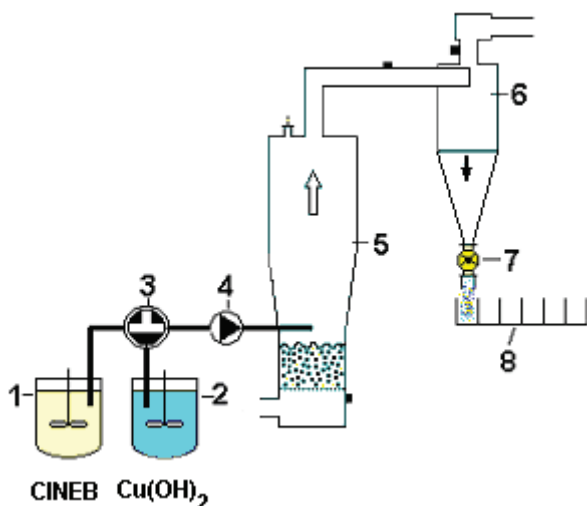
Značajno je napomenuti da je nakon sušenja vodene suspenzije Cineba u fluidizovanom sloju inertnih čestica sadržaj aktivne materije najmanje 3% veći u odnosu na vrednosti dobijene pri sušenju u postojećim industrijskim tunelskim sušnicama. U tunelskim sušnicama prosečno vreme sušenja na 80°C iznosi 48 časova, dok je u fluidizovanom sloju inertnih čestica nominalno vreme zadržavanja sušenog materijala veoma kratko. U tabeli 3.9 su prikazane vrednosti sadržaja vlage i aktivne materije u suvom produktu nakon sušenja suspenzije tehničkog Cineba. Na osnovu podataka iz tabele se može uočiti da je pri izvođenju procesa pod optimalnim uslovima zadovoljen primarni uslov za sušenje pesticida,

odnosno da je sadržaj vlage u prahu ispod 1%, i da nije došlo do degradacije produkta, tj. sadržaj aktivne materije je visok (92-99%). Treba napomenuti da su ispitivanja na poluindustrijskoj sušnici pokazala da je vlažnost praha iz vrećastog filtera nešto veća od vlažnosti praha iz ciklona, od 0.1 do do 1%, verovatno zbog dužeg zadržavanja čestica na vrećama, tako da su izložene dužem kontaktu sa vlažnim vazduhom pri čemu dolazi do sorpcije vlage iz vazduha. Ova pojava nema značajnijeg uticaja, s obzirom da se u proseku 95% od ukupne količine praškastog produkta izdvoji u ciklonu.

Tabela 3.9. Sadržaj vlage i sadržaj aktivne materije u osušenom prahu Cineba

ciklon	x_{f_5} , %	0.8	0.69	0.71	0.6	0.39	0.29	0.3	0.5	0.2	0.59	0.4	0.5	0.5	0.4
vrećasti filter	x_{f_5} , %	1.21	0.7	0.7	0.7	0.9									
ciklon	%AM	96.37	97.13	96.22	98.9	97.78	98.69	98.18	98.8	98.2	98.8	98.3	94.5	93.8	92
vrećasti filter	%AM	96.52	95.85	97.9	93.3	94.86									

U cilju određivanja nominalnog vremena zadržavanja sušenog materijala u fluidizovanom sloju inertnih čestica izvršeni su ogledi sa stepenastom promenom boje suspenzije koja se dozira u eksperimentalnom sistemu prikazanom na slici 3.30.



Slika 3.30. Šematski prikaz eksperimentalnog postupka za određivanje nominalnog vremena zadržavanja produkta u sloju

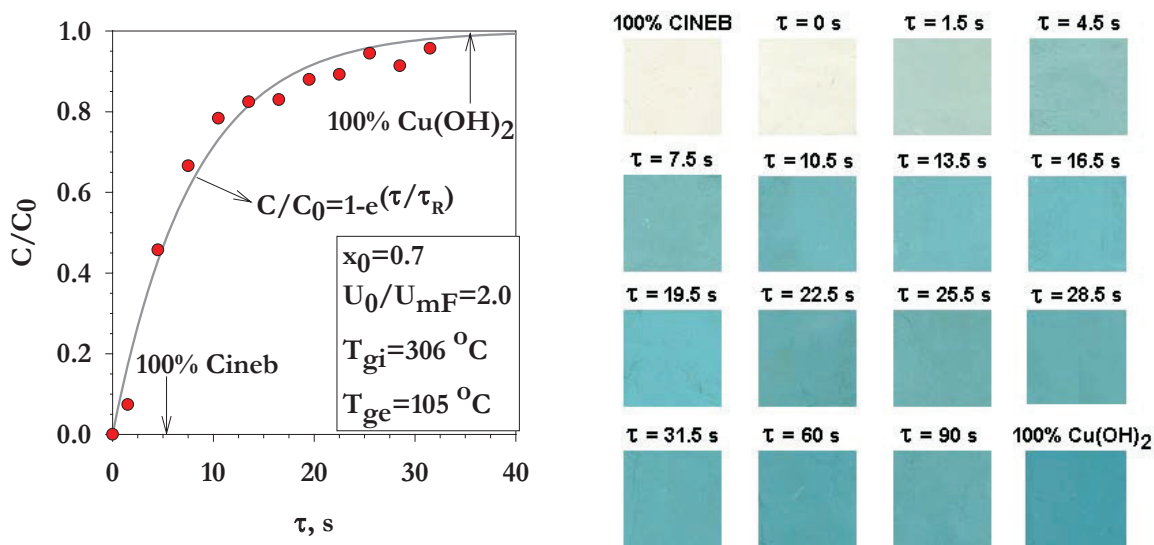
1-rezervoar suspenzije Cineb fungicida, 2-rezervoar suspenzije $\text{Cu}(\text{OH})_2$, 3-trokraki ventil, 4-peristaltička pumpa, 5-fluidizaciona kolona, 6-ciklon, 7-rotacioni ventil, 8- komora za uzorkovanje praha

nominalno vreme zadržavanja sušenog materijala u sloju oko 8 s, što indicira da se usled vrlo kratkog vremena boravka mogu uspešno sušiti i termoosetljivi materijali.

S obzirom da "hold-up" sušenog materijala varira sa promenom temperature izlaznog vazduha i protoka suspenzije (tabela 3.8), opravdano je očekivati da će isti parametri uticati i na raspodelu vremena zadržavanja praha, mada je uobičajeno vreme zadržavanja do nekoliko desetina sekundi. U toku izvođenja oglada prosečno vreme sušenja, od početka doziranja suspenzije do pojave praha na izlazu, iznosi oko 1 min. Zbog ovako kratkog vremena

U ovu svrhu se u toku sušenja suspenzije Cineba (beli prah) skoro trenutno prelazilo na doziranje suspenzije $\text{Cu}(\text{OH})_2$ (plavi prah) pomoću trokrakog ventila (3, slika 3.30). Uzorkovanje praha na izlazu iz ciklona pomoću specijalno dizajnirane komore (8) je vršeno u kratkim vremenskim intervalima (3 sekunde). Analiza uzoraka je izvršena pomoću SigmaScan softvera /SigmaScan, 1993/. Sadržaj $\text{Cu}(\text{OH})_2$ praha u svakom uzorku je određen na osnovu merenja intenziteta boje i na slici 3.31 je dat odziv sistema na stepenastu promenu. Na osnovu dobijenog odziva zapaža se da se sistem ponaša kao reaktor sa idealnim mešanjem, u odnosu na sušeni materijal. U ovom ogledu je

boravka, sistem je pogodan za tretiranje termički osetljivih suspenzija i pasta pri adekvatno podešenim operativnim uslovima. Dobijeni rezultati su u saglasnosti sa podacima za sušenje u vrtložnom sloju inertnih čestica /Kudra i Mujumdar, 2002, tabela 4.2/, gde za sušenje životinjske krvi i svežih jaja navedena vremena zadržavanja produkta od 30 do 85 s. Takođe, odziv našeg sistema je uporedljiv sa odzivom fluidizovanih slojeva inertnih čestica sa i bez mehaničke agitacije na stepenastu promenu u procesu sušenja smeša karbohidrata pomoću obeležene supstance /Reyes i dr., 2001/. Rezultati Reyes-a i dr. /2001/ ukazuju da se obeležena supstanca detektuje na izlazu iz sušnice nakon kratkog vremena, pri čemu njena koncentracija dostiže maksimalnu vrednost u toku prvih nekoliko minuta.

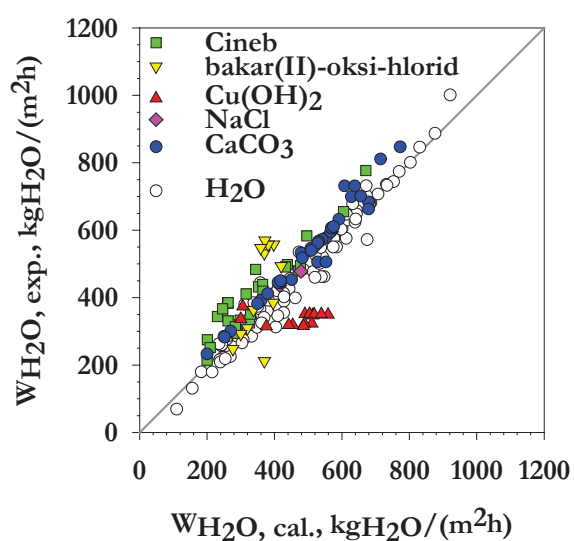


Slika 3.31. Odziv sistema na stepenastu promenu boje suspenzije

3.5.8. Poređenje eksperimentalnog i izračunatog kapaciteta isparavanja

Za definisanu geometriju fluidizovanog sloja (A_c), protok vazduha, tj. površinska brzina vazduha, proizilazi iz hidrodinamike fluidizovanog sloja i obično treba da bude 2 do 3 puta veća od minimalne brzine fluidizacije (U_{mF}). Pošto je izlazna temperatura vazduha (T_{ge}) izabrana na osnovu termičke stabilnosti materijala koji se suši i zahtevanog sadržaja rezidualne vlage u produktu, iz jednačine (3.9) se dobija jednostavna zavisnost između ulazne temperature vazduha (T_{gi}) i specifične brzine isparavanja vode (W_{H_2O}).

Na slici 3.32 je prikazano poređenje eksperimentalnih podataka sa vrednostima W_{H_2O} dobijenim iz proračuna korišćenjem procenjene vrednosti za specifični toplotni kapacitet suve materije $C_{pm} \approx 0.85$ kJ/kg°C. Srednje apsolutno odstupanje između eksperimentalnih i izračunatih vrednosti iznosi 5.8%, pri čemu su za 85% podataka odstupanja u intervalu od $\pm 10\%$. Sa slike se može uočiti da je veće odstupanje eksperimentalnih od izračunatih vrednosti u slučaju suspenzija, naročito za suspenzije Cu(OH)₂ i bakar(II)-oksi-hlorid. S obzirom da su jednačinom (3.9) obuhvaćeni gubici toplote u okolinu prirodnom konvekcijom i zračenjem (aproksimativno procenjeni), razlike između eksperimentalnih i



Slika 3.32. Poređenje eksperimentalnih i izračunatih vrednosti specifične brzine isparavanja vode

dobijenih pri sušenju sojinog mleka na teflonskim česticama u vibrofluidizovanom sloju ($H/D_c=0.7$), pri sličnim uslovima ($T_{gr} \approx 150^\circ\text{C}$) pri doziranju tečne faze vode u našem sistemu ($H/D_c = 0.5$) je postignut veći kapacitet isparavanja vode od $295 \text{ kgH}_2\text{O}/\text{hm}^2_{\text{sloja}}$. U slučaju laboratorijske sušnice ($H/D_c = 0.8$) koja je približnije geometrije sistemu iz rada Pan-a i dr. /2001/, pri sličnim uslovima je postignut kapacitet isparavanja vode od $80 \text{ kgH}_2\text{O}/\text{hm}^2_{\text{sloja}}$, što je približno jednako maksimalnoj vrednosti objavljenoj u radu Pan-a i dr. /2001/.

3.5.9. Sušenje lepljivih materijala

Osnovni nedostatak predstavljenog sistema je nepoželjna pojava sinterovanja (slepljivanja) inertnih čestica pri sušenju nekih materijala i uspostavljanje ekstremnih operativnih uslova, tj. promena brzine doziranja suspenzije /Kudra i dr., 1989/, ili izlazne temperature vazduha (slika 3.26) usled čega dolazi do naglog porasta sadržaja vlage. Posledica toga je neravnomerna raspodela temperature, njen nagli porast i paljenje sloja. Nastali krupni aglomerati remete hidrodinamiku sistema. Primena fluidizovanog sloja inertnih čestica za sušenje materijala koji sadrže ugljene hidrate i masnoće je praktično nemoguća s obzirom da lepljivost tih materijala vodi ka nestabilnosti procesa, osim u slučajevima gde se dodaju razni aditivi /Benali i Amazouz, 2002/ koji smanjuju adhezivnost. Sušenje termoosteljivih i bioloških materijala još uvek predstavlja veliki izazov usled njihove degradacije. Nekoliko faktora koji potiču iz mehanizma sušenja utičaće na pozitivne ili negativne rezultate pri tretmanu ovakvih materijala:

- mehaničko dejstvo inertnih čestica usled sudara između zida kolone i sloja inertnih čestica, između samih inertnih čestica i trenja usled cirkulacije inertnih čestica u sloju. Ovi

izračunatih vrednosti potiču najverovatnije usled nemogućnosti održavanja apsolutno konstantnog protoka suspenzije i apsolutno konstantne i temperature i protoka ulaznog vazduha. Takođe, moguće je da u svim ogleđima nisu do kraja bili uspostavljeni stacionarni uslovi.

Generalno, specifični kapaciteti isparavanja vode ostvarene u poluindustrijskoj sušnici sa fluidizovanim slojem inertnih čestica su vrlo visoke i iznose od 69 do $1000 \text{ kgH}_2\text{O}/\text{hm}^2_{\text{sloja}}$ (pri doziranju tečne faze vode) i od 212 do $896 \text{ kgH}_2\text{O}/\text{hm}^2_{\text{sloja}}$ (pri sušenju različitih suspenzija), zavisno od uslova ogleđda. U odnosu na vrednosti od 34-86 $\text{kgH}_2\text{O}/\text{hm}^2_{\text{sloja}}$ u radu Pan-a i dr. /2001/

procesu zavise od protoka vazduha, mase i osobina inertnih čestica, kao i od geometrije i konfiguracije sušnice,

- termički efekti usled različitih mehanizama prenosa toplote, koji zavise od brzine prenosa toplote, hidrodinamičkih karakteristika sloja, osobina sušenog materijala i konfiguracije sušnice,
- efekat akumulacije sušenog materijala u sloju, koji zavisi od reoloških osobina sušenog materijala.

U tom smislu se na različite načine kvantifikuju rizici degradacije produkta, tj. rizici gubitka kvaliteta produkta /Mujumdar i Kudra, 2002/.

Sušenje nekoliko organskih i bioloških materijala (kalcijum(II)-stearat, vinska kiselina, pivski kvasac, sojino mleko i njihove smeše, lipozomi, paradajz sok, sveža jaja, skrob) su bile neuspešne u našem sistemu sa fluidizovanim inertnim slojem. U ovim probama je došlo do kanalisanja vazduha kroz sloj posle svega nekoliko minuta, pri čemu vreo ulazni vazduh dospeva direktno u gornji deo komore za sušenje do regulatora temperature TIC2, koji je spregnut sa sistemom za doziranje materijala. Dolazi do poremećaja rada sistema za doziranje, tj. usled naglog porasta izlazne temperature vazduha doziranje suspenzije u ovakav sloj se nastavlja. Posledica ovoga je “plavljenje” sloja sa suspenzijom i prestanka fluidizacije nakon vrlo kratkog vremena. Usled navedenih nedostataka sistema, sušenje svakog potencijalnog preparata se mora testirati na laboratorijskom nivou.

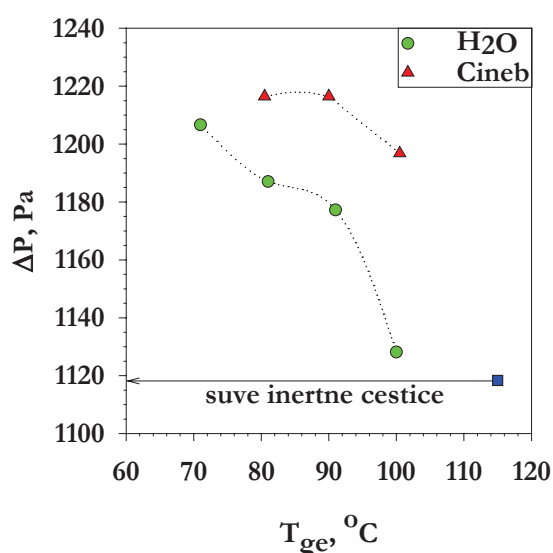
Takođe, važno je napomenuti da u nekim slučajevima nije dovoljno kratkotrajno testiranje za donošenje verodostojnih zaključaka. Na primer, sušenje suspenzija formulisanih preparata na bazi Cineba i bakar(II)-hidroksida na poluindustrijskom postrojenju nije uspelo. U pitanju su preparati kojima su dodavani razni aditivi (disperganti, okvašivači, punioci, itd.). U slučaju formulisane Cineb C-65 suspenzije (smeša tehničkog Cineba, kaolina, tenziofiksa i supražila) i premiksa Cineba C-65 (bez kaolina) posle 3-4 i 6 časova rada, respektivno, zapaženi su prvi simptomi nestabilnog rada sistema, najverovatnije usled kumulativnog efekta akumulacije sušenog materijala u inertnom sloju. Vrlo brzo posle otpočinjanja nestabilnog rada sistema je dolazilo do kanalisanja vazduha kroz sloj. Usled velike inertnosti sistema za zagrevanje vazduha, deo sloja inertnih čestica koji je nepokretan je bio u direktnom kontaktu sa vrelim dnom komore za sušenje (pločom distributora), a krajnja posledica ove pojave je paljenje sloja. U slučaju formulisanog bakar(II)-hidroksida, pored stvaranja praškastog proizvoda, deo sloja inertnih čestica se aglomeriše na taj način što se inertne čestice oblažu vrlo tvrdim i teško rastvornim slojem bakar(II)-hidroksida. Aglomerati su veličine 5-10 mm i remete hidrodinamiku sistema. Imajući u vidu da formulisani preparati sadrže u sebi zapaljivu komponentu (tenziofiks) kao i lepljivu komponentu (kaolin), potrebna su dopunska ispitivanja, bez kojih je nemoguće garantovati uspešno sušenje formulisanih preparata u kontinuitetu.

3.5.10. Uticaj prisustva tečne faze na pad pritiska u sloju inertnih čestica

Stabilni radni režim sušnice se može ostvariti kad je brzina uklanjanja filma suspenzije sa površine inertne čestice veća ili u krajnjem slučaju jednaka brzini doziranja suspenzije. S obzirom da postoje različite vrste materijala koje se mogu sušiti, složenost procesa sušenja na inertnim česticama proističe iz adhezivnih sila između vlažnih inertnih čestica, koje utiču na fluido-dinamičke karakteristike sloja. U tom smislu su izvršena ispitivanja uticaja prisustva tečne faze u fluidizovanom sloju inertnih čestica u poluindustrijskom uređaju na pad pritiska pri doziranju tečne faze vode i sušenju vodene suspenzije Cineba. Ogledi su izvedeni pri približno konstantnom protoku ($\approx 145 \text{ m}^3/\text{h}$) i temperaturi ulaznog vazduha ($\approx 300^\circ\text{C}$), na različitim temperaturama sušenja (100°C , 90°C , 80°C i 70°C). U tabeli 3.10 su prikazani eksperimentalni rezultati izvršenih ispitivanja.

Tabela 3.10. Rezultati ispitivanja uticaja prisustva tečne faze na pad pritiska u sloju inertnih čestica

Broj ogleada	Suspenzija	x_0 kg _{H₂O} /kg _{SUS}	V_0 m ³ /h	T_{gi} °C	T_{ge} °C	ΔP_{sloj} Pa
0	suve staklene sfere ($d_p=1.94\text{mm}$)	-	141.2	294	115	1118.34
1	voda	1	143.1	307	100	1128.15
2	voda	1	150.3	308	91	1177.20
3	voda	1	146.7	303	81	1187.01
4	voda	1	148.5	299	71	1206.63
5	Cineb	0.74	148.5	295	100.5	1196.82
6	Cineb	0.74	143.1	298	90	1216.44
7	Cineb	0.74	141.2	299.5	80.5	1216.44



Slika 3.33. Pad pritiska u sloju inertnih čestica pri doziranju vode i sušenju suspenzije Cineba u zavisnosti od temperature sušenja

Na osnovu podataka za pad pritiska u sloju inertnih čestica u funkciji temperature sušenja, prikazanih na slici 3.33, može se uočiti da se generalno pad pritiska u sloju u prisustvu tečne faze povećava u odnosu na pad pritiska u sloju suvih inertnih čestica sa smanjenjem temperature sušenja. Sa slike 3.33 se može uočiti neznatno povećanje pada pritiska od 0.9% na $T_{ge}=100^\circ\text{C}$ pri isparavanju vode. U slučaju sušenja suspenzije Cineba pri približno istim radnim uslovima ovo povećanje je izraženije i iznosi 7%, što se može pripisati većem stepenu adhezije suspenzije Cineba na

površini inertnih čestica, kao i izraženijim kohezionim silama između vlažnih inertnih čestica. Smanjenjem temperature sušenja, samim tim povećanjem protoka tečne faze (vode ili suspenzije Cineba), povećava se pad pritiska u odnosu na sloj suvih inertnih čestica. Na osnovu trenda podataka za vodu i suspenziju Cineba sa slike 3.33 se može uočiti da se pri većim protocima tečne faze razlika u povećanju pada pritiska smanjuje, što ukazuje na to da pri određenom stepenu okvašenosti sloja inertnih čestica razlike u osobinama materijala koji se suše imaju sve manji uticaj. Pri većim protocima suspenzije Cineba, odnosno nižim temperaturama sušenja, uočeno je neznatno smanjenje intenziteta (kvaliteta) fluidizacije, tako da sušenje na $T_{ge}=70^{\circ}\text{C}$ nije izvedeno. Na osnovu dobijenih rezultata se uopšteno može zaključiti da povećanje pada pritiska u prisustvu tečne faze u sloju koje potiče od vrste sušenog materijala i kohezivnih sila između vlažnih inertnih čestica, nije drastično, tj. kreće se u granicama od 0.9 do 7.9% za vodu i od 7.0 do 8.8% za suspenziju Cineba.

Na osnovu prikazanih rezultata ispitivanja sušenja na uvećanom laboratorijskom postrojenju može se konstatovati, kao i za laboratorijski uređaj, da sistem radi stabilno i da ga karakteriše visoka efikasnost. Specifična isparljivost je vrlo visoka od 69 do 1000 $\text{kg}_{\text{H}_2\text{O}}/\text{hm}^2_{\text{sloja}}$ pri doziranju vode i od 212 do 896 $\text{kg}_{\text{H}_2\text{O}}/\text{hm}^2_{\text{sloja}}$ pri sušenju suspenzija, zavisno od uslova pod kojim su izvođeni ogledi. Iskorišćenje energijskog potencijala vazduha je, takođe, vrlo visoko. Vlažnost vazduha se na putu kroz sloj poveća od 4 do 11 puta, zavisno od uslova oglada. Visoka efikasnost u pogledu specifičnog utroška toplote (q) i specifičnog utroška vazduha (SV) potiče od visoke razlike temperatura između ulaznog vazduha i sloja ($T_{gr}-T_{ge}$), pri čemu se temperatura sloja održava na zahtevanoj vrednosti. U svim ogledima sušenja suspenzija, vlažnost dobijenog praha, kao i sadržaj aktivne materije su uglavnom bili u zadovoljavajućim granicama. Produkt se dobija u vidu suvog tečljivog praha za razliku od tunelskih sušnica gde se dobija u vidu suvog kolača, koji se u zavisnosti od vrste materijala spontano ili uz utrošak dopunske energije dezintegriše. Pored toga, granulometrijski sastav produkta je nešto niži od granulometrijskog sastava polazne suspenzije. Na ovaj način u daljem tehnološkom procesu najčešće nije potrebno obavljati operaciju mlevenja.

Industrijski prototip, koji je realizovan na osnovu istraživanja prikazanih u ovom radu nalazi se u eksploataciji od marta 2003. god., u potpunosti je u skladu sa predviđenim procesnim parametrima. Centralni deo sistema je fluidizaciona kolona prečnika 800 mm. Pri ulaznoj temperaturi vazduha od 292°C , temperaturi sušenja od 105°C i protoku vazduha od $2.12 \text{ m}^3_{\text{N}}/\text{s}$ ostvaruje se proizvodni kapacitet od 8.05 t suve materije za 24 h, polazeći od suspenzije sa 65% vode. Može se uočiti da jedan relativno mali fluidizacioni uređaj zamenjuje veoma veliku komoru za sušenje. Efektivna površina fluidizacione kolone je oko 700 puta manja od potrebne površine tava za sušenje za isti kapacitet. Ostvarena je ušteda energije za sušenje od najmanje 50% u odnosu na raniju tehnologiju sušenja, što je ekvivalentno uštedi od oko $825 \text{ m}^3_{\text{N}}$ prirodnog gasa dnevno. Ukupni ekonomski efekti, pored uštede u energiji za sam proces sušenja, uključuju i uštedu aktivne materije, eliminaciju troškova energije za mlevenje produkta, a potreban je i znatno manji broj rukovaoca usled automatskog rada postrojenja.

3.6. DOSUŠIVANJE PRAHA

Higroskopnost praškastog produkta je jedna od osobina materijala koja ne bi trebalo da se zanemari pri izvođenju sušenja. Ako se higroskopni materijal, osušen do vrednosti koje su manje od ravnotežnog sadržaja vlage, izloži dejstvu atmosferskog vlažnog nezasićenog vazduha može doći do vlaženja materijala i uspostavljanja novog ravnotežnog stanja između materijala i okoline i pri tome će verovatno postati lepljiv. U toku sušenja, što je veća ulazna temperatura vazduha to će se više vlage ispariti i na taj način će se povećati relativna vlažnost vazduha unutar sušnice. Ovo može uticati na sadržaj vlage osušenog praha. U našem sistemu za neke vrste materijala nije bilo moguće ostvariti zahtevanu izlaznu vlažnost, koja je za preparate za zaštitu bilja strogo definisana i iznosi najčešće ispod 1%, a u nekim slučajevima i ispod 0.5%. Iz tih razloga je uvećano laboratorijsko postrojenje dograđeno sa tri sistema za naknadno dosušivanje prahova. Cilj je bio da se proverí mogućnost obezbeđivanja potrebne vlažnosti praha produkta. Ispitane su tri varijante dosušivanja i to: dosušivanje primarnog praha Cineb fungicida u fluidizovanom sloju inertnog materijala i dosušivanje u fluidizovanom sloju samog materijala koji se suši (primarnog praha Cineb fungicida i $\text{Cu}(\text{OH})_2$) i dosušivanje primarnog praha bakar(II)-oksid hlorida u ciklonskom dosušivaču.

3.6.1. Dosušivanje u fluidizovanom sloju inertnog materijala

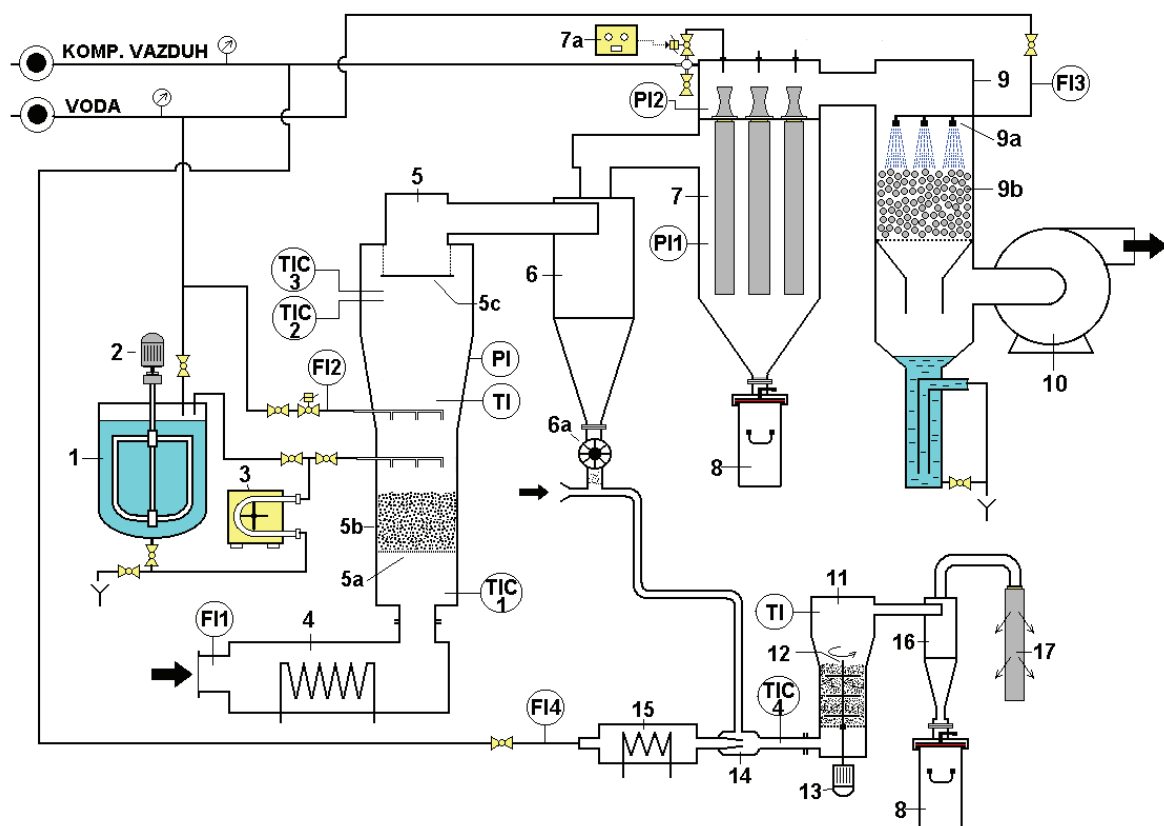
Eksperimentalni sistem sa dosušivanjem po ovoj varijanti prikazan je na slici 3.34. Sastoji se od staklene kolone prečnika $D_c=110$ mm ukupne visine 400 mm. Kolona je snabdevena mehaničkom mešalicom ($\approx 100 \text{ min}^{-1}$) čija je uloga razbijanje agregata praha, budući da prah Cineb fungicida ima izražena adhezivna svojstva. Kolona je napunjena monodisperznim inertnim staklenim sferama prečnika $d_p=0.355$ mm. Primarno osušeni prah se iz ciklona (6) usisava ejektorom (14) i kao dvofazna smeša zagrejan vazduh - prah Cineba provodi kroz fluidizovani sloj inertnog materijala. Vazduh za dosušivanje (iz kompresora) se pomoću električnog predgrejača zagreva na željenu temperaturu. Protok vazduha za dosušivanje varirao je od $V_0=6-10 \text{ m}^3/\text{h}$, što je svega oko 3-4% od protoka vazduha u primarnoj sušnici. Dosušeni prah se prihvata u ciklonu (17, slika 3.34), nakon čega se vazдушna struja sprovodi u vrećasti filter. Ceo sistem je dobro uzemljen u cilju prevazilaženja elektrostatičkih efekata.

Uloga inertnih staklenih sfera u koloni za dosušivanje je dvojaka:

- prah Cineba po svojim karakteristikama pripada grupi C po Geldart-ovoj /1973/ klasifikaciji materijala, što znači da se ne može uopšte dovesti u fluidizovano stanje, s obzirom da se odmah formiraju kanali u sloju kroz koje protiče vazduh praktično bez kontakta sa česticama, što je i eksperimentalno utvrđeno;
- inertne staklene sfere omogućuju da se u relativno maloj koloni obezbedi brzina vazduha koja je 2-3 puta iznad minimalne brzine fluidizacije staklenih sfera.

Na ovaj način fluidizuje se, u stvari, sloj inertnih sfera, a prah koji se dosušuje se provodi kroz sloj inertnih čestica. Tipično vreme boravka praha u sloju (kontaktno vreme) je oko 0.3 s. Ostale karakteristike ovog sistema navedene su u tabeli 3.11.

Ogledi dosušivanja primarnog praha Cineba većeg sadržaja vlage od propisanog u opisanom sistemu za dosušivanje su vršeni na taj način što je pre početka sušenja u celom sistemu, u delu sistema za dosušivanje podešen protok i ulazna temperatura sekundarne struje vazduha. Nakon uključivanja postrojenja u rad, prah Cineb fungicida iz primarne sušnice se usisava zagrejanim vazduhom (sekundarna struja) pomoću ejektora (14) i kao dvofazna smeša vazduh-čestice Cineba se provodi kroz fluidizovani sloj inertnih staklenih sfera. Rezultati ispitivanja su prikazani u tabeli 3.12.



Slika 3.34. Uvećano laboratorijsko postrojenje sa dodatkom za dosušivanje

1 - rezervoar, 2 - mešalica, 3 - pumpa, 4 - grejač vazduha, 5 - fluidizaciona kolona, 5a - distributor, 5b - inertne čestice, 5c - deflektor, 6 - ciklon, 6a - rotacioni ventil, 7 - vrećasti filter, 7a - programator vrećastog filtera, 8 - prihvatni sudovi za produkt, 9 - skruber, 9a - mlaznica, 9b - punjenje, 10 - ventilator, 11 - fluidizaciona kolona za dosušivanje ($D_c=110$ mm), 12 - mehanička mešalica, 13 - motor mešalice, 14 - ejektor, 15 - električni predgrejač vazduha (2 kW), 16 - ciklon ($\phi 40$ mm x 100 mm), 17 - vrećasti filter, FI - merač protoka, PI - indikator pritiska, TI - pokretni termopar, TIC - indikacija i kontrola temperature

Tabela 3.11. Karakteristike kolone i sloja u sistemu za dosušivanje

Parametar	Simbol	Kolona za dosušivanje
Prečnik kolone (mm)	D_c	110
Prečnik inert. čestica (mm)	d_p	0.355
Gustina inert. čestica (kg/m^3)	ρ_p	2630
Statička visina sloja (m)	H_0	0.10
Masa sloja (kg)	M_{sl}	1.48
Masa jedne inertne čestice (mg)	m_p	0.062
Broj čestica ($\times 10^6$) (kom.)	N	23.9
Ukupna površ. inertnih čestica (m^2)	A_p	9.47
Minimalna brzina fluidizacije (na 20°C) (m/s)	* U_{mf}	0.145
Brzina odnošenja (na 20°C) (m/s)	** U_t	2.96
Pad pritiska u sloju (Pa)	ΔP	1500

*određeno iz Ergun-ove /1952/ jednačine

**određeno prema Kunii-u i Levenspiel-u /1969/

Tabela 3.12. Eksperimentalni rezultati dosušivanja primarnog praha Cineba u fluidizovanom sloju inertnog materijala (staklene sfere, $d_p=0.355$ mm, frakcija 0.29-0.42 mm)

Ogled broj	Oznaka uzorka	Primarna sušnica						Dosušivanje					
		V_0 m^3/h	H mm	T_{gi} $^\circ\text{C}$	T_{ge} $^\circ\text{C}$	x_f %	A.M. %	V_0 m^3/h	H mm	T_{gi} $^\circ\text{C}$	T_{ge} $^\circ\text{C}$	x_f %	A.M. %
17	1	200	100	190	80	0.75	-						
	1*							10	80	85	83	0.27	-
18	2	200	100	170	80	0.29	70.37						
	2*							10	80	85	82	0.16	84.80
19	3	200	100	190	80	0.80	77.00						
	3*							10	80	85	83	0.50	84.00
20	4	200	100	190	90	0.39	82.60						
	4*							10	120	100	95	0.47	85.80
21	5	220	100	190	90	1.76	-						
	5*							10	120	85	80	2.16	-
23	6	250	100	190	87	2.30	90.04						
	6*							6	120	80	74	0.70	89.47
24	7	260	100	187	90	1.15	93.40						
	7a*							9.3	120	77	62	0.58	87.99
	7b*									85	69	0.30	83.85
	7c*									100	84	0.71	76.03
	7d*									112	93	0.50	71.04
	7e*									67	56	0.33	72.03

Numeracija oglada 17-24 je prema tabeli P2.4 iz Priloga 2

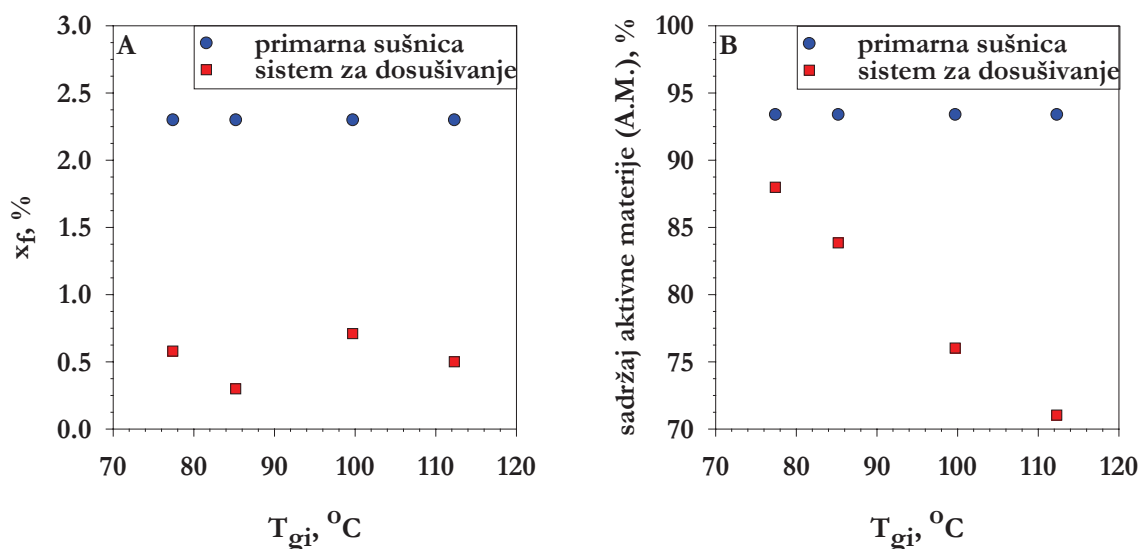
* - Označava uzorak iz ciklona na aparaturi za dosušivanje

NAPOMENA: Ogladi 17-21 su rađeni sa pastom Cineba koja je dugo stajala (najverovatnije da je došlo do izvesnog stepena degradacije); ogladi 23 i 24 su rađeni sa svežom pastom Cineba

Na slici 3.35 prikazan je uticaj temperature na ulazu u fluidizacioni sloj inertnih čestica za dosušivanje na vlažnost praha i sadržaj aktivne materije, na primeru uzoraka dobijenih

dosušivanjem primarnog praha iz oglada 24. Može se uočiti da se sadržaj vlage u prahu nakon dosušivanja smanji za skoro 4.5 puta, bez obzira na temperaturu dosušivanja. Međutim, karakteristično je sniženje sadržaja aktivne materije, koje je izraženije što je ulazna temperatura sekundarnog vazduha veća. Moguće je da strujanje u ovom sistemu nije bilo idealno, te da deo čestica praha boravi u sloju mnogo duže od nominalnih 0.3 s. Ovo se zaključuje analizom oglada 7e* koji ima sadržaj aktivne materije od 72.03%. Ovaj ogled je rađen na najnižoj temperaturi ($T_{gi}=67^{\circ}\text{C}$), ali je rađen nakon oglada 7d* na najvišoj temperaturi ($T_{gi}=112^{\circ}\text{C}$), pa je verovatno u uzorku i deo materijala iz prethodnog oglada.

Može se zaključiti da dosušivanje u fluidizovanom sloju inertnog materijala može obezbediti potrebnu vlažnost praha pod uslovom da se radi na nižim temperaturama i da se reši hidrodinamika strujanja na odgovarajući način. Međutim, rezultati pokazuju da ovaj sistem nije pogodan za materijale kod kojih postoji mogućnost termičke degradacije aktivne materije.

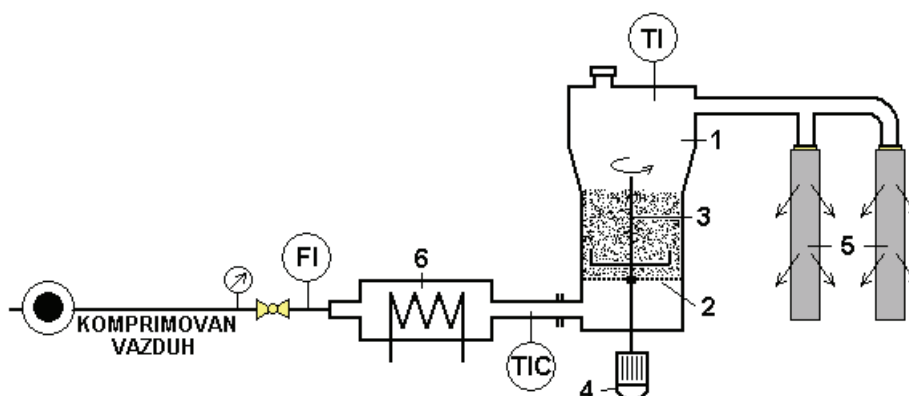


Slika 3.35. Uticaj temperature na dosušivanje primarnog praha Cineba iz oglada 24 (tabela 3.12) u fluidizovanom sloju inertnog materijala

A- na sadržaj vlage u dosušenom prahu, B- na sadržaj aktivne materije u dosušenom prahu

3.6.2. Dosušivanje u fluidizovanom sloju materijala

Eksperimentalni sistem za dosušivanje u fluidizovanom sloju paškastog produkta prikazan je na slici 3.36. Glavni deo sistema je fluidizaciona kolona prečnika $D_c=286$ mm, ukupne visine 400 mm. Izvršena su dva oglada sa fluidizovanim slojem prethodno dobijenih prahova Cineba i $\text{Cu}(\text{OH})_2$ iz primarne sušnice. Kako je već naglašeno, ovi prahovi se teško dovode u fluidizovano stanje. Fluidizaciju je moguće obezbediti, što je opšta karakteristika materijala iz grupe C po Geldart-ovoj /1973/ klasifikaciji materijala, ili tretiranjem u vibro-fluidizovanom sloju ili mehaničkim mešanjem. U našem slučaju primenjena je mehanička mešalica (sa približno 100 min^{-1}) čija je uloga da razbija stvorene kanale u sloju. Vizuelnim osmatranjem utvrđen je zadovoljavajući kvalitet fluidizacije.

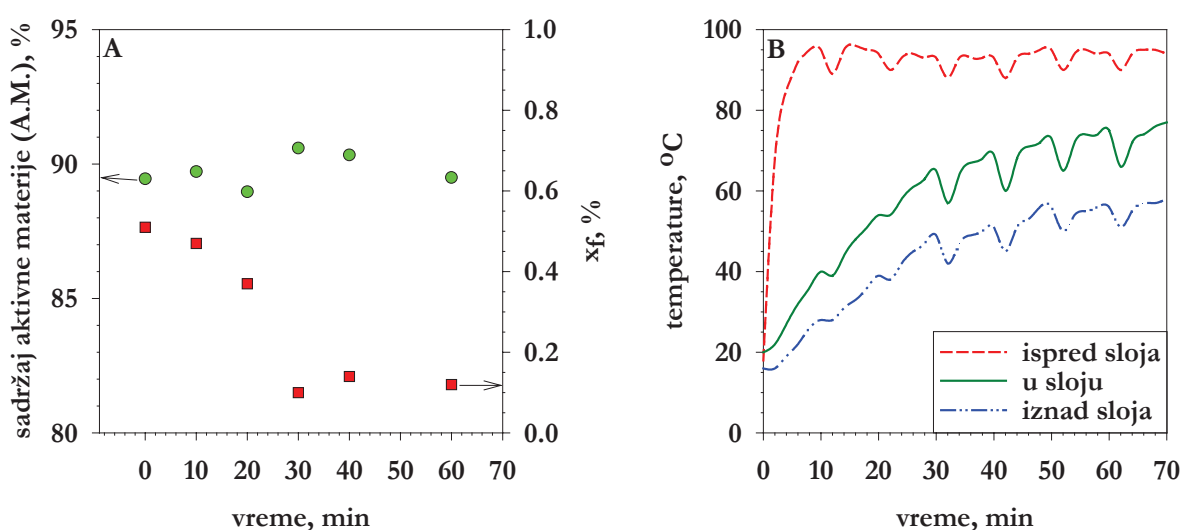


Slika 3.36. Uređaj za dosušivanje sa fluidizovanim slojem praha

1 - fluidizaciona kolona ($D_c=286$ mm), 2 - raspodeljivač, 3 - mešalica, 4 - motor mešalice, 5 - vrećasti filter, 6 - električni predgrejač vazduha (2 kW), FI - merac protoka, TIC - indikacija i kontrola ulazne temperature vazduha, TI - indikator temperature

Ogledi u ovom sistemu su izvršeni na drugačiji način u odnosu na prethodni sistem (sa inertnim česticama): primarno osušenim prahom Cineba (oko 3 kg), odnosno prahom $\text{Cu}(\text{OH})_2$ (oko 2 kg), napunjena je fluidizovana kolona, a zatim je praćena dinamika sušenja sa vremenom, tj. vremenska promena vlažnosti praha i sadržaja aktivne materije. Svrha ovog oglada je bila da se odredi potrebno vreme boravka praha u sušnici, kao osnove za proračun kontinualnog uređaja. Rezultati ispitivanja su prikazani u tabelama 3.13 i 3.14.

Na slici 3.37 prikazana je promena temperatura sa vremenom, kao i sadržaj vlage i aktivne materije praha Cineb fungicida. Na uslove ovog oglada značajno utiče činjenica da se sloj postepeno zagreva (jer je materijal na početku hladan, što ne bi bio slučaj u kontinualnom sistemu), bez obzira što je temperatura vazduha na ulazu približno konstantna. Za ovaj ogled karakteristična je i niska početna vlažnost praha ($x_f=0.51\%$). Može se uočiti da se vlažnost praha redukuje na 0.1% za 30 min, pri čemu nema bitnih razlika u sadržaju aktivne materije.



Slika 3.37. Dosušivanje u fluidizovanom sloju praha Cineba – promena sadržaja vlage praha i sadržaja aktivne materije (A) i promena temperatura (B) sa vremenom

Tabela 3.13. Rezultati dosušivanja u fluidizovanom sloju praha Cineba

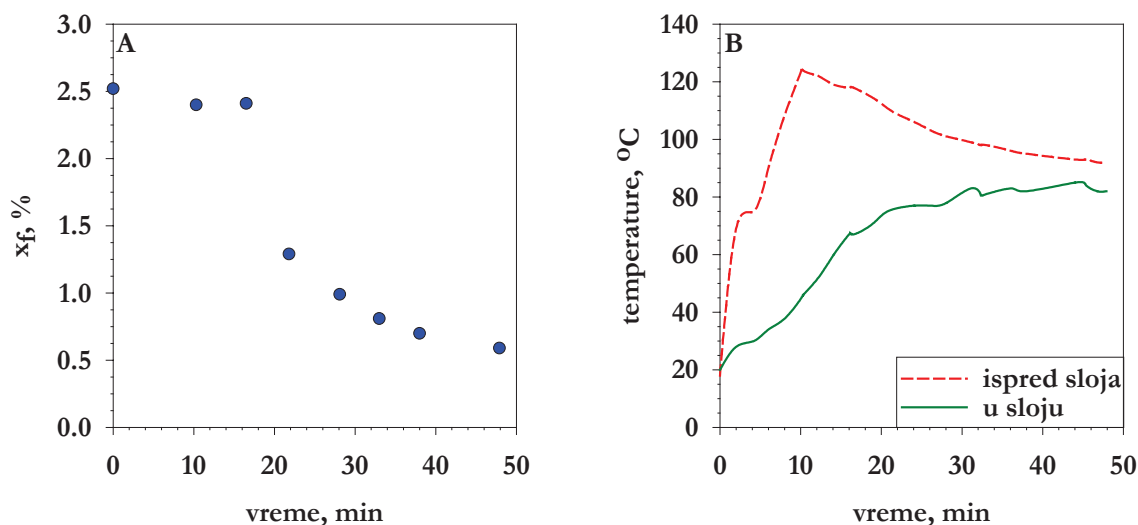
Prečnik kolone za dosušivanje $D_c=286$ mm Protok ulaznog vazduha (na 20°C) $V_0=7.73$ m ³ /h Materijal za dosušivanje je smeša primarnih prahova dobijenih u ogledima 24, 25 i 26 (3 kg) T1 - temperatura vazduha ispred sloja (°C) T2 - temperatura vazduha u sloju (°C) T3 - temperatura vazduha iznad sloja (°C)						
vreme min	T1 °C	T2 °C	T3 °C	Oznaka uzorka	x_f %	A.M. %
0	18	20	16	B1	0.51	89.45
2	68	22	16			
4	85	27	19			
6	92	32	22			
8	95	36	26			
10	95	40	28	B2	0.47	89.72
12	89	39	28			
14	95	44	31			
16	96	48	33			
18	95	51	36			
20	94	54	39	B3	0.37	88.97
22	90	54	38			
24	93	58	42			
26	94	61	45			
28	93	63	47			
30	93	65	49	B4	0.10	90.59
32	88	57	42			
34	93	64	47			
36	93	67	49			
38	93	68	50			
40	93	69	51	B5	0.14	90.34
42	88	60	45			
44	93	68	51			
46	94	71	53			
48	95	72	56			
50	95	73	56	B6	0.45	90.66
52	90	65	50			
54	94	72	54			
56	95	74	55			
58	94	74	56			
60	94	75	56	B7	0.12	89.50
62	90	66	51			
64	94	72	55			
66	95	74	57			
68	95	76	57			
70	94	77	58	B8	0.50	93.49

Tabela 3.14. Rezultati dosušivanja u fluidizovanom sloju praha $\text{Cu}(\text{OH})_2$

Prečnik kolone za dosušivanje $D_c=286$ mm					
Protok ulaznog vazduha (na 20°C) $V_0=9.3$ m ³ /h					
Materijal za dosušivanje: 2 kg praha, visina sloja oko 11 cm					
T1 - temperatura vazduha ispred sloja ($^\circ\text{C}$)					
T2 - temperatura vazduha u sloju ($^\circ\text{C}$)					
Masa vrećastog filtra: 0 min - 836 g, 47.9 min - 922 g					
vreme min	T1 $^\circ\text{C}$	T2 $^\circ\text{C}$	ΔP mmH ₂ O	Oznaka uzorka	x_f %
0.0	18	20	50	1	2.52
2.0	69	28	50		
4.2	75	30	50		
6.0	90	34	50		
8.1	109	38	59		
10.1	124	45	64		
10.3	124	46	66	2	2.40
12.2	122	52	66		
14.1	119	60	63		
16.0	118	67	67		
16.5	118	67	69	3	2.41
18.6	115	70	78		
20.2	112	74	83		
21.8	109	76	91	4	1.29
24.1	106	77	99		
26.2	103	77	104		
28.1	101	78	107	5	0.99
31.1	99	83	134		
32.3	98	81	138		
33.0	98	81	136	6	0.81
36.1	96	83	132		
38.0	95	82	130	7	0.70
44.0	93	85	144		
45.4	93	84	148		
46.8	92	82	150		
47.9	92	82	152	8	0.59

Na slici 3.38 prikazana je promena temperatura i sadržaj vlage praha $\text{Cu}(\text{OH})_2$ sa vremenom. I u ovom slučaju na uslove ogleda značajno utiče postepeno zagrevanje sloja (koji je na početku ogleda hladan) u periodu od 20 min. U toku dosušivanja praha $\text{Cu}(\text{OH})_2$ se istovremeno pratila i količina akumulisanog praha na vrećastom filtru, bez otresanja. S obzirom da je vremenom protok vazduha opadao usled povećanja otpora na vrećastom filtru, ulazna temperatura vazduha nije održavana na konstantnoj vrednosti. Zagrevanje ulaznog vazduha je prekinuto nakon 10 min da bi se sprečilo pregrevanje sloja usled slabijeg intenziteta fluidizacije. Za ovaj ogled karakteristična je relativno visoka početna vlažnost primarnog praha ($x_f=2.52\%$). Sa slike 3.38 se može uočiti da se vlažnost praha redukuje 3 puta (0.81 % vlage) nakon 33 min, što odgovara trenutku kada je sloj dostigao približno konstantnu temperaturu

(oko 80°C). Na osnovu rezultata izvršenih oglada može se zaključiti da se i ovaj sistem može iskoristiti za dosušivanje praha.



Slika 3.38. Dosušivanje u fluidizovanom sloju praha $\text{Cu}(\text{OH})_2$ – promena sadržaja vlage praha (A) i temperatura (B) sa vremenom

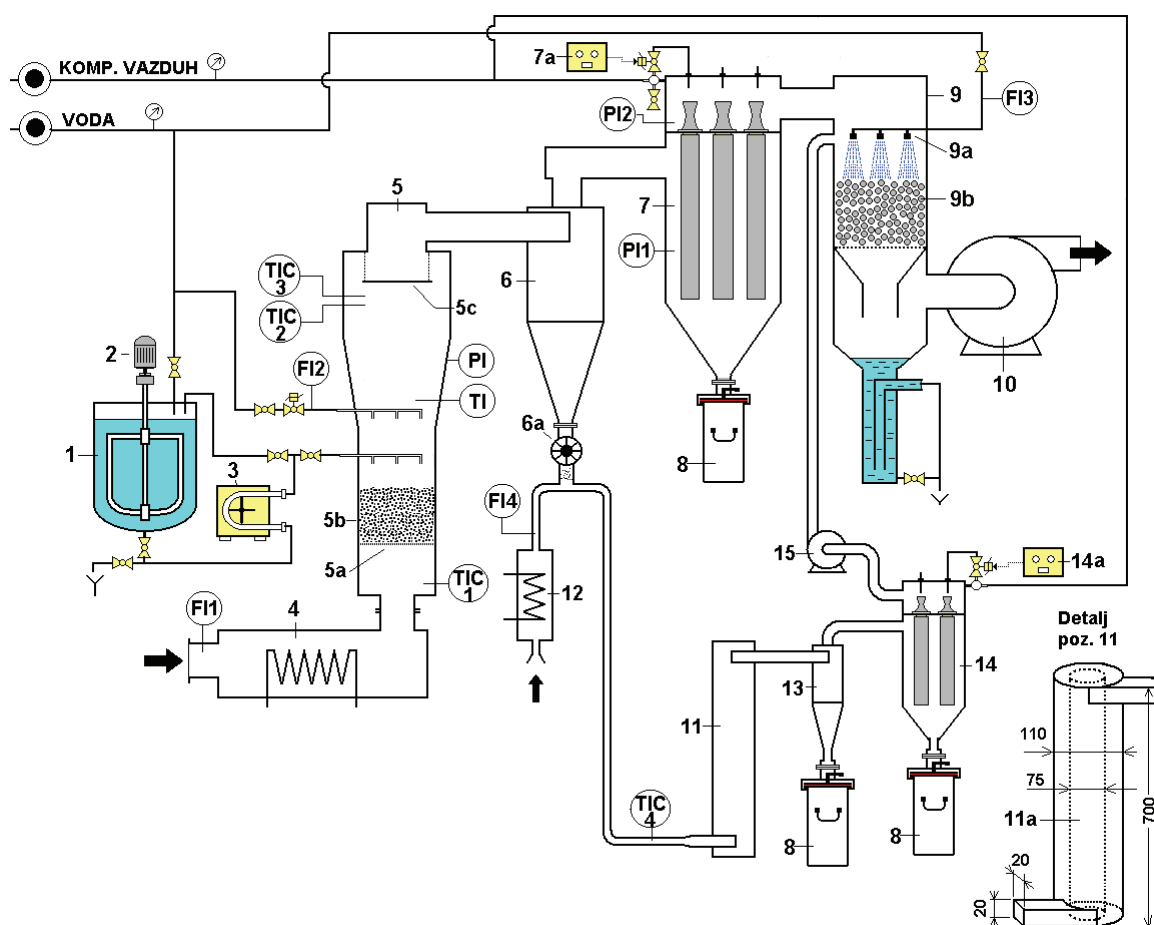
3.6.3. Dosušivanje u koloni sa ciklonskim strujanjem praha (ciklonski dosušivač)

Eksperimentalni sistem sa ciklonskim dosušivanjem prikazan je na slici 3.39. Dodatak za dosušivanje sastoji se od kolone od pleksiglasa prečnika $D_c=110$ mm ukupne visine 700 mm (11). Primarno osušeni prah se pomoću sekundarne struje vazduha iz ciklona (6) tangencijalno uvodi na dno kolone za dosušivanje. Vazduh za dosušivanje (iz kompresora) se pomoću električnog predgrejača zagreva na željenu temperaturu. Protok vazduha za dosušivanje je bio $V_0=22$ m³/h. Dosušeni prah se iz ciklonskog dosušivača prihvata u sekundarnom ciklonu (13) i vrećastom filteru (14). Ceo sistem je dobro uzemljen u cilju prevazilaženja elektrostatičkih efekata.

Izvršena su dva oglada dosušivanja primarnog praha bakar(II)-oksi-hlorida, pri čemu je u drugom ogledu u koloni za dosušivanje postavljena cev prečnika 0.075 m i dužine 0.7 m (11a) u cilju pospešivanja spiralnog kretanja vazdušne struje. Ogladi dosušivanja praha bakar(II)-oksi-hlorida u opisanom sistemu za dosušivanje su vršeni na taj način što je pre početka sušenja u celom sistemu, u delu sistema za dosušivanje podešen protok i ulazna temperatura sekundarne struje vazduha. Nakon uključivanja postrojenja u rad, prah bakar(II)-oksi-hlorida se iz ciklona primarne sušnice (6) usisava zagrejanim vazduhom (sekundarna struja) i kao dvofazna smeša vazduh-čestice se provodi spiralnom putanjom kroz ciklonski dosušivač. Eksperimentalni uslovi, karakteristike kolone za ciklonsko dosušivanje i rezultati ispitivanja su prikazani u tabelama 3.15 i 3.16.

Iz tabele 3.16 se može uočiti da se rezidualna vlažnost praha smanjuje u odnosu na primarni prah iz primarne sušnice se smanji za 0.63% (ogled 1), odnosno za 0.36% (ogled 2).

U oba slučaja nije dovoljno dosušen prah, odnosno sadržaj vlage je veći od zahtevanih 1%, što znači da je potrebno obezbediti duže vreme boravka u ciklonskom dosušivaču. U ovom sistemu procenjeno vreme boravka praha u dosušivaču kretalo se od 1 do 2.7 s, što je neuporedivo manje nego u prethodna dva sistema. Produžavanjem vremena boravka (približno dvostruko) mogla bi se obezbediti zahtevana vlažnost praha. Na osnovu prikazanih preliminarnih rezultata može se zaključiti da je ovaj sistem dosušivanja najpogodniji pre svega za termoosetljive materijale zbog relativno kratkog vremena boravka praha u dosušivaču.



Slika 3.39. Uvećano laboratorijsko postrojenje sa dodatkom za ciklonsko dosušivanje
 1 - rezervoar, 2 - mešalica, 3 - pumpa, 4 - grejač vazduha, 5 - fluidizaciona kolona, 5a - distributor, 5b - inertne čestice, 5c - deflektor, 6 - ciklon, 6a - rotacioni ventil, 7 - vrećasti filter, 7a - programator vrećastog filtera sušnice, 8 - prihvatni sudovi za produkt, 9 - skruber, 9a - mlaznica, 9b - punjenje, 10 - ventilator, 11 - kolona za dosušivanje ($D_c=110$ mm), 12 - električni predgrejač vazduha (2 kW), 13 - ciklon ($\phi 60$ mm x 120 mm), 14 - vrećasti filter, 14a - programator vrećastog filtera, 15 - ventilator, FI - merač protoka, PI - indikator pritiska, TI - pokretni termopar, TIC - indikacija i kontrola temperature

Tabela 3.15. Karakteristike kolone za ciklonsko dosušivanje i rezultati dosušivanja

		ogled 1	ogled 2
Maseni protok praha	kg _{sm} /h	11.01	11.61
Prečnik spoljne cevi	m	0.11	0.11
Prečnik unutrašnje cevi	m	-	0.075
Širina anularne zone u dosušivaču	m	0.055	0.018
Dužina dosušivača	m	0.7	0.7
Površina dosušivača (anulus)	m ²	0.0095	0.0051
Ekvivalentni prečnik dosušivača	m ²	0.1100	0.0805
Maseni fluks praha u dosušivaču	kg/m ² h	1159	2283
Broj zaokreta vazdušne struje u dosušivaču		6.364	6.364
Pređeni put	m	2.199	1.499
Ulazna temperatura vazduha	°C	105	105
Zapreminski protok vazduha na 20°C	m ³ /h	22	22
Ulazna brzina vazduha u ciklon	m/s	17	17
Maseni protok vazduha	kg/s	0.007	0.007
Opterećenje vazdušnog toka	kg _{sm} /kg _{vaz}	0.420	0.443
Površinska brzina vazduha na temperaturi dosušivanja	m/s	0.82	1.53
Nominalno vreme boravka praha	s	2.7	1.0

Tabela 3.16. Eksperimentalni podaci za ciklonsko dosušivanje

		Primarna sušnica		Dosušivač	
		T _{gi} , °C	T _{gc} , °C	T _{ul} , °C	T _{izl} , °C
		x _f %			
OGLED 1: Eksperimentalni rezultati, bakar(II)-oksi-hlorid x ₀ =0.601, bez unutrašnje cevi					
Suspenzija	60.08				
Ispod primarnog ciklona	1.93			292	97
Ispod sekundarnog ciklona (dosušivanje)	1.30	0.63	smanjenje dosušivanjem	292	97
				105	73
OGLED 2: Eksperimentalni rezultati, bakar(II)-oksi-hlorid x ₀ =0.579, sa unutrašnjom cevi					
Suspenzija	57.88				
Ispod primarnog ciklona	1.75			275.5	99.5
Ispod sekundarnog ciklona (dosušivanje)	1.39	0.36	smanjenje dosušivanjem	275	99
				105	66

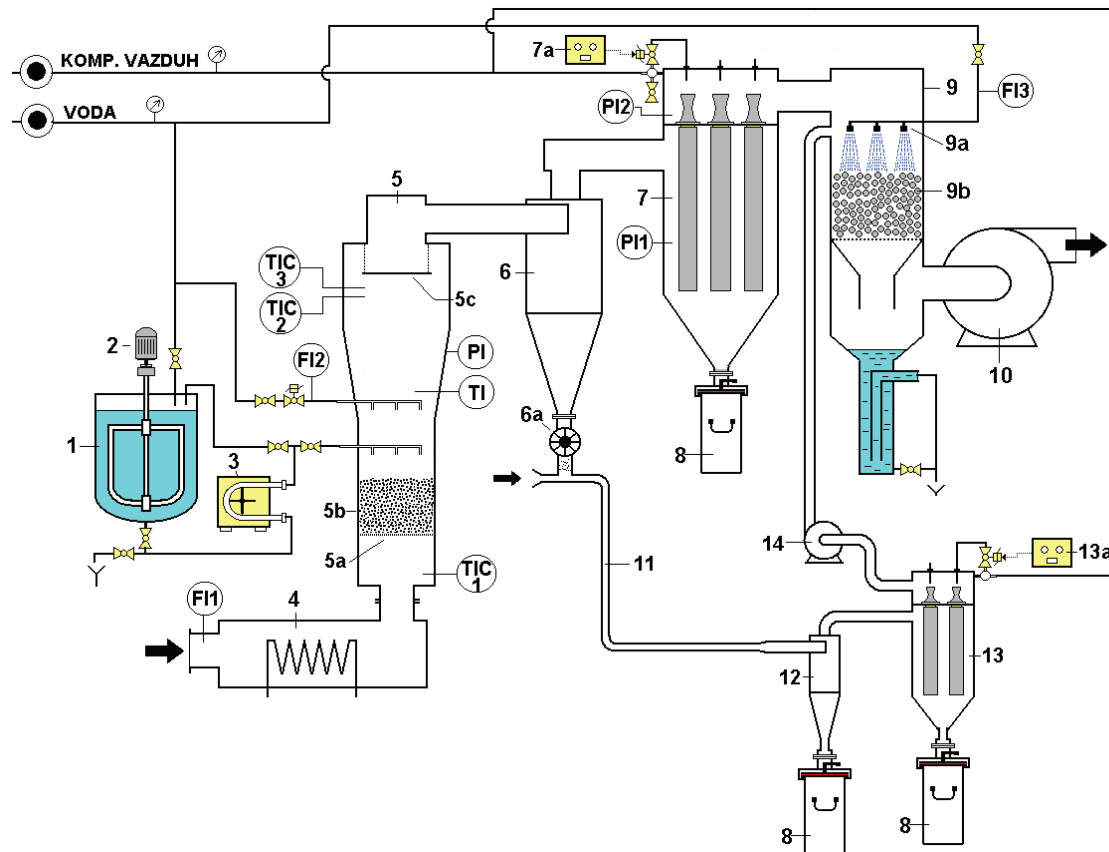
3.7. HLAĐENJE PRAHA

Higroskopni ili termoplastični prahovi (na povišenoj temperaturi postaju lepljivi) i poželjno je da budu ohlađeni do zahtevane temperature pre pakovanja, da ne bi došlo do njihovog zgrudnjavanja. Ako prah iz primarne sušnice pre skladištenja nije doveden na dovoljno nisku temperaturu, može doći do nastavka procesa sušenja unutar sudova u koje se prah odlaže. Čak i mala masa isparene vlage može zasititi vazduh unutar sudova za skladištenje, a tokom prirodnog hlađenja materijala ta masa vlage se izdvaja iz vazduha tako da dolazi do orošavanja praha, tj. slepljivanja i zgrudnjavanja. Iz navedenih razloga je važno izvršiti efikasno hlađenje praha nakon izlaska iz sušnice. Ovo je naročito značajno za preparate kod kojih je aktivna materija termoosetljiva, kao što je to slučaj sa preparatom Cineb fungicida. U industrijskim uslovima u HI ŽUPA, Kruševac, nakon tunelske sušnice prah se pakuje u kontejnere zapremine 1 m³. U praksi je primećeno da temperatura u sredini kontejnera sa osušenim prahom Cineba vrlo sporo opada, u nekim slučajevima od početnih 85°C do oko 45°C nakon 48 sati, što po pravilu prouzrokuje gubitak dela aktivne materije. U toku ispitivanja uvećanog laboratorijskog postrojenja za sušenje u HI ŽUPA, Kruševac izvršeno je preliminarno ispitivanje naknadnog hlađenja praha u nekoliko sistema.

3.7.1. Hlađenje u režimu pneumatskog transporta

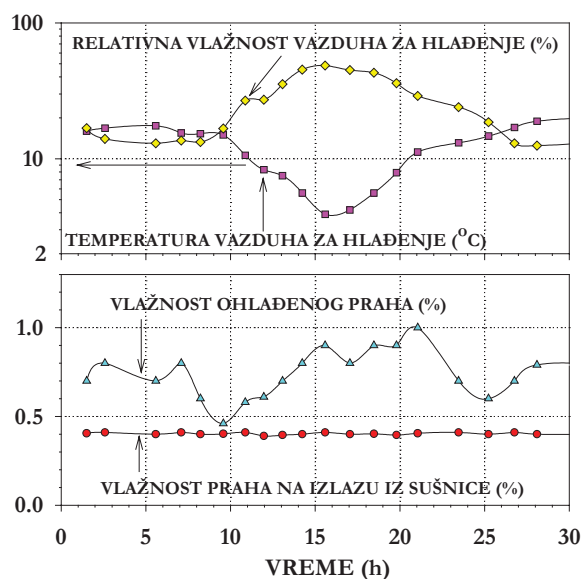
U ovom slučaju je uvećano laboratorijsko postrojenje dograđeno sa sistemom za hlađenje praha u režimu pneumatskog transporta, kako je šematski prikazano na slici 3.40. Protok vazduha za hlađenje iznosio je $V_0=8$ m³/h, tako da je vreme boravka čestica praha u liniji za pneumatski transport (do izdvajanja u sekundarnom ciklonu) iznosilo oko 1.5 s. Konstatovano je da se na ovaj način prah Cineba, dobijen u primarnoj sušnici, ohladi od inicijalne temperature od 95°C do temperature ispod 40°C. Ova ispitivanja rađena su tokom testiranja uvećanog laboratorijskog postrojenja u HI ŽUPA, Kruševac, u kontinuitetu u vremenskom periodu od 72 časa. Ispitivanja su pokazala da sadržaj vlage praha Cineba, koji je izuzetno higroskopan, varira sa relativnom vlažnošću ambijentalnog vazduha u zavisnosti od doba dana, a pri konstantnim ostalim operativnim parametrima.

Na slici 3.41 prikazano je variranje rezidualne vlažnosti primarnog i ohlađenog praha, kao i temperature i relativne vlažnosti vazduha korišćenog za hlađenje. U ispitivanom periodu rezidualna vlažnost na izlazu iz sistema za sušenje iznosila je $0.4\pm 0.02\%$, međutim, sadržaj vlage u ohlađenom prahu kretao se i do 0.9%, pri čemu se na dijagramu jasno uočava korespondencija između sadržaja vlage u ohlađenom prahu i relativne vlažnosti vazduha korišćenog za hlađenje.



Slika 3.40. Uvećano laboratorijsko postrojenje sa dodatkom za hlađenje praha u režimu pneumatskog transporta

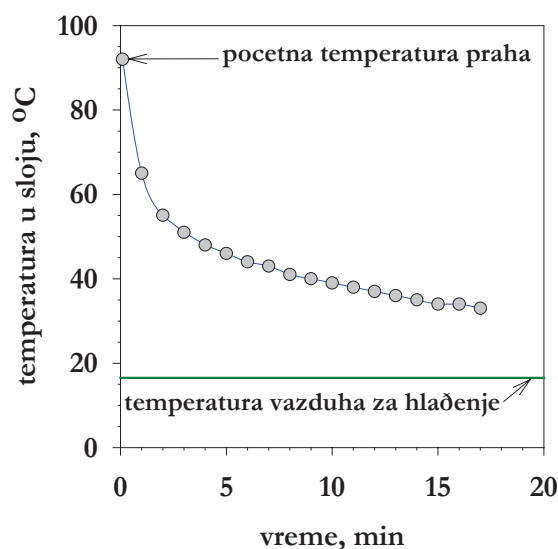
1 - rezervoar, 2 - mešalica, 3 - pumpa, 4 - grejač vazduha, 5 - fluidizaciona kolona, 5a - distributor, 5b - inertne čestice, 5c - deflektor, 6 - ciklon, 6a - rotacioni ventil, 7 - vrećasti filter, 7a - programator vrećastog filtera sušnice, 8 - prihvatni sudovi za produkt, 9 - skruber, 9a - mlaznica, 9b - punjenje, 10 - ventilator, 11 - cevovod za pneumatski transport prečnika 30 mm i dužine 3 m, 12 - ciklon ($\phi 60$ mm x 120 mm), 13 - vrećasti filter, 13a - programator vrećastog filtera, 14 - ventilator, FI - merač protoka, PI - indikator pritiska, TI - pokretni termopar, TIC - indikacija i kontrola temperature



Slika 3.41. Uticaj relativne vlažnosti atmosferskog vazduha na rezidualnu vlagu praha

3.7.2. Hlađenje u fluidizovanom sloju

U ovom slučaju ispitana je mogućnost da se hlađenje praha obavi u fluidizovanom sloju. Ogled je izveden u cilju određivanja nominalnog vremena boravka čestica $\text{Cu}(\text{OH})_2$ u hladnjaku na aparaturi prikazanoj na slici 3.36. Ostale karakteristike fluidizacionog sistema su iste sa karakteristikama sistema prikazanim u tabeli 3.13, s tim što je u ovom slučaju sloj fluidiziran hladnim (ambijetalnim) vazduhom temperature 18°C . Ogled je izveden na taj način što je kolona za fluidizaciju trenutno napunjena sa 3 kg prethodno zagrejanog $\text{Cu}(\text{OH})_2$ praha, nakon čega je sloj fluidiziran, a praćena je dinamika hlađenja sloja preko Ni-Cr-Ni termopara uronjenog u sredinu sloja. Iz dijagrama hlađenja (slika 3.42) može se uočiti da je za hlađenje praha od 95°C do 45°C vazduhom temperature 18°C potrebno nominalno vreme zadržavanja od oko 7 min. Potrebno nominalno vreme boravka praha u sloju bi se moglo skratiti ako bi se povećao protok hladnog vazduha iznad optimuma za fluidizaciju praha, međutim ovo bi rezultiralo povećanim odnošenjem praha iz sloja.



Slika 3.42. Dinamika hlađenja praha $\text{Cu}(\text{OH})_2$ iz primarne sušnice u laboratorijskom hladnjaku sa fluidizovanim slojem

3.7.3. Hlađenje u ciklonskom hladnjaku

U eksperimentalnom sistemu za dosušivanje u ciklonskom uređaju, prikazanom na slici 3.39, izvršena su i dva ogleda bez zagrevanja sekundarne struje vazduha za dosušivanje. Rezultati hlađenja primarnog praha sa atmosferskim vazduhom u ciklonskom uređaju, takođe, ukazuju na uticaj relativne vlažnosti vazduha. Iz table 3.17 se može uočiti da se rezidualna vlažnost praha povećava u odnosu na primarni prah iz ciklona sušnice usled adsorpcije vlage iz sekundarne struje vazduha za 0.33% u ogledu 1, a za 0.22% u ogledu 2.

Tabela 3.17. Eksperimentalni podaci za hlađenje u ciklonskom uređaju

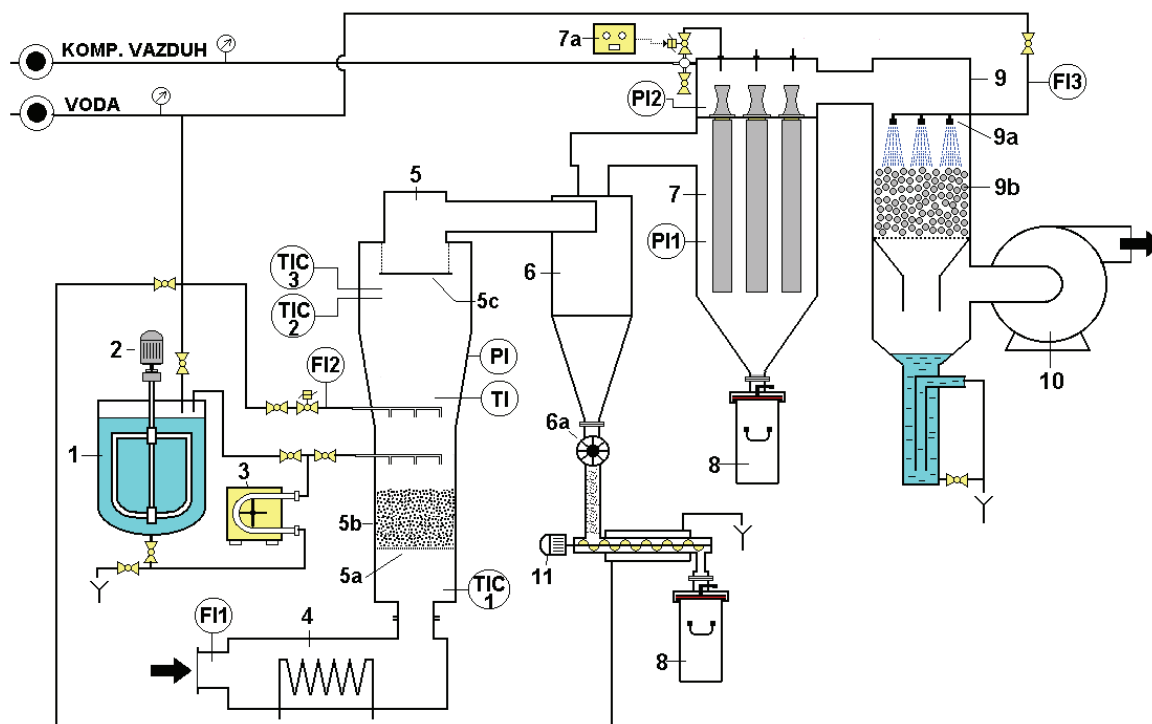
	x_f %			Primarna sušnica		Dosušivač	
				T_{gi} °C	T_{gc} °C	T_{ul} °C	T_{izl} °C
OGLED 1: Eksperimentalni rezultati, bakar(II)-oksi-hlorid $x_0=0.6008$, bez unutrašnje cevi							
Suspenzija	60.08						
Ispod primarnog ciklona	1.93			292	97	-	-
Ispod sekundarnog ciklona (pneumatski transport i hlađenje)	2.26	0.33	porast hlađenjem	268	99	22	22
OGLED 2: Eksperimentalni rezultati, bakar(II)-oksi-hlorid $x_0=0.5788$, sa unutrašnjom cevi							
Suspenzija	57.88						
Ispod primarnog ciklona	1.75			275.5	99.5	-	-
Ispod sekundarnog ciklona (pneumatski transport i hlađenje)	1.97	0.22	porast hlađenjem	276	100	24	25

3.7.4. Hlađenje u pužnom transporteru sa duplikatorom

Na osnovu prethodnih rezultata može se zaključiti da sve varijante hlađenja praha hladnim svežim (atmosferskim) vazduhom nisu pogodne. Potrebno je obezbediti dopunsku opremu (ciklon, vrećasti filter, rotacione ventile i ventilator vazduha za hlađenje). Pored toga, hlađenje svežim vlažnim vazduhom ima za posledicu povećanje sadržaja rezidualne vlage u ohlađenom prahu, a ugradnja sušača za vazduh za hlađenje bi dodatno komplikovala prethodno opisana rešenja.

Iz ovih razloga je preliminarno ispitano i rešenje da se osušeni prah iz ciklona i vrećastog filtera sprovede u pužni transporter kojim se prah transportuje do kontejnera za produkt (slika 3.43). Pužni transporter je snabdeven duplikatorom kroz koji struji voda temperature oko 15°C i protokom od 80 dm³/h. Pužni transporter je bio prečnika 25 mm, ukupne dužine 650 mm. Preliminarna ispitivanja su pokazala da je u svim slučajevima obezbeđena krajnja temperatura praha ispod 45°C od inicijalnih 95°C.

Imajući u vidu da u ovom slučaju prah koji se hladi nije u direktnom kontaktu sa hladnim vlažnim vazduhom može se zaključiti da je ovaj sistem hlađenja najpogodniji sa aspekta eliminisanja mogućnosti naknadnog povećanja rezidualne vlažnosti praškastog produkta.



Slika 3.43. Poluindustrijsko postrojenje za sušenje prošireno sa pužnim transporterom sa duplikatorom

1 - rezervoar, 2 - mešalica, 3 - pumpa, 4 - grejač vazduha, 5 - fluidizaciona kolona, 5a - distributor, 5b - inertne čestice, 5c - deflektor, 6 - ciklon, 6a - rotacioni ventil; 7 - vrećasti filter, 7a - programator vrećastog filtera sušnice, 8 - prihvatni sudovi za produkt, 9 - skruber, 9a - mlaznica, 9b - punjenje, 10 - ventilator, 11 - pužni transporter sa duplikatorom, FI - merač protoka, PI - indikator pritiska, TI - pokretni termopar, TIC - indikacija i kontrola temperature

3.8. IZDVAJANJE OSUŠENIH ČESTICA PRODUKTA

Tokom izvođenja procesa vazduh iz sušnice iznosi prah osušenog produkta. Separacija osušenog produkta iz iskorišćenog vazduha se vrši u tri uzastopna uređaja: ciklonu, vrećastom filtru i skruberu. Standardni ciklon sa tangencijalnim uvođenjem vazduha (centrifugalni separator) prečnika $\phi 200$ mm u cilindričnom delu i vrećasti filter sa 5 cilindričnih filter vreća ukupne površine 3.46 m^2 su procesni uređaji, odnosno služe za izdvajanje korisnog praškastog produkta. Pre ispuštanja u atmosferu izlazni vazduh, posle vrećastog filtera, prolazi kroz skruber sa inertnim punjenjem (plastični rašigovi prstenovi). Srednje efikasni skruber, niskog pada pritiska, je prvenstveno u ekološkoj funkciji, jer pored uklanjanja najsitnijih čestica osušenog materijala dolazi i delimično do apsorpcije gasova, odnosno mirisa, u tečnosti skruberu (vodi).

U toku ispitivanja sušenja suspenzija na inertnim česticama sistematski su vršene analize granulometrijskog sastava osušenog produkta, uglavnom za Cineb fungicid. Jedan od najnepogodnijih i ređih slučajeva raspodele veličina čestica suvog praha Cineb fungicida, sa aspekta udela veoma sitnih čestica je:

ispod	10.50 μm :	85.87 %
ispod	5.25 μm :	47.70 %
ispod	2.15 μm :	15.82 %
ispod	1.10 μm :	8.28 %
ispod	0.55 μm :	3.19 %

Nije postojala mogućnost za sistematsku analizu granulometrijskog sastava svih osušenih produkata, osim za materijale koji su bili od praktičnog interesa za HI ŽUPA, Kruševac, gde su ove analize i vršene. Granulometrijski sastavi prahova, dobijenih sušenjem vodenih suspenzija bakar(II)-karbonata i bakar(II)-hidroksida, su vrlo slični kao u slučaju praha Cineba, odnosno uobičajeno je da je najveći udeo čestica veličine iznad $5\text{-}10 \mu\text{m}$.

Prema eksperimentalnim ispitivanjima na poluindustrijskom postrojenju za sušenje suspenzija minimalna efikasnost izabranog tipa ciklona za ispitivane praškaste produkte (Cineb, bakar(II)-karbonat i bakar(II)-hidroksid) iznosi u proseku 95%, minimalna efikasnost vrećastog filtera iznosi oko 98%. Prema proračunu efikasnost skruberu je 80%. Sa ovim podacima i vrednostima masenog protoka i koncentracije praškastog produkta na izlazu iz sušnice mogu se izračunati količine čestica osušenog produkta u struji vazduha i odgovarajuće koncentracije. Prema proračunu maksimalna emisija iz postrojenja iz postrojenja za sušenje je 0.1 kg/h sa koncentracijom čestica od 16.3 mg/m^3 , što je znatno niže od graničnih vrednosti prema važećem Pravilniku o graničnim vrednostima emisije, načinu i rokovima merenja i evidentiranja podataka (Sl.glasnik RS 30/97). Prema ovom Pravilniku su definisane maksimalne vrednosti emisione koncentracije za ukupne praškaste materije (za emisiju preko 0.5 kg/h maksimalno dozvoljena koncentracija je 50 mg/m^3 , a za emisiju ispod 0.5 kg/h maksimalno dozvoljena koncentracija je 150 mg/m^3). Treba napomenuti da je u sistemu za separaciju osušenog produkta iz vazdušnog toka veliki problem efikasno izdvojiti čestice ispod

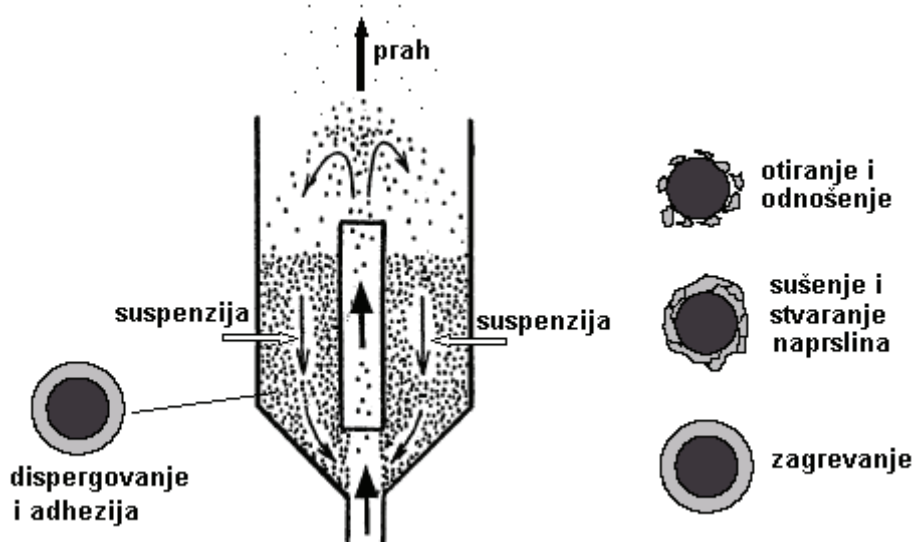
2 μm , međutim to je u ovim ispitivanjima zanemareno, s obzirom da je njihov udeo u ukupnoj masi produkta u većini slučajeva relativno mali. Čestice produkta prikupljene u vodi skrubera bi se organizacijom procesa na industrijskom nivou mogle vraćati direktno u proces sinteze materijala koji se suši, tako da bi bio rešen i problem otpadnih voda.

Generalno, separacija vrlo sitnih čestica iz gasnog toka u praksi predstavlja veliki problem. Čestice ispod 5 μm se vrlo teško izdvajaju iz izlaznog vazduha u standardnim ciklonima. Efikasnost ciklona zavisi od ulazne brzine gasa u ciklon, prečnika čestica, gustine čestica, koncentracije čestica i granulometrijskog sastava. Za iste čestice, pri istoj ulaznoj brzini efikasnost ciklona je veća što je prečnik ciklona manji. I pored toga što je u našem poluindustrijskom sistemu za sušenje ciklon bio relativno malog prečnika $\phi 200$ mm, oko 5% čestica se strujom vazduha odnosi u vrećasti filter. Efikasnost vrećastog filtera zavisi isključivo od veličine čestica. Što se tiče mokrog prečišćavanja gasova, i za najefikasnije Venturi skrubere problematično je izdvajanje čestica ispod 2 μm .

4. SUŠENJE U FONTANSKOM SLOJU INERTNIH ČESTICA SA CEVNIM UMETKOM

4.1. MEHANIZAM SUŠENJA U FONTANSKOM SLOJU INERTNIH ČESTICA SA CEVNIM UMETKOM

U fontanskom sloju sa cevnom umetkom se suspenzija može raspršavati na vrh anularnog dela sloja inertnih čestica, na dnu kolone (u fontanu unutar ulazne zone) ili ukapavanjem unutar sloja inertnih čestica u više tačaka po poprečnom preseku anularnog prostora. U našem sistemu je suspenzija ukapavana unutar sloja inertnih čestica u više tačaka po poprečnom preseku anularnog dela (slika 4.1). Inertne čestice se kroz anularni deo kreću naniže u vidu pakovanog sloja i nakon prolaska inertnih čestica kroz zonu naprskavanja, na njihovoj površini se obrazuje tanak film suspenzije. Na dnu anularnog dela sloja, u ulaznoj zoni ispod cevnog umetka, inertne čestice zahvata struja zagrejanog vazduha i transportuje ih kroz cevni umetak. U toku transporta inertne čestice se zagrevaju, film suspenzije se suši do nekog kritičnog sadržaja vlage obrazujući suhu skramu na površini inertnih čestica. Suva skrama puca i otrese se sa površine inertnih čestica usled međusobnog trenja inertnih čestica, trenja između inertnih čestica i zida cevi, kao i usled sudara inertnih čestica sa deflektorom postavljenim iznad cevnog umetka. Inertne čestice očišćene površine padaju na vrh anularnog prostora i otpočinju novi ciklus. Za razliku od fluidizovanog sloja inertnih čestica u ovom sistemu su sušene samo tečljive suspenzije.



Slika 4.1. Šematski prikaz sušenja u fontanskom sloju inertnih čestica sa cevnom umetkom

4.2. UVEĆANI LABORATORIJSKI SISTEM SA FONTANSKIM SLOJEM INERTNIH ČESTICA I CEVNIM UMETKOM

Ispitivanje sušenja suspenzija je izvođeno u sistemu šematski prikazanom na slici 4.2. Treba napomenuti da postoje dva izmenljiva modula komore za sušenje, jedan je kolona fluidizovanim slojem inertnih čestica, a drugi je kolona sa fontanskim slojem inertnih čestica i cevnom umetkom, tako da su ispitivanja sušenja suspenzija u fluidizovanom (slika 3.4) i fontanskom sloju sa cevnom umetkom (slika 4.2) vršena na praktično istom sistemu, samo sa različitim modulima komora. Komora za sušenje sa fontanskim slojem se sastoji od cilindrične kolone prečnika $D_c=215$ mm u donjem delu i $D_c=320$ mm u gornjem delu. Ukupna visina kolone je 1475 mm, dok je efektivna visina (iznad mlaznice) 1225 mm. Vazduh je uvođen u komoru za sušenje kroz mlaznicu prečnika $D_n=70$ mm. Dno komore je konično (45°). Cevni umetak prečnika $D_d=70$ mm i dužine $L_t=900$ mm je postavljen u centralnu zonu kolone iznad mlaznice, sa mogućnošću promene rastojanja između mlaznice i početka cevi (L , slika 4.2). Deflektor je postavljen iznad cevnog umetka na rastojanju $z_1=1175$ mm od mlaznice.

Kao inertne čestice u sloju su korišćena monodisperzna cilindrična zrna polietilena niske gustine ekvivalentnog prečnika 3.3 mm. Njihova gustina je 921 kg/m³, a sferičnost 0.873. U svim ogledima statička visina sloja inertnih čestica u anularnoj zoni je iznosila $H=900$ mm.

Ukupni protok vazduha je meren pomoću kalibrisane prigušne ploče povezane sa vodenim manometrom. Protok vazduha kroz anurani deo sloja je određivan indirektno merenjem gradijenta pritiska u anuranom delu. Za izračunavanje brzine vazduha u anuranom delu sloja korišćena je kalibraciona kriva dobijena na osnovu eksperimentalno određene zavisnosti gradijenta pritiska od brzine vazduha pri strujanju kroz pakovani sloj polietilenskih čestica ($d_p=3.3$ mm, $\rho_p=921$ kg/m³) u koloni prečnika 60 mm. Dobijeni podaci su korelisani zavisnošću između modifikovanog faktora trenja za pakovani sloj i Reynolds-ovog broja za čestice za anularnu zonu sloja. Pretpostavljeno je da poroznost u anularnoj zoni identična poroznosti u pakovanom sloju. Kao rezultat je dobijena sledeća korelacija:

$$f_{pA} = 94.7 / Re_{pA} + 0.979 \quad (4.1)$$

Maseni protok čestica je određivan merenjem brzine obeležene inertne čestice u anularnoj zoni sloja kroz stakleni prozor na zidu kolone i korišćenjem relacije:

$$G_p = \rho_p A_a (1 - \varepsilon_a) v_a \quad (4.2)$$

Suspenzija koja se suši uvodi se u centralni deo anularne zone sloja inertnih čestica kroz četiri cevi prečnika 4 mm postavljene na 400 mm od dna kolone (L_f , slika 4.2). Usled intenzivne cirkulacije inertnih čestica (polietilen) u sloju, suspenzija se disperguje i formira tanak film na njihovoj površini. Tokom transporta inertnih čestica kroz cevni umetak film suspenzije se suši stvarajući skramu suvog materijala na površini inertnih čestica. Usled

trenja između gasa i inertnih čestica, kao i između samih inertnih čestica, kao i usled sudara inertnih čestica sa deflektorom postavljenim iznad transportne cevi, suva skrama puca i odvaja se sa površine inertnih čestica i suv prah se odnosi van kolone u struji gasa. Inertne čestice, nakon izlaska iz transportne cevi, padaju na vrh anularne zone sloja, klize naniže i ponovo se oblažu tankim slojem suspenzije. Separacija osušenog produkta iz iskorišćenog vazduha se vrši u tri uzastopna uređaja, opisanih u Poglavlju 3.2.2. Osušeni prah se odvaja iz izlaznog gasnog toka u ciklonu i vrećastom filtru sa automatskim otresanjem. Pre izlaska iz sistema vazduh prolazi kroz skruber sa pakovanim slojem. Ventilator je postavljen na kraju procesne linije tako da sistem radi pod vakuumom u odnosu na ambijetalni pritisak.

Ulazna temperatura vazduha u komoru za sušenje se održava na zadatoj vrednosti pomoću regulatora temperature TIC1. Regulator temperature TIC2, koji je postavljen na vrhu komore za sušenje, upravlja radom pumpe za doziranje suspenzije (“on-off” regulacija protoka) tako da se izlazna temperatura gasa održava na konstantnoj vrednosti. Izlazna temperatura gasa iz kolone je usvojena i kao temperatura “sušenja”. Regulator temperature TIC3, takođe smešten na vrhu kolone, podešen je na vrednost temperature koja je oko 20°C veća od vrednosti temperature na koju je podešen regulator temperature TIC2, tj. od temperature sušenja ($TIC3 = TIC2 + 20^{\circ}C$). Njegova uloga je da upravlja zaštitnim hlađenjem vodom u cilju sprečavanja pregrevanja sloja inertnih čestica u slučaju da dođe do poremećaja rada pumpe za doziranje suspenzije. S obzirom da pumpa za doziranje suspenzije radi u “on-off” regulaciji, brzina doziranja je podešena tako da približno 85% od ukupnog vremena procesa sušenja doziranje bude u aktivnom periodu.

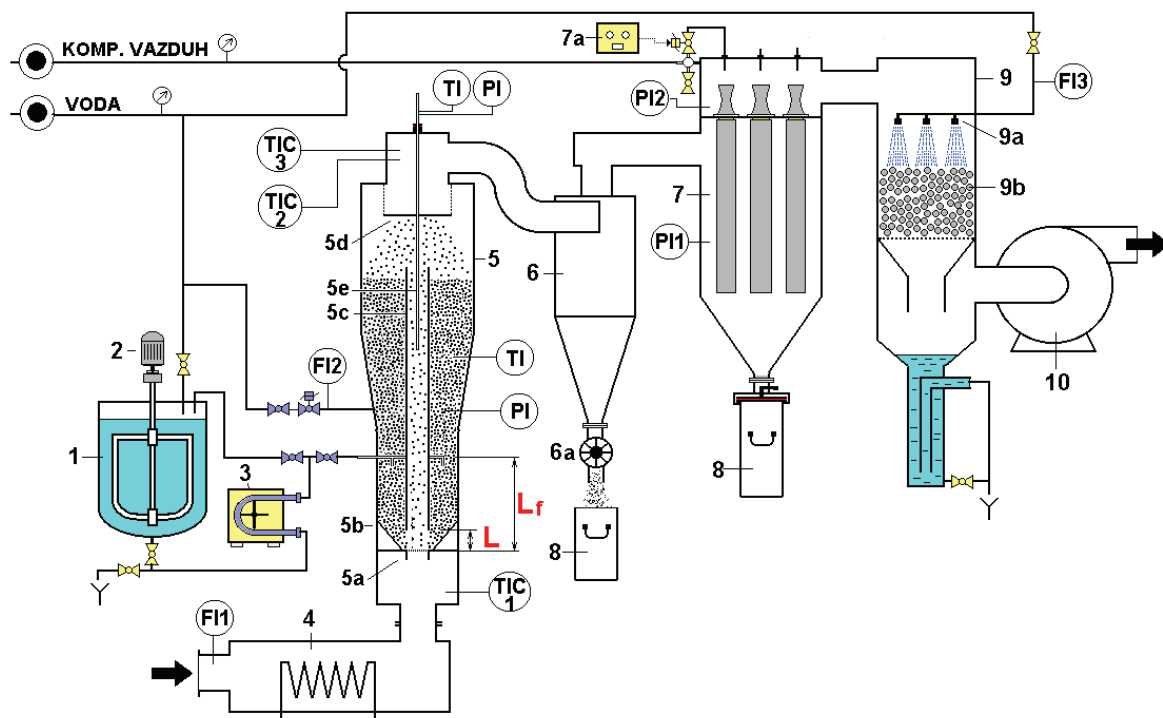
Temperature i statički pritisci mereni su u anularnoj zoni sloja u pet pozicija na jednakim rastojanjima između $z_1=0$ (dno anularne zone, nivo mlaznice) i $z_1=H$ (vrh anularne zone). Temperature i statički pritisci mereni su duž cevnog umetka pomoću pokretne sonde postavljene u osi cevi. Zapreminski protok suspenzije je određivan preko promene nivoa u rezervoaru suspenzije tokom određenog vremenskog perioda. Na ovaj način se dobija usrednjena vrednost zapreminskog protoka suspenzije pri diskontinualnom načinu doziranja, tj. “on-off” regulaciji protoka suspenzije. Korišćenjem vrednosti gustina suspenzija, koje su određivane za svaku ispitivanu šaržu, mogu se izračunati maseni protoci suspenzija. Tokom izvođenja ogleđa kontinualno su beležene vrednosti svih relevantnih temperatura za proces pomoću računarskog sistema za automatsko prikupljanje i obradu podataka (akvizicioni sistem). I u ovom sistemu nije postojala mogućnost praćenja relativne vlažnosti vazduha. Vrednost relativne vlažnosti ulaznog vazduha je pretpostavljana, dok vrednost relativne vlažnosti vazduha na izlazu iz sušnice proizilazi iz odgovarajućih proračuna. Takođe je i ovaj sistem dobro uzemljen u cilju prevazilaženja elektrostatičkih efekata, tj. obezbeđenja kontrolisanog električnog pražnjenja čestica sušenog materijala.

Ukupno je izvršeno 19 ogleđa podeljenih u dve grupe. U prvoj grupi ogleđa u sistem je dozirana tečna faza vode (“idealna suspenzija”), a druga grupa ogleđa je vršena sa suspenzijama kalcijum(II)-karbonata, kalcijum(II)-stearata i Cineb fungicida (klasa

tiokarbamata, tabela P1.1 u Prilogu 1). Srednji prečnici čvrstih čestica koje ulaze u sastav suspenzija su 14.8 (0.1 ÷ 60), 12.9 (2 ÷ 60) i 17.3 (1 ÷ 70) μm , respektivno.

Izvođenje svakog pojedinačnog ogleada je trajalo oko tri časa. Režim rada postrojenja za sušenje je bio stabilan, odnosno tokom izvođenja ogleada svi procesni parametri su bili konstantni.

Parametri u stanju minimalne fluidizacije (U_{mF} i ϵ_{mF}), potrebni za izračunavanje varijacionih konstanti za određivanje koeficijenata trenja, određivani su pomoću Ergun-ove /1952/ jednačine. Brzina odnošenja inertnih čestica (U_t) je određena korišćenjem jednačina predloženih od strane Kunii-a i Levenspiel-a /1969/.



Slika 4.2. Šematski prikaz sistema za sušenje u fontanskom sloju sa cevnim umetkom
 1 - rezervoar, 2 - mešalica, 3 - pumpa, 4 - grejač vazduha, 5 - kolona, 5a - mlaznica za uvođenje vazduha, 5b - konično dno, 5c - cevni umetak, 5d - distributor vazduha, 5e - pokretna sonda za merenje pritiska i temperature, 6 - ciklon, 6a - rotacioni ventil, 7 - vrećasti filter, 8 - prihvatni sudovi za produkt, 9 - skruber, 9a - mlaznica za uvođenje vode, 9b - punjenje, 10 - ventilator, FI - merač protoka, PI - indikator pritiska, TI - indikator temperature sa pokretnom sondom, TIC - indikacija i kontrola temperature

4.3. MODELOVANJE PROCESA U SUŠNICI SA FONTANSKIM SLOJEM INERTNIH ČESTICA I CEVNIM UMETKOM

Poznavanje mehanizama prenosa toplote i mase između čestica i fluida predstavlja osnov, pored hidrodinamičkog modela, za modelovanje složenijih procesa. U okviru ovog rada je definisan matematički model za simulaciju sušenja suspenzija u sistemu sa fontanskim slojem inertnih čestica i cevnom umetkom na osnovu hidrodinamičkog modelovanja i modelovanja prenosa mase i toplote.

Jednodimenzioni model vertikalnog dvofaznog toka gas-čvrste čestice, u koji je uključen model za određivanje brzine i poroznosti u stanju zagušivanja dvofaznog toka, dopunjen je bilansima prenosa mase i toplote u cevnom umetku u cilju predviđanja promene sadržaja vlage u gasovitoj fazi tokom sušenja, promene temperatura gasne faze i čvrste faze. Pri tome treba naglasiti jednu bitnu razliku između fontanskog i fontansko-fluidizovanog sloja sa cevnom umetkom u odnosu na pneumatski transport. U pneumatskom transportu se mogući režimi strujanja razmatraju pri konstantom protoku čestica, dok to kod sistema sa cevnom umetkom nije moguće ostvariti, s obzirom da se oni ponašaju kao "samoregulišući" sistemi kod kojih svaka promena protoka gasa na mlaznici izaziva promenu brzine gasa u cevnom umetku i promenu protoka čvrste faze.

4.3.1. Hidrodinamičko modelovanje vertikalnog dvofaznog toka u cevnom umetku

Većina autora dvofazni tok gas-čestice u cevnom umetku razmatra kao redak pneumatski transport, a kretanje čestica na niže kroz anularni deo kao kretanje pakovanog sloja kroz koji se suprotno-strujno kreće fluid /Claflin, 1982; Yang i Keairns, 1983; Claflin i Fane, 1984; Grbavčić i dr., 1992; Ishikura i dr., 2003/.

Kroz cevni umetak, koji je postavljen u centralnu zonu fontanskog sloja, u principu se odvija pneumatski transport inertnih čestica. Sam transport čestica kroz cevni umetak ne zavisi od vremena, stacionaran je, ali ne sme se zanemariti zona ubrzavanja čestica duž cevi. U toj zoni se brzina čestica povećava od početne vrednosti na ulazu u cev do neke konačne vrednosti na određenoj visini u cevi, i nakon toga ostaje konstantna duž ostatka cevi. Na ovaj način su svi parametri dvofaznog strujanja kroz cev funkcija visine cevi. Režim ubrzavanja čestica bi se mogao zanemariti samo u slučaju veoma dugačkih transportnih cevi, što je u praksi vrlo retko. Imajući u vidu da je u našem sistemu korišćena cev relativno male dužine, za modelovanje cirkulacije inertnih čestica u fontanskom sloju sa cevnom umetkom opravdana je primena bilansnih jednačina koje opisuju vertikalno dvofazno strujanje fluid-čestice u režimu ubrzavanja čestica. Jednodimenzioni model turbulentnog retkog dvofaznog toka gas-krupne čestice u zoni ubrzavanja čestica je razvijen i eksperimentalno verifikovan u ranijim eksperimentalnim istraživanjima /Grbavčić i dr., 1997; Garić i dr., 1995/. Teorijsku osnovu modela vertikalnog dvofaznog toka fluid-čvrste čestice predstavljaju bilansi količine kretanja i jednačine kontinuiteta za obe faze, kao i

varijacioni model za određivanje koeficijenta trenja fluid-čvrste čestice. Jednodimenzioni model vertikalnog dvofaznog toka gas-čvrste čestice omogućuje predviđanje osnovnih parametara dvofaznog toka kroz cev, tj. masenog protoka i brzine čestica, poroznosti i gradijenta pritiska.

Za jednodimenziono strujanje smeše fluid-čestice jednačine kontinuiteta za fluid (gas) i čestice su, respektivno:

$$\frac{d}{dz}(\varepsilon \rho_f u A_d) = \frac{d}{dz} G_f \quad (2.48)$$

$$\frac{d}{dz}((1-\varepsilon) \rho_p v A_d) = \frac{d}{dz} G_p \quad (2.49)$$

Bilans količine kretanja jednodimenzionog strujanja smeše nestišljivog fluida i čestica može se prikazati prema Leung-u /1980a/, pod pretpostavkom da su karakteristike gasa konstantne /Grbavčić, 1989; Littman i dr., 1993/:

$$\rho_f \frac{d}{dz}(\varepsilon u^2) + \rho_p \frac{d}{dz}[(1-\varepsilon)v^2] = \left[-\frac{dp_d}{dz} \right] - [\rho_p(1-\varepsilon) + \rho_f \varepsilon] g - F_w \quad (2.50)$$

Pojedinačni bilansi količine kretanja za fluid i čestice /Nakamura i Capes, 1973; Grbavčić, 1989; Littman i dr., 1993/, respektivno su:

$$\rho_f \frac{d}{dz}(\varepsilon u^2) = \varepsilon \left[-\frac{dp_d}{dz} \right] - \varepsilon \rho_f g - \beta(u-v)^2 - F_f \quad (2.52)$$

$$\rho_p \frac{d}{dz}[(1-\varepsilon)v^2] = (1-\varepsilon) \left[-\frac{dp_d}{dz} \right] + \beta(u-v)^2 - \rho_p g(1-\varepsilon) - F_p \quad (2.53)$$

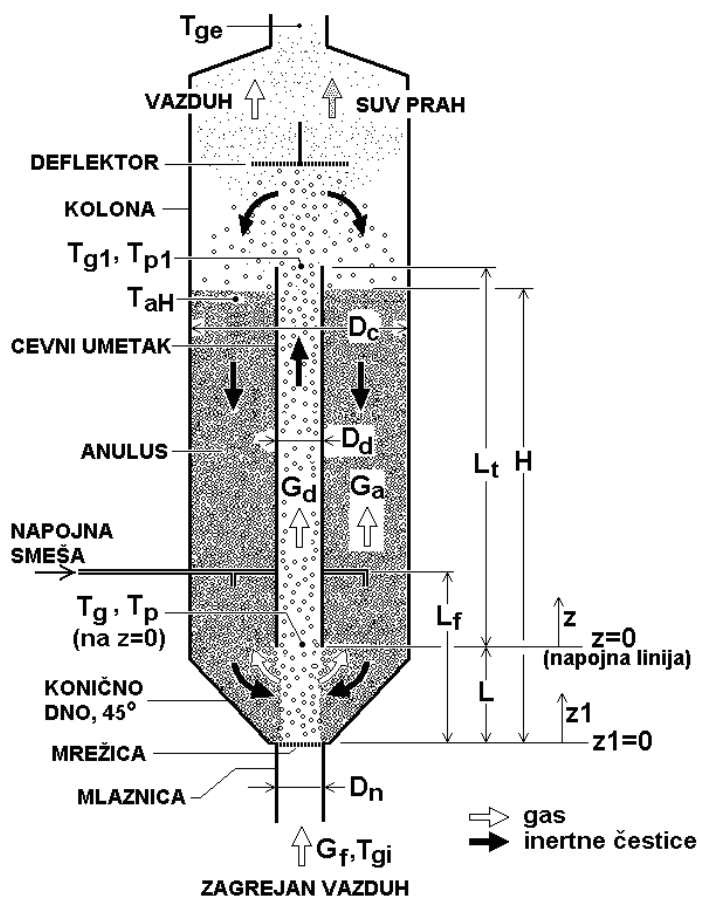
U jednačinama (2.50), (2.52) i (2.53) figuriše srednji lokalni ("statički") pritisak fluida, p_d .

Može se pokazati da zbir individualnih bilanasa količine kretanja daje jednačinu za bilans količine kretanja smeše fluid-čestice, što znači da su samo dve jednačine nezavisne.

U bilansima količine kretanja član $\beta(u-v)^2$ predstavlja silu trenja između fluida i čestica po jedinici mase sloja. F_p i F_f su gradijenti pritiska usled trenja čestice-zid i fluid-zid, respektivno. Za gradijent pritiska usled trenja smeše fluid-čestice o zidove transportne cevi pretpostavlja se aditivni karakter, tj. da se može razdvojiti na gradijent pritiska usled trenja fluid-zid i gradijent pritiska usled trenja čestice-zid transportne cevi (jednačina 2.57), što predstavlja konvenciju, s obzirom da se eksperimentalno može odrediti samo ukupni efekat trenja smeša-zid cevi, pa se na osnovu izračunatog gradijenta pritiska usled trenja fluid-zid iz razlike dobija vrednost za pad pritiska usled trenja čestice-zid.

Gradijenti pritiska usled trenja izazvanog strujanjem fluida i usled trenja čvrstih čestica o zid transportne cevi definišu se jednačinama Fanning-ovog tipa (jednačine 2.58 i 2.59). Lokalni koeficijenti trenja (faktori trenja), f_f i f_p , se mogu odrediti iz jednačina (2.60) i (2.63).

Bilans količine kretanja za smešu gas-čestice je opšte prihvaćen, međutim sporan je bilans količine kretanja za čestice i u literaturi postoji nekoliko jednačina /Leung, 1980a;



Slika 4.3. Šematski prikaz fontanskog sloja sa cevnim umetkom

količine kretanja za vertikalni dvofazni tok, po jednom od algoritama modela (tabela 4.2), mogu se numerički rešiti da bi se dobile vrednosti brzine čestica, poroznosti i gradijenta statičkog pritiska duž transportne cevi ($z > 0$, slika 4.3).

Bilansi količine kretanja za smešu gas-čestice i čestice (jednačine 2.50 i 2.53) mogu se preurediti korišćenjem jednačina kontinuiteta iznad napojne tačke ($z > 0$) u sledeće izraze:

$$-\frac{dp_d}{dz} = \frac{1}{\varepsilon} \left[\beta (u - v)^2 + \rho_f g \varepsilon + F_f - \rho_f u^2 \frac{d\varepsilon}{dz} \right] \quad (4.3)$$

$$-\frac{dp_d}{dz} = \left[\rho_p (1 - \varepsilon) + \rho_f \varepsilon \right] g + F_f + F_p + \gamma \frac{d\varepsilon}{dz} \quad (4.4)$$

$$\text{gde je:} \quad \gamma = \rho_p v^2 - \rho_f u^2 \quad (4.5)$$

Kombinacijom jednačina (4.3) i (4.4) dobija se sledeći izraz:

$$\frac{d\varepsilon}{dz} = \frac{\beta (u - v)^2 - \varepsilon \left[(\rho_p - \rho_f) g (1 - \varepsilon) + F_p \right] + F_f (1 - \varepsilon)}{\gamma \varepsilon + \rho_f u^2} \quad (4.6)$$

Numeričko rešenje jednačine (4.6) u kombinaciji sa jednačinom kontinuiteta za čestice (jednačina 2.49) i jednačinom (4.3) daje aksijalne vrednosti poroznosti, brzine

Littman i dr., 1993/. S obzirom da nisu utvrđene značajne prednosti bilo kog bilansa količine kretanja za čestice u odnosu na jednačinu (2.53) /Littman i dr., 1993/, ova jednačina je uključena u naš model. Da bi se u određenom sistemu odredili pad pritiska, brzina fluida, brzina čestica i poroznost, pored jednačina kontinuiteta (jednačine 2.48 i 2.49), bilansa količine kretanja smeše fluid-čestice (jednačina 2.50) i bilansa količine kretanja za čestice (jednačina 2.53), potrebne su i odgovarajuće korelacije za predviđanje gradijenta pritiska usled trenja fluid-čestice (β), fluid-zid transportne cevi (F_f) i čestice-zid transportne cevi (F_p) /Grbavčić, 1989/.

Ako je poznata površinska brzina gasa i maseni protok čestica jednačine kontinuiteta i bilansi

čestica, brzine fluida i gradijenta pritiska duž transportne cevi. U ovim proračunima F_f je izračunato iz jednačina (2.58) i (2.60), F_p iz jednačina (2.59) i (2.63), a β iz jednačine (2.24). Brzine gasa i čestica su zatim određivane iz jednačina kontinuiteta (jednačine 2.48 i 2.49), dok je $-dp_d/dz$ je izračunato iz jednačina (4.3) ili (4.4). Početni uslov za jednačinu (4.6) je vrednost poroznosti na ulazu u transportnu cev, ε_0 (na $z=0$, slika 4.3). Numeričkom integracijom izračunatog gradijenta pritiska duž transportne cevi se dobija aksijalni profil statičkog pritiska duž transportne cevi. Za ovaj proračun granični uslov je bio statički pritisak izmeren na vrhu transportne cevi (p_{d1}).

S obzirom da vazduh, koji se uvodi u kolonu sa fontanskim slojem i cevnom umetkom, delimično penetrira iz fontane u anularni deo sloja u okviru ulazne zone sloja (ispod cevnog umetka), ukupni maseni protok vazduha predstavlja zbir protoka kroz anularni deo sloja i kroz transportnu cev:

$$G_v = G_d + G_a \quad (4.7)$$

Maseni protok vazduha kroz anularnu zonu sloja (G_a) može se indirektno odrediti merenjem gradijenta pritiska u anularnoj zoni i korišćenjem eksperimentalno uspostavljene korelacije za zavisnost gradijenta pritiska od Reynolds-ovog broja date jednačinom (4.1).

4.3.1.1. *Koeficijenti trenja fluid-čestice, fluid-zid i čestice-zid*

Bezdimenzioni koeficijent trenja fluid-čvrste čestice (β) određuje se iz korelacije dobijene korišćenjem varijacionog računa i partikulativno fluidizovanog sloja kao model sistema /Grbavčić i dr., 1991/. Za partikulativno fluidizovani sloj se pretpostavlja da je veza između koeficijenta trenja fluid-čestice i gradijenta pritiska takva da je u celom opsegu poroznosti za određeni gradijent pritiska trenje minimalno. U partikulativno fluidizovanom sloju su potpuno definisani početak i kraj odgovarajućeg intervala poroznosti, tj. granični uslovi. Početak intervala je stanje minimalne fluidizacije, a kraj kada su sve čestice odnešene strujom fluida iz sloja. Zavisnost koeficijenta trenja fluid-čestice od poroznosti, prema principima varijacionog računa, definisana je jednačinom Euler-Lagrange-ovog tipa /Grbavčić i dr., 1991/:

$$\frac{\beta}{\beta_{mF}} = 1 - C_2 + \frac{1}{\lambda} \left[1 - \left(\lambda \frac{\varepsilon - \varepsilon_{mF}}{1 - \varepsilon_{mF}} + C_1 \right)^2 \right]^{1/2} \quad (2.24)$$

Konstante koje figurišu u zavisnosti koeficijenta trenja fluid-čestice od poroznosti, C_1 , C_2 i λ , su definisane jednačinama (2.25), (2.26) i (2.27), a koeficijent trenja fluid-čestice u stanju minimalne fluidizacije (β_{mF}) je definisan jednačinom (2.28). Prema ovom modelu je zavisnost koeficijenta trenja od poroznosti, odnosno od koncentracije čestica, u potpunosti definisana karakteristikama čestica i fluida i uslova u tački minimalne fluidizacije. To praktično znači da β zavisi samo od bezdimenzionog parametra $U_{mF}^2 / (\varepsilon_{mF}^3 U_t^2)$ koji se jednostavno može eksperimentalno odrediti.

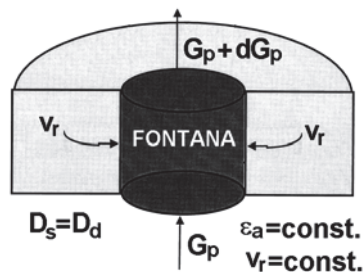
uvek pretpostavljena vrednost poroznosti koja odgovara stanju minimalne fluidizacije, što je ujedno i najveća vrednost koju može imati pakovan sloj.

Čestice se iz anularne zone u fontanu kreću radialno. Na dnu fontane aksijalna brzina i koncentracija čestica su jednake nuli. Duž fontane brzina čestica se povećava, a poroznost smanjuje da bi na ulazu u transportnu cev dostigle neke vrednosti v_0 i ε_0 . Ove vrednosti su konačne za fontanu unutar ulazne zone (ispod cevnog umetka), a istovremeno početne za transportnu cev.

Sam transport čestica kroz cevni umetak ne zavisi od vremena, stacionaran je, ali ne sme se zanemariti zona ubrzavanja čestica u cevi u kojoj se brzina čestica i dalje povećava od vrednosti v_0 na ulazu u cev do konačne vrednosti, na nekoj visini, i zatim ostaje konstantna duž ostatka cevi. Na ovaj način su svi parametri dvofaznog strujanja kroz cev funkcija visine cevi. Režim ubrzavanja čestica bi se mogao zanemariti samo u slučaju veoma dugačkih transportnih cevi, što je u praksi vrlo retko.

Grbavčić i dr. /1997/ su predložili metod za određivanje uslova na ulazu u transportnu cev, za slučaj kad je anularna zona zatvorena na vrhu gde nema isticanja gasa za fontanovanje iz fontane u anularni deo unutar ulazne zone, primenjujući Mathur-ov i Epstein-ov /1974/ opšti bilans sila za čestice u fontani.

Na osnovu analize snimaka ulazne zone fontanskog sloja, načinjenih brzim kamerama /Thorley i dr., 1959; Lefroy i Davidson, 1969/ zapaženo je da se kontinualno, u pravilnim vremenskim intervalima, sloj čestica na granici između fontane i anularne zone obrušava, koje zatim zahvata mlazni tok vazduha.



Slika 4.5. Kretanje čestica u diferencijalnoj zapremini fontane ulazne zone

Efekte sudara između čestica u fontani postaju značajni, međutim mogu se zanemariti kada je rastojanje transportne cevi od mlaznice kratko. S toga se pretpostavlja da je radijalna brzina čestica, na granici fontana-anularni prostor, konstantna. Pretpostavljajući da je prečnik fontane konstantan i približno jednak prečniku cevi, postavljanjem masenog bilansa za element zapremine fontane unutar ulazne zone (slika 4.5), dolazi se do izraza za maseni protok čestica na vrhu fontane u ulaznoj zoni, odnosno kroz transportnu cev:

$$G_p = \rho_p A_d c_s = \int_{-L}^0 \rho_p v_r (1 - \varepsilon_a) \pi D_d dz = \rho_p v_r (1 - \varepsilon_a) \pi D_d L \quad (4.8)$$

U jednačini (4.8) ε_a predstavlja poroznost pokretnog pakovanog sloja u anularnoj zoni i konstantna je. Iz prethodne jednačine, na osnovu kontinuiteta (jednačina 2.49) između $z=-L$ i $z=0$, dobija se izraz:

$$A_d \frac{d}{dz} [v (1 - \varepsilon)] = v_r (1 - \varepsilon_a) \pi D_d \quad (4.9)$$

Kombinacijom jednačina (4.8) i (4.9) dobija se linearna zavisnost površinske brzine čestica u fontani od visine fontane, tj. u oblasti između $z=-L$ i $z=0$:

$$v(1-\varepsilon) = c_s \frac{z}{L} \quad (4.10)$$

Marthur i Epstein /1974/ postavili su bilans sila za dno fontanskog sloja, uz pretpostavku da sila koja ubrzava čestice u fontani potiče od trenja fluida koji nosi čestice, a sila koja ih usporava je gravitaciona sila:

$$\frac{1}{2} \frac{v^2}{n_z} \frac{dn_z}{dz} + v \frac{dv}{dz} = \frac{3\rho_f(u-v)^2 C_D}{4\rho_p d_p} - \frac{(\rho_p - \rho_f)g}{\rho_p} \quad (4.11)$$

Ovaj bilans je iskorišćen za opisivanje kretanja roja čestica kroz fontanu između $z=-L$ i $z=0$. Kumulativni broj čestica u fontani takođe linearno zavisi od visine i može se pokazati da je:

$$n_z = \frac{6v_r(1-\varepsilon_a)D_d}{d_p^3} z \quad (4.12)$$

Kombinovanjem jednačine (4.12) sa bilansom sila Mathur-a i Epstein-a /1974/ (jednačina 4.11), dobija se:

$$\frac{1}{2} \frac{v^2}{z} + v \frac{dv_s}{dz} = \frac{3\rho_f(u-v)^2 C_D}{4\rho_p d_p} - \frac{(\rho_p - \rho_f)g}{\rho_p} \quad (4.13)$$

U ovoj jednačini C_D predstavlja koeficijent trenja usled opstrujavanja čestica, koji se može dovesti u vezu sa bezdimenzionim koeficijentom trenja fluid-čestice (β), određenim pomoću varijacionog modela.

Sila trenja koja na deluje na jednu izolovanu česticu u suspenziji fluid-čestice će za faktor $f(\varepsilon)$ biti veća od sile koja deluje na usamljenu česticu u fluidu:

$$F_{D1} = f(\varepsilon) \cdot F_{Ds} = \frac{1}{2} f(\varepsilon) \cdot C_{Ds} (u-v)^2 \rho_f (\pi d_p^2 / 4) \quad (4.14)$$

Sila trenja između fluida i čestica po jedinici mase sloja $\beta(u-v)^2$ se prevodi na silu trenja koja deluje na jednu izolovanu česticu u suspenziji fluid-čestice sledećim izrazom:

$$F_{D1} = \frac{\beta(u-v)^2}{(1-\varepsilon)} (\pi d_p^3 / 6) \quad (4.15)$$

Kombinacijom jednačina (4.14) i (4.15) dobija se veza između koeficijenta otpora za česticu u suspenziji (C_D) i koeficijenta trenja fluid-čestice (β):

$$C_D = C_{Ds} \cdot f(\varepsilon) = \frac{4d_p}{3(1-\varepsilon)\rho_f} \beta \quad (4.16)$$

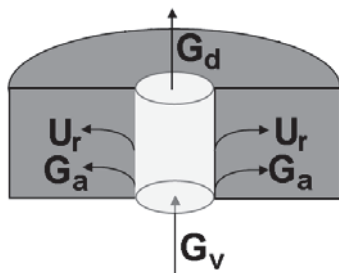
Kombinovanjem jednačina (4.13) i (4.16) dobija se sledeći izraz /Grbavčić i dr., 1997/:

$$\frac{v^2}{z_1} + v \frac{dv}{dz_1} = \frac{\beta (u - v)^2}{\rho_p (1 - \epsilon)} - \frac{(\rho_p - \rho_f)g}{\rho_p} \quad (4.17)$$

Jednačina (4.17) se može numerički rešiti ako je poznata površinska brzina fluida, maseni protok čestica, dimenzije fontane u ulaznoj zoni i uz početni uslov da je na poziciji $z=-L$ brzina čestica i njihova koncentracija jednaka nuli, tj. $v=0$ i $(1-\epsilon)=0$. Ovaj početni uslov je često korišćen u literaturi koja se bavi klasičnim fontanskim slojevima /Mathur i Epstein, 1974/. Kao rešenje se dobijaju aksijalne promene brzine čestica i poroznosti u fontani. Parametri strujanja izračunati na ovaj način za vrh fontane u ulaznoj zoni ($z=0$) istovremeno su početne vrednosti za dvofazno strujanje kroz transportnu cev tj. $(v)_{z=0}=v_0$ i $(\epsilon)_{z=0}=\epsilon_0$. U tabeli 4.1 date su vrednosti izračunatih parametara dvofaznog toka staklene sfere-vazduh na ulazu u cev, odnosno konačne vrednosti za fontanu u ulaznoj zoni, za tri rastojanja transportne cevi od mlaznice.

Tabela 4.1. Izračunati strujni parametri na ulazu u transportnu cev ($d_p=1.94$ mm)

L,mm	U,m/s	G_p ,kg/s	ϵ_0	v_0 ,m/s	$(d\epsilon/dz)_{z=0}$,1/m	$(dv/dz)_{z=0}$,1/s	C_D
20	13.06	0.0536	0.9257	0.408	-1.36	12.89	0.670
30	15.37	0.1354	0.8952	0.730	-1.29	15.36	0.772
40	16.05	0.3367	0.8300	1.118	-1.45	18.41	0.999



Slika 4.6. Raspodela protoka vazduha u diferencijalnoj zapremini ulazne zone

U fontanskom sloju deo vazduha koji se uvodi kroz mlaznicu u centralni deo kolone delimično penetrira iz fontane u anularni deo, tako da brzina vazduha opada duž fontane u ulaznoj zoni. S obzirom da je fontana relativno kratka, pretpostavljeno je da je radijalna brzina vazduha na granici fontana-anularna zona konstantna duž fontane u ulaznoj zoni (U_r , slika 4.4 i 4.6). Ukupni maseni protok vazduha je zbir protoka kroz anularnu zonu i kroz fontanu. Maseni protok vazduha kroz anularnu zonu sloja (G_a) može se indirektno odrediti merenjem gradijenta pritiska u anularnoj zoni i korišćenjem eksperimentalno uspostavljene korelacije za zavisnost gradijenta pritiska od brzine gasa, odnosno Reynolds-ovog broja (jednačina 4.1). Iz materijalnog bilansa proizilazi izraz za površinsku brzinu vazduha kroz fontanu unutar ulazne zone:

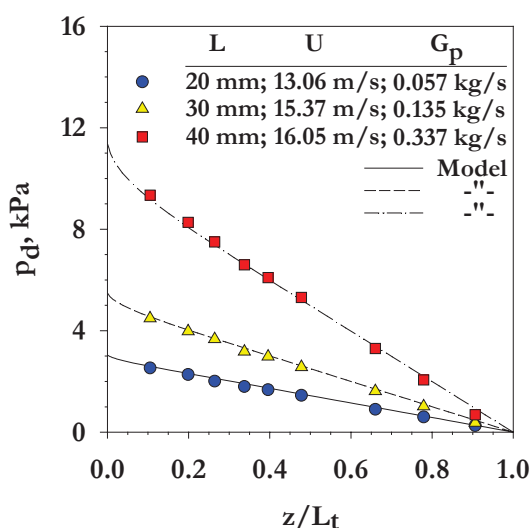
$$U = \frac{4}{\rho_f \pi D_d^2} \left(G_v - G_a \frac{z_1}{L} \right) \quad (4.18)$$

Treba napomenuti da su u našem sistemu prečnici mlaznice i transportne cevi identični $D_d = D_n$. Ako su poznati maseni protok vazduha na ulazu u kolonu (G_v), maseni protok vazduha

kroz anularnu zonu sloja (G_a) i površinska brzina čestica (c_s), jednačina (4.17), u kombinaciji sa jednačinama (4.10) i (4.18), se može rešiti numerički da bi se dobile vrednosti brzine čestica i poroznosti u fontani unutar ulazne zone. Početni uslov za ovaj proračun su $v=0$ i $\varepsilon=1$ na dnu fontane, tj. na $z=0$ (ili $z=-L$). Izračunate vrednosti strujnih parametara za vrh fontane ($z=0$) su konačne za fontanu, a istovremeno početne za transportnu cev, tj. $(v)_{z=0}=v_0$ i $(\varepsilon)_{z=0}=\varepsilon_0$.

4.3.1.3. Eksperimentalna verifikacija modela dvofaznog vertikalnog toka

Eksperimentalna verifikacija modela prikazana je na slici 4.7 /Garić, 1995/, gde su upoređene izmerene i izračunate vrednosti statičkog pritiska duž transportne cevi, i može se uočiti veoma dobro slaganje.



Slika 4.7. Aksijalni profil statičkog pritiska u transportnoj cevi; upoređenje izračunatih i izmerenih vrednosti ($d_p=1.94$ mm)

Model je eksperimentalno verifikovan i merenjem koncentracije čestica, odnosno poroznosti, izvan zone ubrzavanja čestica u transportnoj cevi i poređenjem ovih vrednosti sa izračunatim vrednostima takođe je dobijeno dobro slaganje.

U opisanom modelu za izračunavanje osnovnih fluido-dinamičkih karakteristika vertikalnog dvofaznog toka (G_p , G_d , $-dp_d/dz$ i ε), postoje samo dve nezavisne jednačine, a četiri nepoznate veličine. Algoritam proračuna se može razdvojiti na šest algoritama, pri čemu u svakom algoritmu dve veličine egzistiraju kao poznate, a preostale dve se određuju.

U tabeli 4.2 šematski je prikazana upotreba modela u zavisnosti od poznatih veličina.

Od mogućih varijanti primene modela za izračunavanje osnovnih parametara vertikalnog toka gas-čvrste čestice, prikazanih u tabeli 4.2, najčešće se koristi algoritam I.

Tabela 4.2. Pregled mogućih algoritama za izračunavanje osnovnih parametara dvofaznog vertikalnog toka

Algoritam	Poznate veličine	Izračunate veličine
I	$U(G_d)$ $-dp_d/dz$	v ε $G_p=f(v, \varepsilon)$
II	$U(G_d)$ G_p	$-dp_d/dz$ ε $v=f(G_p, \varepsilon)$
III	$U(G_d)$ ε	$-dp_d/dz$ v $G_p=f(v, \varepsilon)$
IV	$-dp_d/dz$ G_p	U ε $v=f(G_p, \varepsilon)$
V	$-dp_d/dz$ ε	v U $G_p=f(v, \varepsilon)$
VI	G_p ε	$-dp_d/dz$ U $G_d=f(U, \varepsilon)$

Ovim algoritmom se izračunavaju vrednosti brzine, odnosno protoka čestica i poroznosti, ako su poznate vrednosti protoka gasa i gradijenta pritiska. Postupak rešavanja se zasniva na metodi probe i greške, tj. proverava se da li je izračunata vrednost brzine čestica, odnosno masenog protoka čestica jednaka sa pretpostavljenom vrednošću. Postupak izračunavanja se ponavlja sve dok se ovaj uslov ne ispuni. Algoritam I je eksperimentalno verifikovan /Garić, 1995/, pri čemu srednje relativno odstupanje između izračunatih i izmerenih vrednosti za protok čestica iznosi oko 5%.

U tabeli 4.3 su dati rezultati proračuna prema algoritmu I za dvofazni tok gas-staklene sfere ($d_p=1.94$ mm) kroz transportnu cev postavljenoj na rastojanju $L=30$ mm od mlaznice, kao ilustracija pouzdanosti predviđanja strujnih parametara.

Tabela 4.3. Predviđanje protoka čestica na osnovu poznate brzine gasa i vrednosti statičkog pritiska u transportnoj cevi na jednoj poziciji

$d_p=1.94$ mm		$L=30$ mm		$U=15.37$ m/s		$p_{at}=0$ (anularni prostor je zatvoren na vrhu)	
Eksperimentalni podaci		$G_p=0.1354$ kg/s		$p_d(z)=p_d(1.155$ m)=3668 Pa		$(-dp_d/dz)_{st}=1156$ Pa/m	
Pretpostavljene vrednosti		Izračunate vrednosti					
		van zone ubrzavanja čestica		na ulazu u transportnu cev			$z=1.155$ m
G_p , kg/s	ϵ_{st}	v_{st} m/s	$-dp_d/dz _{st}$ Pa/m	ϵ_0	v_0 m/s	$-dp_d/dz _0$ Pa/m	$p_d(z)$ Pa
0.0900	0.9813	2.719	840	0.9187	0.624	7538	2733
0.1100	0.9783	2.859	966	0.9066	0.665	9463	3144
0.1365	0.9745	3.022	1126	0.8920	0.713	12161	3667
0.1500	0.9727	3.098	1206	0.8851	0.737	13596	3927
0.1650	0.9707	3.178	1293	0.8778	0.762	15241	4211

U ovom primeru za navedeni sistem eksperimentalno je određen maseni protok čestica ($G_p=0.1354$ kg/s) i izmeren statički normalni pritisak na poziciji $z=1.155$ m u transportnoj cevi ($p_d=3668$ Pa). U tabeli su prikazane izračunate vrednosti statičkog pritiska na $z=1.155$ m na osnovu pretpostavljene vrednosti masenog protoka čestica. Važno je uočiti da je izračunata vrednost pritiska, koja je skoro identična sa izmerenom vrednošću, dobijena za pretpostavljeni maseni protok čija je vrednost približno ista eksperimentalnoj, što nedvosmisleno potvrđuje pouzdanost metode za predviđanje strujnih parametara. Praktično, to znači da je moguća kontrola cirkulacije inertnih čestica u fontanskom sloju sa cevnom umetkom na osnovu regulacije pritiska u jednoj tački duž transportne cevi.

Važno je podsetiti da fontanski sloj sa cevnom umetkom generalno predstavlja izuzetan sistem za doziranje čvrstih čestica. Osnovna karakteristika ovog sistema za doziranje je nefluktuirajući, odnosno ravnomerni protok čvrstih čestica, koji se lako kontroliše podešavanjem rastojanja transportne cevi od mlaznice (L) i/ili podešavanjem brzine fluida kroz mlaznicu (U).

4.3.2. Predviđanje poroznosti i brzine zagušivanja u cevnom umetku

U sušnici sa fontanskim slojem inertnih čestica i cevnom umetkom, cevni umetak predstavlja glavni deo sistema, pošto se u njemu najvećim delom odvija proces sušenja suspenzija usled najvećih vrednosti koeficijenata prenosa mase i toplote. Kroz cevni umetak se u principu odvija vertikalni dvofazni tok gas-inertne čestice, tako da se modelovanje ovog sistema svodi na modelovanje procesa u pneumatskom transportu. U Poglavlju 2.2.1 su opisani različiti režimi strujanja koji se mogu javiti u vertikalnom toku gas-čestice, a u Poglavlju 2.2.4 su navedeni neki od velikog broja modela, metoda i korelacija za predviđanje početka zagušivanja u sistemima gas-monodisperzne čestice. Sa aspekta vođenja procesa u sušnici pod stabilim uslovima veoma je bitno poznavanje brzine zagušenja, odnosno minimalne brzine gasa potrebne da se ostvari redak stabilan vertikalni transport inertnih čestica kroz cevni umetak za dati protok inertnih čestica.

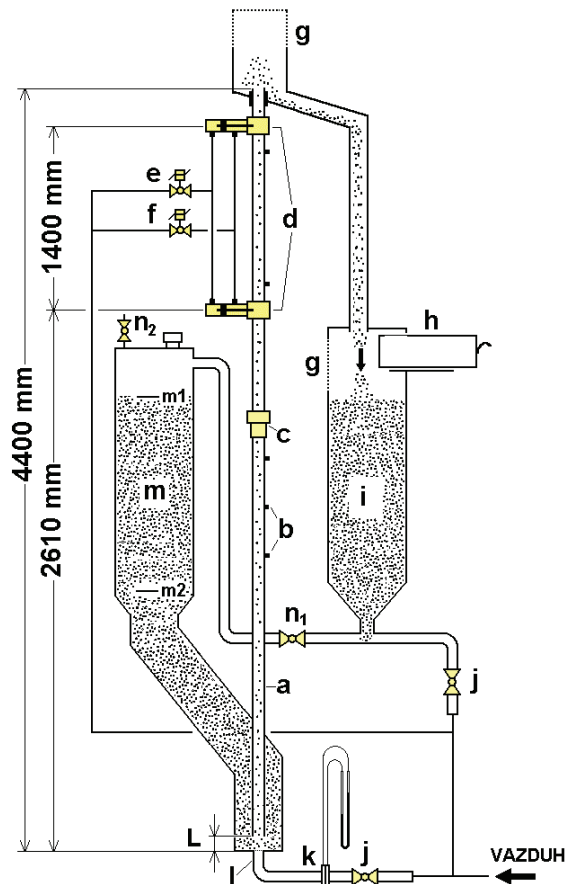
S obzirom da u toku izvođenja oglada sušenja suspenzija u sušnici sa fontanskim slojem inertnih čestica i cevnom umetkom nije bilo moguće meriti koncentraciju inertnih čestica u cevnom umetku, konstruisan je poseban sistem za eksperimentalno određivanje brzine zagušenja vertikalnog dvofaznog toka gas-čestice. U ovoj analizi je razmatran sistem gas-monodisperzne krupne sferične čestice ($d_p > 0.5 \text{ mm}$, grupa D prema Geldart-ovoj /1973/ klasifikaciji), pošto je pojava klasičnog zagušivanja zapažena uglavnom u transportnim cevima malog prečnika ($D_d < 0.1 \text{ m}$), sa relativno krupnim i/ili teškim česticama (čestice velike gustine).

4.3.2.1. *Eksperimentalni sistem za određivanje koncentracije čestica i brzine zagušenja u vertikalnom transportu gas-čestice*

Eksperimentalno ispitivanje pneumatskog transporta sferičnih staklenih čestica vazduhom je izvođeno u sistemu, koji je šematski prikazan na slici 4.8. Dužina transportne cevi (a) unutrašnjeg prečnika 30 mm je iznosila 4.4 m. Cev je postavljena u modifikovani fontanski sloj (sa anularnim prostorom zatvorenim na vrhu) sa ciljem da se obezbedi nefluktuirajući kontrolisan tok čestica. Test sekcija počinje od pozicije $z = 2.61 \text{ m}$. Pomoću dve pneumatski kontrolisane pločice (d) zatvarana je test sekcija ukupne dužine 1.4 m. "Hold-up" čestica je određivan merenjem zahvaćenog uzorka nakon razdvajanja cevi na poziciji (c).

Vazduh je uvođen na dnu sloja kroz mlaznicu (l) prečnika 24 mm. Protok vazduha je meren pomoću kalibrisane prigušne ploče (k). Rastojanje između dna sloja i početka transportne cevi (L, slika 4.8) je varirano od 20 do 50 mm. Protok čestica je meren pomoću pokretne kutije (h) u kojoj su zahvatane čestice u toku definisanog vremenskog perioda. Rad sistema je semi-kontinualan. Svaki ogled je izvođen do trenutka kad nivo sloja u rezervoaru čestica (m) ne dostigne zadatu donju granicu visine sloja (m_2) u odnosu na početnu visinu sloja (m_1). Do donje granice visine sloja čestica u rezervoaru (m_2) promena visine sloja ne utiče приметно na maseni protok čestica. U toku oglada ventili n_1 i n_2 su

zatvarani da bi se omogućilo merenje protoka vazduha kroz transportnu cev pomoću prigušne ploče (k). Između dva uzastopna ogleda čestice su vraćane iz rezervoara (i) u rezervoar (m). Pritisci su mereni u devet pozicija duž cevi. Svi ogledi su izvođeni u režimu stacionarnog pneumatskog transporta, tj. van zone ubrzavanja čestica. U zoni van ubrzavanja čestica nema varijacija vrednosti brzine čestica, poroznosti i brzine vazduha, a promena pritiska je linearna duž cevi. Svi podaci izmerenih promena pritiska duž test sekcije su bili linearna funkcija aksijalnog rastojanja.



Slika 4.8. Šematski prikaz eksperimentalnog sistema za određivanje koncentracije čestica i brzine zagušenja u vertikalnom transportu gas-čestice

a-transportna cev, b-priključci za merenje pritiska, c-spojnicica, d-pneumatski zatvarači, e-elektromagnetni ventil za zatvaranje pneumatskog zatvarača, f-elektromagnetni ventil za otvaranje pneumatskog zatvarača, g-mrežica, h-kutija za merenje protoka čestica, i-prihvatni rezervoar, j-ventili, k-prigušna ploča, l-mlaznica, m-dozer čestica (fontanski sloj sa zatvorenom anularnom zonom na vrhu, gornji deo ϕ 200 mm, donji deo 140x140 mm), n-“on-off” ventili

Treba naglasiti bitnu razliku između opisanog sistema za vertikalni tok gas-čestice i onih koji se susreću u literaturi. U literaturi su mogući režimi pneumatskog transporta uglavnom ispitivani pri konstantnom protoku čestica. Opisani eksperimentalni sistem se ponaša kao samoregulišući sistem, kod koga svaka promena protoka gasa na dnu aparature (na mlaznici) izaziva promenu protoka čestica kroz transportnu cev.

U ogledima su korišćene sferične staklene čestice prečnika 1.20, 1.94 i 2.98 mm, a njihove osnovne karakteristike su date u tabeli 4.4. U ovoj tabeli su takođe date i

karakteristike čestica koje su koristili Capes i Nakamura /1973/ u svom radu. Prema korelacijama koje su dali Yousfi i Gau /1974/, Smith /1978/ i Yang /1983/, prikazani sistem, kao i sistem Capes-a i Nakamura-e /1973/ predstavljaju sisteme sklone zagušivanju.

Tabela 4.4. Karakteristike sferičnih čestica korišćenih za proveru korelacija zagušivanja

čestice	d_p mm	ρ_p kg/m ³	U_t^* m/s
Capes i Nakamura /1973/, $D_d=76.2$ mm			
1	0.535	7850	9.07
	1.20	7700	15.3
	2.34	7700	21.37
2	2.90	2860	14.49
	1.78	2900	11.44
	1.08	2900	8.93
3	3.40	911	8.85
4	1.78	1085	6.99
ovaj rad, $D_d=30$ mm			
2	1.20	2641	8.96
	1.94	2507	11.10
	2.98	2509	13.76
1-čelik, 2-staklo, 3-polietilen, 4-seme uljane repice			

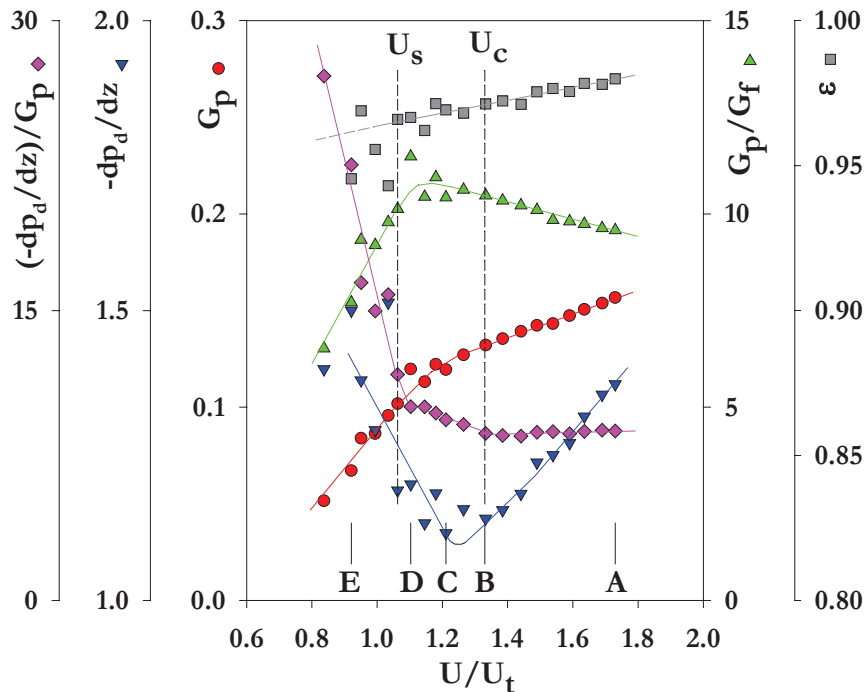
* računato prema Kunii-u i Levenspiel-u /1969/

4.3.2.2. Eksperimentalno određivanje brzine zagušenja

U slučaju kada se koristi fontanski sloj sa zatvorenom anularnom zonom na vrhu kao sistem za doziranje čestica, pouzdano eksperimentalno određivanje brzine zagušenja je komplikovano, s obzirom da se smanjenjem brzine gasa takođe smanjuje i protok čestica prouzrokujući produženje prelazne zone iz retkog pneumatskog transporta u stanje zagušivanja. Na slici 4.9 su prikazane promene G_p , $-dp_d/dz$, $(-dp_d/dz)/G_p$, G_p/G_f i ε sa U/U_t za čestice prečnika $d_p=1.94$ mm. Eksperimentalno su identifikovana tri karakteristična režima transporta. Pri velikim brzinama gasa odvija se redak transport sa približno uniformnom raspodelom čestica u dvofaznom toku. Smanjenjem brzine gasa povećava se zapreminska koncentracija čestica i na nekoj vrednosti brzine gasa dolazi do zagušivanja (U_c , slika 4.9) kada otpočinje vertikalni tok čestica u vidu agregata (klipova). Između tačaka U_c i U_s (slika 4.9) je stabilan gusti tok sa klipovima čestica.

U_s predstavlja minimalnu brzinu gasa za stabilan tok sa klipovima čestica, s obzirom da se ispod ove vrednosti brzine gasa klipovi naizmenično formiraju i raspadaju pri čemu čestice recirkulišu između uzastopnih klipova. Daljim smanjenjem brzine gasa dostiže se neka kritična vrednost, ispod koje se više ne može obezbediti transport čestica pošto pri ovoj brzini gasa čestice ne dospevaju do kraja transportne cevi, tj. pneumatski transport više ne egzistira. U režimu retkog transporta ($U>U_c$) u našem sistemu odnos $(-dp_d/dz)/G_p$ je približno

konstantan. U stabilnom transportu sa klipovima čestica ($U_s < U < U_c$) ovaj odnos se polako povećava sa smanjenjem brzine gasa, da bi u nestabilnom transportu sa klipovima čestica ($U < U_s$) došlo do naglog porasta odnosa $(-dp_d/dz)/G_p$ sa smanjenjem brzine gasa.



Slika 4.9. Promena G_p (kg/s), $-dp_d/dz$ (kPa/m), $(-dp_d/dz)/G_p$ (kPa·s/kg·m), G_p/G_f i ε sa U/U_t ($d_p=1.94$ mm, $L=30$ mm)

U_s - minimalna brzina gasa za stabilan tok sa klipovima čestica, U_c -brzina zagušenja
(A, B, C, D, E – videti sliku 4.10)

Na slici 4.10 su prikazane fluktuacije pritiska dobijene pri frekvenciji od 50 Hz na rastojanju $z=3.81$ m od početka transportne cevi za pet karakterističnih režima transporta. Satija i dr. /1985/ su predložili analizu standardne devijacije lokalnog statičkog pritiska u transportnoj cevi kao pogodnu metodu karakterizacije režima i određivanja stanja zagušivanja. Ovaj metod karakterizacije režima transporta je upotrebljen u ovom radu za identifikaciju režima za sve kombinacije veličine čestica (d_p) i rastojanja transportne cevi od mlaznice (L) obuhvaćenih u eksperimentima.

Na slici 4.11 je prikazana standardna devijacija (STD) lokalnog statičkog pritiska fluida na zidu transportne cevi kao funkcija površinske brzine gasa. Sa slike se vidi da promena $STD(p_i)$ sa U jasno ukazuje na režim transporta. Sa smanjenjem brzine gasa prva promena nagiba prikazane zavisnosti se pojavljuje na vrednosti brzine gasa U_c , dok se sledeća promena nagiba javlja na vrednosti U_s .

U tabeli 4.5 su prikazani eksperimentalni podaci pri zagušivanju Capes-a i Nakamura-e /1973/ zajedno sa podacima iz ovog rada.

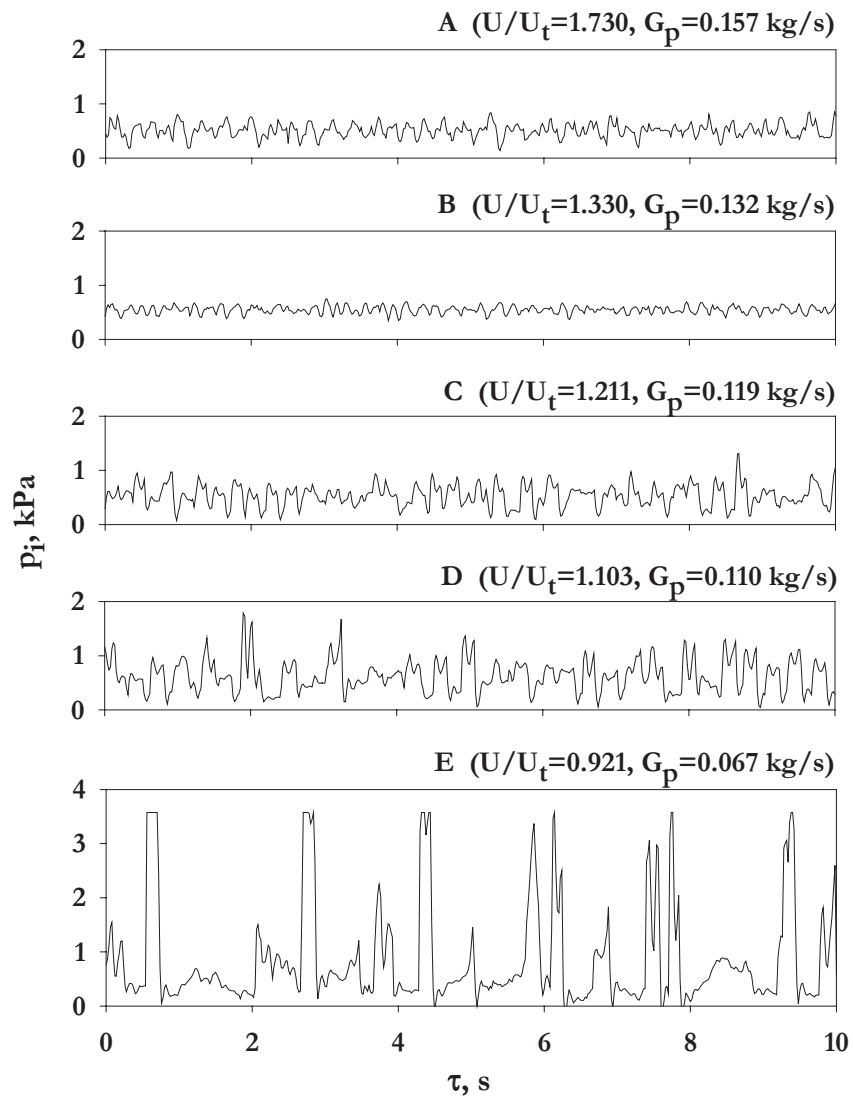
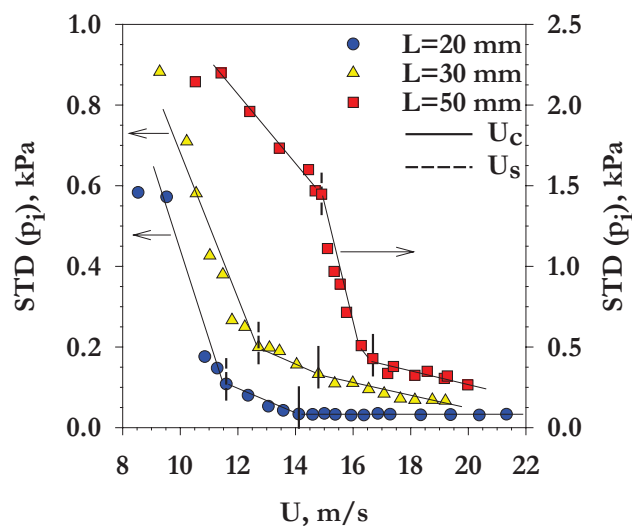
Slika 4.10. Fluktuacije pritiska u zavisnosti od U/U_t ($d_p=1.94$ mm, $L=30$ mm)Slika 4.11. Zavisnost standardne devijacije lokalnog statičkog pritiska od površinske brzine gasa ($d_p=1.94$ mm)

Tabela 4.5. Eksperimentalni podaci pri zagušivanju

čestice	d_p mm	G_p kg/s	c_s m/s	U_c m/s	ϵ_c	U_c/U_t	u_{sc}/U_t
Capes i Nakamura /1973/, $D_d=76.2$ mm							
1	0.535	0.3652	0.01020	11.28	0.9968	1.243	0.896
	0.535	0.1164	0.00325	10.39	0.9983	1.145	0.936
	0.535	0.0326	0.00091	10.39	0.9993	1.145	1.003
	1.20	0.4811	0.01370	15.06	0.9937	0.984	0.848
	1.20	0.0924	0.00263	15.58	0.9985	1.018	0.905
	1.20	0.0379	0.00108	14.57	0.9986	0.952	0.903
	2.34	0.6215	0.01770	19.02	0.9902	0.890	0.814
	2.34	0.2549	0.00726	19.32	0.9954	0.904	0.835
	2.34	0.0790	0.00225	19.35	0.9986	0.906	0.832
2	2.90	0.2361	0.01810	16.16	0.9938	1.115	0.920
	2.90	0.0908	0.00696	16.13	0.9969	1.113	0.961
	2.90	0.0219	0.00168	16.69	0.9994	1.151	0.959
	1.78	0.1825	0.01380	12.95	0.9950	1.132	0.897
	1.78	0.1653	0.01250	11.38	0.9713	0.995	0.986
	1.78	0.0386	0.00292	11.29	0.9788	0.987	0.997
	1.78	0.0340	0.00257	12.95	0.9986	1.132	0.974
	1.78	0.0136	0.00103	11.71	0.9869	1.024	1.031
	1.08	0.2341	0.01770	10.36	0.9794	1.163	1.091
3	3.40	0.0590	0.01420	9.34	0.9923	1.055	0.855
	3.40	0.0227	0.00546	10.27	0.9970	1.160	0.958
	3.40	0.0053	0.00127	10.36	0.9991	1.170	1.012
4	1.78	0.0945	0.01910	7.20	0.9876	1.030	0.822
	1.78	0.0393	0.00795	7.19	0.9942	1.028	0.838
	1.78	0.0020	0.00260	7.20	0.9975	1.030	0.884
ovaj rad, $D_d=30$ mm							
2	1.20	0.0539	0.02886	10.11	0.9844	1.128	0.940
	1.20	0.1508	0.08080	11.55	0.9721	1.289	1.003
	1.20	0.3377	0.18089	13.19	0.9501	1.472	1.145
	1.20	0.4610	0.24692	13.93	0.9419	1.555	1.176
	1.94	0.0615	0.03469	14.12	0.9836	1.272	1.103
	1.94	0.1321	0.07454	14.80	0.9713	1.333	1.139
	1.94	0.3367	0.18998	16.05	0.9441	1.446	1.225
	1.94	0.4284	0.24175	16.69	0.9272	1.504	1.323
	2.98	0.0736	0.04149	15.60	0.9759	1.134	1.036
	2.98	0.1119	0.06308	16.77	0.9706	1.219	1.100
	2.98	0.1805	0.10179	17.59	0.9571	1.278	1.163
	2.98	0.2408	0.13578	18.60	0.9390	1.352	1.278

1-čelik, 2-staklo, 3-polietilen, 4-seme uljane repice

Uzimajući u obzir navedene eksperimentalne metode za određivanje stanja zagušivanja, glavni zaključci proistekli iz naših ispitivanja su:

- Na dijagramu $-dp_d/dz \div U$ stanje zagušivanja je blizu minimuma (slika 4.9), odnosno nije vrednost asimptote (znatno levo od minimuma) kako je navedeno kod nekih autora /Yang,

2004/. U stanju zagušivanja, u sistemu iz ovog rada, odnos gradijenta pritiska i protoka čestica $(-dp_d/dz)/G_p$ počinje da se povećava sa smanjenjem brzine gasa. Vrednosti brzine zagušenja U_c određene na osnovu dijagrama $STD(p_i) \div U$ su praktično identične vrednostima koje su određene iz $(-dp/dz)/G_p \div U$ dijagrama. Treba napomenuti da je korišćen odnos $(-dp_d/dz)/G_p$, pošto u ispitivanom sistemu protok čestica (G_p) varira sa U/U_t . Ova zapažanja su u saglasnosti sa rezultatima Costa-e i dr. /2004/, koji su pneumatski transportovali sferne staklene čestice prečnika 1.0, 1.75 i 2.85 mm u cevima prečnika 81.4, 104.8 i 147 mm. Ovi autori su zapazili da se povećanje nagiba zavisnosti $STD(p_i) \div U$ podudara sa početkom transporta čestica u vidu klipova. Costa i dr. /1973/ su naveli da minimumi na dijagramima $(-dp_d/dz) \div U$ sugerišu na fizičku promenu strukture toka u blizini U_{min} i da je U_{min} neznatno veće od U_c za većinu ispitivanih uslova. Do sličnih zaključaka se može doći i na osnovu podataka prikazanih na slici 4.8. Rezultati Costa-e i dr. (slika 8, /1973/) pokazuju da odnos $(U_{min})_{exp}/(U_c)_{exp}$ varira između vrednosti 0.96 i 1.26 (srednja vrednost je 1.09).

- Vizuelna procena stanja zagušivanja je u saglasnosti sa definicijom Yousfi-a i Gau-a /1974/, tj. da do zagušivanja dolazi kada agregati (klipovi) čestica zauzimaju ceo poprečni presek cevi.

- U našim eksperimentima pri malim brzinama vazduha nije zapažena recirkulacija čestica sa obrazovanjem centralnog jezgra čestica (koje se kreću naviše) oko koga je anularni prostor, uz zid cevi, u kome se čestice kreću naniže. Međutim, ovakvo ponašanje je najverovatnije karakteristično za transport čestica kroz cevi velikog prečnika. Bi i Grace /1995/ su predložili mape za identifikaciju režima dvofaznog strujanja za fluidizaciju u sistemima gas-čestice i vertikalni transport. Za čestice prečnika $d_p=0.20$ mm i transportnu cev prečnika 150 mm transport čestica se odvija unutar centralnog jezgra i anularnog prostora u širokom opsegu. Ovaj režim je između režima homogenog retkog transporta i brze fluidizacije.

- Korišćenje statističkih parametara za fluktuacije pritiska prema Satija-i i dr. /1985/, Bai-i i dr. /1998/ i Costa-i i dr. /2004/, tj. grafika kao što je slika 4.11, predstavlja najobjektivniji metod za određivanje prelaznih stanja između mogućih režima dvofaznog toka.

4.3.2.3. Model za predviđanje poroznosti i brzine zagušivanja

U ranijim ispitivanjima postavljen je i eksperimentalno verifikovan jednodimenzioni model za vertikalni stacionarni dvofazni tok gas-čestice van zone ubrzavanja čestica /Garić i dr., 1995/. Model se zasniva na bilansima količine kretanja i jednačinama kontinuiteta prema Nakamura-i i Capes-u /1973/ i varijacionom modelu za izračunavanje međufaznog koeficijenta trenja fluid-čestice /Grbavčić i dr., 1991/. Bilansi količine kretanja za fluid i čestice u sistemu sa vertikalnim tokom fluid-čestice van zone ubrzavanja su /Nakamura i Capes, 1973/:

$$\varepsilon \left[-\frac{dp_d}{dz} \right] = \beta (u - v)^2 + \varepsilon \rho_f g + F_f \quad (4.19)$$

$$(1 - \varepsilon) \left[-\frac{dp_d}{dz} \right] = -\beta (u - v)^2 + \rho_p g (1 - \varepsilon) + F_p \quad (4.20)$$

gde je $\beta(u-v)^2$ sila trenja između fluida i čestica po jedinici mase dvofazne smeše, a p_d srednji lokalni ("statički") pritisak fluida.

Gradijenti pritiska usled trenja čestice–zid i fluid–zid, F_p i F_f , definisani su pomoću koeficijentata trenja f_f i f_p , u jednačinama (2.58) i (2.59).

Relativna brzina između fluida i čestica u transportnoj cevi se dobija iz bilansa količine kretanja smeše fluid–čestice i bilansa količine kretanja smeše fluida /Garić i dr., 1995/:

$$u_s = u - v = u_{sF} \sqrt{F^*} \quad (2.73)$$

gde je u_{sF} relativna brzina između faza u partikulativno fluidizovanom sloju sa istom poroznosti kao u transportnoj cevi:

$$u_{sF} = \frac{U_{mF}}{\varepsilon} \sqrt{\frac{\varepsilon^3(1-\varepsilon)}{\varepsilon_{mF}^3(1-\varepsilon_{mF})}} \cdot \frac{\beta_{mF}}{\beta} \quad (2.72)$$

F^* bezdimenzioni gradijent pritiska usled trenja definisan kao:

$$F^* = 1 + \frac{F_p}{F_e} - \frac{F_f}{F_e} \frac{1-\varepsilon}{\varepsilon} \quad (2.74)$$

gde je F_e statička težina sloja u fluidizovanom stanju:

$$F_e = (\rho_p - \rho_f)g(1-\varepsilon) \quad (2.13)$$

Bezdimenzioni koeficijent trenja fluid–čestice se određuje na osnovu principa varijacionog računa /Grbavčić i dr., 1991/ iz jednačine (2.24).

Gradijent pritiska van zone ubrzavanja čestica se dobija kombinacijom jednačina (4.19) i (4.20):

$$-\frac{dp_d}{dz} = F_e + F_f + F_p \quad (2.75)$$

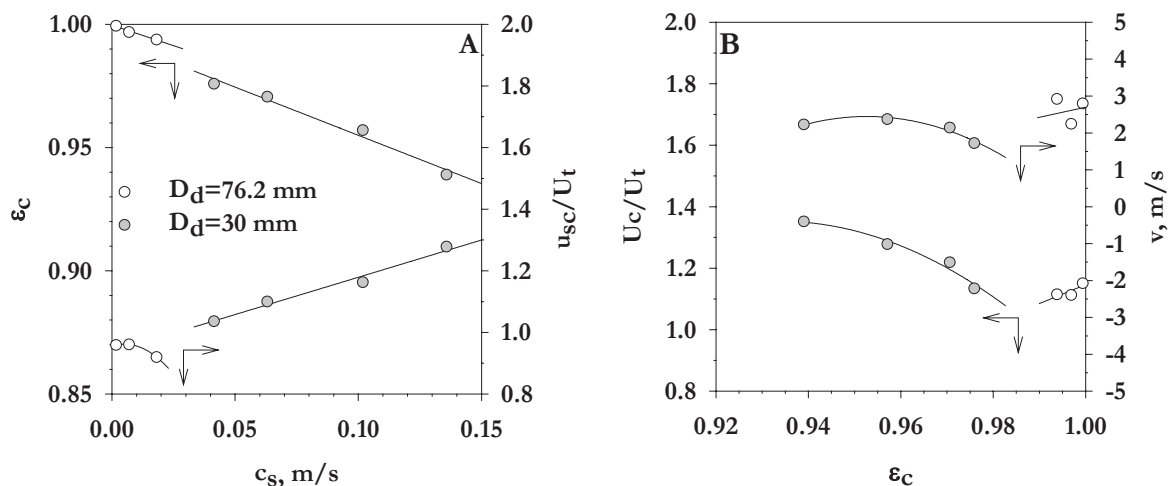
U bilansima količine kretanja i jednačinama kontinuiteta figurišu četiri zavisno promenljive (u , v , $-dp_d/dz$ i ε) i tri parametra β , F_f i F_p , stoga su potrebne dve poznate veličine da bi se izvršio proračun. Za praktičnu primenu najvažnija su dva algoritma /Grbavčić i dr., 1992/: 1) određivanje ε , v i G_p ako su poznate vrednosti za U i $-dp_d/dz$ i 2) određivanje ε , v i $-dp_d/dz$ ako su poznate vrednosti za U i G_p .

Obično treba predvideti brzinu zagušenja i odgovarajuću poroznost u stanju zagušivanja za datu vrednost masenog protoka čestica. Za ovaj proračun potrebna je još jedna nezavisna jednačina, odnosno dodatni uslov za stanje zagušivanja.

Razmatrajući dodatni uslov u stanju zagušivanja, proračuni su ukazali na sledeće zaključke:

- Pretpostavka da je $u_{sc}=U_t$ u stanju zagušivanja je veoma gruba, što je evidentno na osnovu podataka iz tabele 4.5. Slika 4.12 prikazuje eksperimentalne podatke pri zagušivanju za približno iste čestice (staklene sfere $d_p \approx 3$ mm) u transportu kroz cevi različitih prečnika ($D_d=30$ mm za podatke iz ovog rada i $D_d=76.2$ mm za podatke Capes-a i Nakamura-e /1973/). Za male protoke čestica, tj. za male površinske brzine čestica, odnos u_{sc}/U_t je blizak

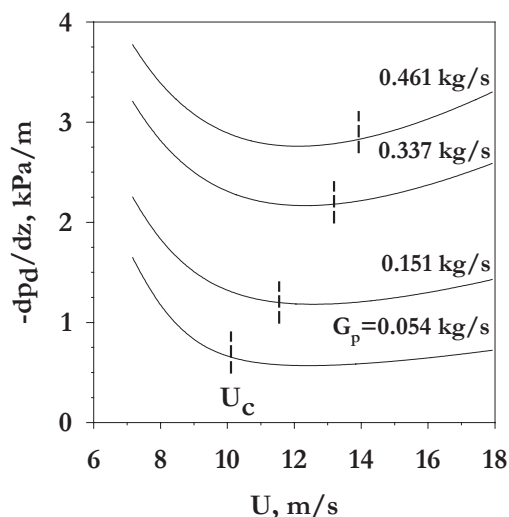
jedinici, međutim, sa povećanjem površinske brzine čestica ovaj odnos se značajno povećava. Poroznost pri zagušivanju, ε_c , opada sa povećanjem površinske brzine čestica (slika 4.12). Površinska brzina gasa pri zagušivanju (U_c) varira između $1.1 \cdot U_t$ i $1.35 \cdot U_t$, gde U_t predstavlja brzinu odnošenja usamljene čestice. Brzina čestica pri zagušivanju u ove dve transportne cevi se kreće između 1.8 i 2.8 m/s, zavisno od poroznosti (slika 4.12).



Slika 4.12. Eksperimentalni podaci za stanje zagušivanja pri transportu čestica približno iste veličine kroz cevi različitog prečnika

neosenčeni simboli - podaci Capes-a i Nakamura-e /1973/, $d_p=2.90$ mm, $\rho_p=2860$ kg/m³, $D_d=76.2$ mm; osenčeni simboli - podaci iz ovog rada, $d_p=2.98$ mm, $\rho_p=2509$ kg/m³, $D_d=30$ mm; **A** - ε_c i u_{sc}/U_t u zavisnosti od c_s , **B** - U_c/U_t i v u zavisnosti od ε_c

- Proveravana je pretpostavka da se pojava zagušivanja za konstantni protok čestica podudara sa minimumom na grafiku $-dp_d/dz \div U$. Na slici 4.13 su prikazane proračunate zavisnosti $-dp_d/dz \div U$ za konstantne vrednosti protoka čestica prečnika $d_p=1.20$ mm. Proračun je izveden

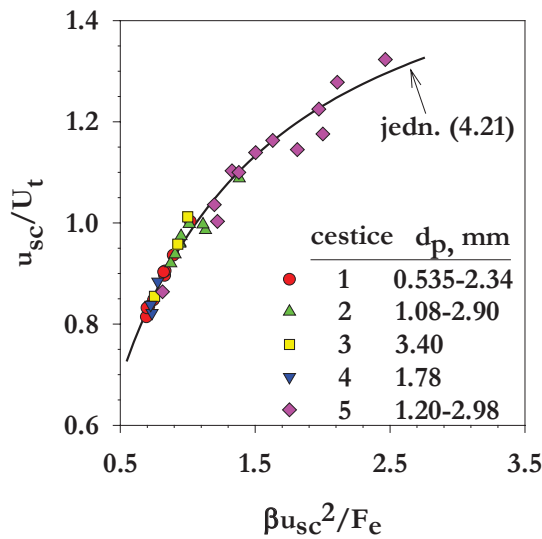


Slika 4.13. Izračunati profili $-dp_d/dz$ u zavisnosti od U , za konstantne protoke čestica ($D_d=30$ mm, $d_p=1.20$ mm)

U_c predstavlja eksperimentalno određene vrednosti brzine zagušenja za konstantne protoke čestica

prema algoritmu detaljno opisanom u radu /Grbavčić i dr., 1992/. Sa slike se može videti da protok čestica ne utiče značajno na minimume, dok, sa druge strane, eksperimentalni podaci ukazuju na povećanje U_c sa povećanjem protoka čestica. Treba napomenuti da minimumi na grafiku $-dp_d/dz \div U$ za male protoke čestica nisu jasno izraženi. Za podatke Capes-a i Nakamura-e /1973/ slijanje eksperimentalnih i predviđenih podataka je relativno dobro pri malim protocima čestica, dok za velike protoke čestica predviđene vrednosti znatno premašuju eksperimentalne. Eksperimentalni podaci Capes-a i Nakamura-e /1973/ ukazuju da je pri malim protocima čestica stanje

zagušivanja blisko minimumu na grafiku $-dp_d/dz \div U$, međutim, pri velikim protocima čestica eksperimentalna stanja zagušivanja su pomerena znatno levo od minimuma.



Slika 4.14. Zavisnost u_{sc}/U_t od $\beta u_{sc}^2/F_e$ pri zagušivanju

trenja po jedinici zapremine sloja)/(efektivna težina sloja po jedinici zapremine sloja), tj. $u_{sc}/U_t = f(\beta u_{sc}^2/F_e)$. Slika 4.14 prikazuje ovu zavisnost, a podaci su korelisani sledećim izrazom:

$$\frac{u_{sc}}{U_t} = 1.652 \frac{\beta u_{sc}^2 / F_e}{0.6986 + \beta u_{sc}^2 / F_e} \quad (4.21)$$

Srednje apsolutno odstupanje između eksperimentalnih podataka iz tabele 4.5 i jednačine (4.21) iznosi 1.74%.

Finalni set jednačina za predviđanje brzine zagušivanja i poroznosti u tački zagušivanja za određeni maseni protok čestica (G_p) je:

$$u_{sc} = \frac{U_{mF}}{\epsilon_c} \sqrt{\frac{\epsilon_c^3 (1 - \epsilon_c)}{\epsilon_{mF}^3 (1 - \epsilon_{mF})} \cdot \frac{\beta_{mF}}{\beta} \cdot F^*} = 1.652 \frac{\beta u_{sc}^2 / F_e}{0.6986 + \beta u_{sc}^2 / F_e} U_t \quad (4.22)$$

$$i \quad u_{sc} = \frac{U_c}{\epsilon_c} - \frac{G_p}{\rho_p A_t (1 - \epsilon_c)} \quad (4.23)$$

U prethodnim jednačinama β je određeno iz jednačina (2.24), (2.25) do (2.28). Brzina minimalne fluidizacije je izračunavana prema Ergun-ovoj /1952/ jednačini uz pretpostavku da je $\epsilon_{mF} = 0.42$. Bezdimenzioni koeficijent trenja, F^* , je računat iz jednačine (2.74). F_f je određivan iz jednačine (2.58), uz korišćenje standardne korelacije za koeficijent trenja fluid-zid (jednačina 2.60) /Bird i dr., 1960/. F_p je određivan iz jednačine (2.59), korišćenjem korelacije za koeficijent trenja čestice-zid, f_p , /Garić i dr., 1995/ za naše podatke:

$$f_p \frac{\epsilon^3}{1 - \epsilon} \frac{U}{U_t} = 0.0017 \left[\frac{1 - \epsilon}{u_s / U_t} \right]^{-1.5} \quad (2.63)$$

- Uzimajući u obzir Yang-ovu /1983, 1975/ matematičku definiciju stanja zagušivanja, naši podaci za koeficijent trenja za čestice ukazuju na to da je $(f_p)_c$ približno konstantan za čestice $d_p = 2.98$ m, dok za ostale ispitivane čestice $(f_p)_c$ značajno opada sa povećanjem površinske brzine fluida. Pored toga, ovi eksperimenti su izvođeni sa znatno većim površinskim brzinama čestica neko eksperimenti koji su bili osnova za uspostavljanje Yang-ove korelacije.

U cilju razvoja modela za predviđanje brzine zagušivanja i odgovarajuće poroznosti u ovom radu je pretpostavljeno da je u stanju zagušivanja relativna brzina između gasa i čestica funkcija odnosa (hidrodinamička sila

dok je za podatke Capes-a i Nakamura-e /1973/ korišćena korelacija koju su predložili isti autori:

$$f_p = 0.0017 / v^{1.22}, \quad v \text{ (m/s)} \quad (4.24)$$

U tabeli 4.6 je prikazano poređenje eksperimentalnih podataka za brzinu zagušivanja krupnih čestica sa predviđenim vrednostima na osnovu predloženog modela, kao i sa predviđenim vrednostima na osnovu nekoliko korelacija iz literature. Predloženi model pokazuje dobro slaganje sa raspoloživih 36 podataka za stanje zagušivanja u sistemima sa krupnim česticama sa srednjim apsolutnim odstupanjem od 7.2% za U_c .

Tabela 4.6. Poređenje eksperimentalnih vrednosti brzine zagušivanja i odgovarajućih poroznosti sa predviđanim vrednostima prema različitim korelacijama i modelima

korelacija/model	srednje apsolutno odstupanje (%)		
	U_c	ϵ_c	$1-\epsilon_c$
Leung /1971/	8.6	8.70	813.7
Yousfi i Gay /1974/	91.1	-	-
Yang /1975/	13.5	1.03	44.5
Knowlton i Bachowchin /1976/	279.8	-	-
Punwani i dr. /1976/	13.8	2.46	95.8
Yang /1983/	10.6	0.61	47.1
Mink /1983/	91.1	-	-
Briens i Bergougnou /1986/	28.3	1.09	67.3
Day i dr. /1990/	6.9	-	-
Bi i Fan /1991/	32.4	-	-
ovaj rad	7.2	0.80	261.2

Pokušano je poređenje predloženog modela sa podacima Costa-e i dr. /2004/ uz pretpostavku da se korelacija Capes-a i Nakamura-e /1973/ za koeficijent trenja čestice-zid može primeniti za njihove sisteme. Međutim, Costa i dr. /2004/ su u radu naveli samo eksperimentalne podatke za U_{\min} i grafik $(U_c)_{\text{exp}} \div (U_{\min})_{\text{exp}}$. Pretpostavljajući da je $U_c = U_{\min}$, srednje apsolutno odstupanje u predviđanju U_c za 20 podataka je 13.1%. Vrednost odnosa $(U_{\min})_{\text{exp}} / (U_c)_{\text{exp}}$ u proseku iznosi 1.09 (slika 8 u /Costa i dr., 2004/). S obzirom da odnos $(U_{\min})_{\text{exp}} / (U_c)_{\text{exp}}$ prema predloženom modelu ima srednju vrednost 1.10, čini se da se predloženi model takođe slaže u zadovoljavajućim granicama sa podacima Costa-e i dr. /2004/.

4.3.2.4. Protok čestica pri zagušivanju (granični kapacitet)

Maseni protok čvrste faze pri zagušivanju je definisan kao /Yang, 1983/:

$$(G_p)_c = \rho_p A_t v_c (1 - \epsilon_c) \quad (4.25)$$

Tačnost predviđanja graničnog kapaciteta, tj. masenog protoka čestica pri zagušivanju za datu brzinu gasa predstavlja mnogo teži problem nego predviđanje brzine zagušenja za dati protok čestica. Na osnovu podataka iz tabele 4.6 može se zapaziti da

većina korelacija i modela za predviđanje brzine zagušenja veoma dobro predviđaju vrednosti ε_c , ali veoma loše predviđaju vrednosti koncentracije čestica ($1-\varepsilon_c$). Ovo je posledica činjenice da je u ovim sistemima poroznost veoma velika, tako da mala greška u predviđanju poroznosti (ε_c) prouzrokuje veliku grešku u predviđanju koncentracije čestica ($1-\varepsilon_c$). Na primer, ako je $\varepsilon_c=0.98$, tada greška od 1% u predviđanju ε_c prouzrokuje grešku od 49% u predviđanju koncentracije čestica ($1-\varepsilon_c$). Međutim, loše predviđanje koncentracije čestica ($1-\varepsilon_c$) delom je kompenzovano odstupanjima pri predviđanju brzine čestica, tako da ukupno odstupanje u predviđanju površinske brzine čestica $v(1-\varepsilon_c)$ može biti niže. Na osnovu proračuna graničnog kapaciteta $(G_p)_c$, prema predloženom modelu za izračunavanje brzine zagušenja, dobijeno je srednje apsolutno odstupanje u odnosu na naše eksperimentalne vrednosti od 30%. Međutim, za podatke Capes-a i Nakamura-e /1973/ predviđanje je veoma loše, a u nekim slučajevima ne može se postići konvergencija modela, tj. u nekim slučajevima se dobijaju negativne vrednosti $(G_p)_c$. Model Day-a i dr. /1990/ za eksperimentalne podatke iz ovog rada daje skoro istu tačnost sa predviđanjima graničnog kapaciteta $(G_p)_c$ prema prikazanom modelu, dok za podatke Capes-a i Nakamura-e /1973/ daje isto tako loše predviđanje kao i predloženi model. Model Yang-a /1983/ predviđa znatno veće vrednosti graničnog kapaciteta u odnosu na eksperimentalne vrednosti iz ovog rada (do 500%). Predviđanja graničnog kapaciteta za podatke Capes-a i Nakamura-e /1973/ su veoma loša, pri čemu se takođe u nekim slučajevima dobijaju negativne vrednosti $(G_p)_c$. Prema tome, predviđanje graničnog kapaciteta $(G_p)_c$ pri određenoj brzini gasa je još uvek nepouzđano.

4.3.3. Bilansi prenosa toplote i mase u cevnom umetku

Većina procesa prenosa mase i toplote se uglavnom odvija u cevnom umetku, s obzirom da su tu najveći koeficijenti prenosa, tako da se modelovanje fontanskog i fontansko-fluidizovanog sloja sa cevnom umetkom svodi na modelovanje procesa u pneumatskom transportu, uključujući pri tom i ulaznu zonu koja ima ključni uticaj na raspodelu fluida i cirkulaciju čestica u sloju /Freitas i Freire, 2001/. Pretpostavlja se da postoji termička ravnoteža između gasa i čestica u spoljnoj fontani, iznad cevnog umetka (minimalni prenos toplote gasu) /Eng i dr., 1989/. Većina autora pretpostavlja formiranje tankog uniformnog filma suspenzije na površini inertnih čestica, a s obzirom da inertne čestice u sloju obezbeđuju veliku površinu kontakta, procesi prenosa toplote i mase su brzi čak i kad je povećan sadržaj vlage u agensu za sušenje (atmosferskom vazduhu), s obzirom da se ovakav vazduh, usled načina izvođenja procesa, i dalje nalazi u stanju udaljenom od stanja termodinamičke ravnoteže sa kondenzatom vlage. Iz ovog razloga se može smatrati da nema otpora difuziji vlage i prenosu toplote kroz film suspenzije i da se sušenje odvija u periodu "kvazi-konstantne" brzine sušenja. U tom periodu temperatura površine inertnih čestica ostaje približno konstantna i bliska je temperaturi adijabatskog zasićenja vazduha (T_{wb}) /napr. Lee i Kim, 1993, 1999; Szentmarjay i dr., 1996; Kerkhof, 2000; Leontieva, 2002; Kudra i Mujumdar, 2002; Kutsakova, 2004/. Kutsakova i Utkin /1987/ su dobili

dobro slaganje eksperimentalnih podataka sa poluempirijskom zavisnosti za zadržavanje produkata na inertnim česticama izvedenom na osnovu pretpostavke da nema gradijenata temperature i sadržaja vlage kroz formirani film produkta, i u slučaju formiranja više slojeva (formiranje novog sloja pre otiranja prethodnog).

Za modelovanje prenosa mase i toplote duž transportne cevi u našem sistemu usvojene su sledeće pretpostavke:

- proces sušenja filma suspenzije, oformljenog na površini inertne čestice, počinje na ulazu u transportnu cev, tj. na $z=0$,
- proces sušenja se odvija samo u transportnoj cevi,
- suspenzija formira film uniformne debljine oko inertne čestice,
- film suspenzije i inertna čestica se tretiraju kao jedinstvena čestica,
- temperature filma suspenzije, inertne čestice i suve materije iz suspenzije imaju iste vrednosti,
- prenos toplote i mase su stacionarni procesi,
- nema otpora difuziji vlage i prenosu toplote kroz film suspenzije.

Iz bilansa prenosa isparene vlage sa površine inertnih čestica u gasnu fazu se dobija zavisnost masenog protoka vlage (vode) od koeficijenta prenosa mase:

$$G'_d (1 + y) dy = \frac{h_D M_R}{RT_g} a A_d (p_S - p_B) dz \quad (4.26)$$

Model podrazumeva da je na površini inertne čestice, tj. na tečnom filmu, parcijalni pritisak vodene pare jednak pritisku zasićenja (naponu pare), a oko čestice je parcijalni pritisak vodene pare u gasovitoj fazi. U ovom bilansu figurišu sadržaj vlage u gasovitoj fazi (smeša suvozasicene vodene pare i suvog vazduha), pritisak zasićenja vodene pare na površini tečnog filma koji je funkcija temperature inertnih čestica (T_p) i specifična površina sloja inertnih čestica.

Sadržaj vlage u gasovitoj fazi, odnosno apsolutna vlažnost vazduha (na T_p) i parcijalni pritisak vodene pare neposredno iznad površine tečnog filma, tj. pritisak zasićenja vodene pare, su dati izrazima /Valent, 2001/:

$$y = \frac{0.662 \phi p_S(na T_p)}{p - \phi p_S(na T_p)} \quad (4.27)$$

$$p_S = \frac{yP}{0.662 + y} \quad (4.28)$$

Specifična površina sloja inertnih čestica je po definiciji:

$$a = \frac{6(1 - \epsilon)\psi}{d_p} \quad (4.29)$$

Temperatura gasovite faze se menja usled toplote prenete tečnom filmu kojim su obložene inertne čestice:

$$\left(G'_d C_{pgsv} + G_{H_2O}^G C_{pw}^G\right) \frac{dT_g}{dz} = h_p a A_d (T_g - T_p) \quad (4.30)$$

Gasovita faza predaje toplotu na zagrevanje inertnih čestica, vode i suve materije u filmu suspenzije, i na isparavanje tečne faze vode:

$$\left(G'_d C_{pgsv} + G_{H_2O}^G C_{pw}^G\right) \frac{dT_g}{dz} = \left(G_p C_{pp} + G_{H_2O}^L C_{pw}^L + G_m C_{pm}\right) \frac{dT_p}{dz} + G'_d r_w \frac{dy}{dz} \quad (4.31)$$

Koeficijent prenosa toplote (h_p) je određen iz korelacije Ranz-a i Marshall-a /1952/ za usamljenu česticu, s obzirom da je u cevnom umetku režim retkog stabilnog dvofaznog toka vazduh-inertne čestice, tj. $\epsilon > 0.95$:

$$Nu_p = 2 + 0.6 Re_p^{1/2} Pr^{1/3} \quad (4.32)$$

Koeficijent prenosa mase (h_D) je određen iz korelacije koju su predložili Clift i dr. /1978/:

$$Sh_p = 1 + 0.752 Re_p^{0.472} \cdot Sc^{1/3} \left[1 + (Re_p Sc)^{-1}\right]^{1/3} \quad (4.33)$$

U korelacijama za prenos toplote i mase je za određivanje Reynolds-ovog broja za inertnu česticu korišćena relativna brzina između gasne faze i čestica [$Re_p = (d_p \rho_f u_s) / \mu$].

Difuzivnost vodene pare u vazduhu je određivana na osnovu jednačine Eckert-a i Drake-a /1972/:

$$D_g = 2.302 \cdot 10^{-5} \left[\frac{p}{p_0} \left(\frac{T_g + 273}{T_0} \right)^{1.81} \right] \quad (4.34)$$

gde su $p_0 = 0.98 \cdot 10^5 \text{ N/m}^2$ i $T_0 = 256 \text{ K}$.

Bezdimenzioni stepen isparavanja tečne faze vode u transportnoj cevi (takozvani stepen osušenosti), koji definiše količinu prirasta vlage u gasnoj fazi prema maksimalno mogućem prirastu vlage, računat je prema sledećem izrazu:

$$x_A = \frac{y - y_0}{y_e - y_0} \quad (4.35)$$

gde je sadržaj vlage u gasnoj fazi pri potpunom isparavanju vode:

$$y_e = y_0 + \frac{G_{H_2O}^L}{G'_d} \quad (4.36)$$

U tabeli 4.7 su prikazane relacije za određivanje fizičko-hemijskih parametara nezasićenog vlažnog vazduha (idealna gasovita smeša suvog vazduha i suvozasićene vodene pare), koje su korišćene u numeričkom rešavanju predstavljenog modela.

Tabela 4.7. Jednačine za određivanje karakteristika nezasićenog vlažnog vazduha

$M_R = \frac{(1+y)M_{sv}M_{H_2O}}{yM_{sv} + M_{H_2O}}$	/Đorđević i dr., 1997/
$\rho_f = \rho_{sv}(1+y)$	/Valent, 2001/
$C_{pg} = C_{pgsv} + yC_{pw}^G$	/Valent, 2001/
$\mu = \frac{\mu_{sv}M_{sv}^{-1/2} \left[1 - \frac{y}{1+y} \right] + \mu_w^G M_{H_2O}^{-1/2} \left[\frac{y}{1+y} \right]}{M_{sv}^{-1/2} \left[1 - \frac{y}{1+y} \right] + M_{H_2O}^{-1/2} \left[\frac{y}{1+y} \right]}$	/Valent, 1995/
$\lambda_g = \frac{\lambda_{sv}M_{sv}^{-2/3} \left[1 - \frac{y}{1+y} \right] + \lambda_w^G M_{H_2O}^{-2/3} \left[\frac{y}{1+y} \right]}{M_{sv}^{-2/3} \left[1 - \frac{y}{1+y} \right] + M_{H_2O}^{-2/3} \left[\frac{y}{1+y} \right]}$	/Valent, 2001/

U tabeli 4.8 su prikazane temperaturne zavisnosti relevantnih fizičko-hemijskih parametara za suv vazduh, suvozasieenu vodenu paru i vodu u tečnoj fazi.

Tabela 4.8. Fizičko-hemijski parametri suvog vazduha, vodene pare i tečne vode u zavisnosti od temperature /Đorđević i dr., 1997/

suv vazduh	$\rho_{sv} = 1.271 - 4.303 \cdot 10^{-3} T_g + 1.029 \cdot 10^{-5} T_g^2 - 1.096 \cdot 10^{-8} T_g^3$	$T_g = 0-350^\circ\text{C}$
	$C_{pgsv} = 1.006 + 1.152 \cdot 10^{-5} T_g + 5.077 \cdot 10^{-7} T_g^2 - 3.612 \cdot 10^{-10} T_g^3$	
	$\mu_{sv} = (17.039 + 4.742 \cdot 10^{-2} T_g - 2.262 \cdot 10^{-5} T_g^2 + 1.497 \cdot 10^{-10} T_g^3) \cdot 10^{-6}$	
	$\lambda_{sv} = (24.642 + 7.112 \cdot 10^{-2} T_g) \cdot 10^{-6}$	
vodena para	$\rho_w^G = -0.1095 + 0.013 \cdot T_g - 2.563 \cdot 10^{-4} T_g^2 + 1.944 \cdot 10^{-6} T_g^3$	$T_g = 0-200^\circ\text{C}$
	$C_{pw}^G = 1.792 + 5.919 \cdot 10^{-3} T_g - 6.406 \cdot 10^{-5} T_g^2 + 3.035 \cdot 10^{-7} T_g^3$	$T_g = 0-300^\circ\text{C}$
	$\mu_w^G = (77.407 + 0.597 \cdot T_g - 2.017 \cdot 10^{-3} T_g^2 + 4.718 \cdot 10^{-6} T_g^3) \cdot 10^{-7}$	$T_g = 0-350^\circ\text{C}$
	$\lambda_w^G = (0.017 + 1.148 \cdot 10^{-4} T_g - 6.308 \cdot 10^{-7} T_g^2 + 2.823 \cdot 10^{-9} T_g^3) \cdot 10^{-3}$	$T_g = 0-300^\circ\text{C}$
tečna voda	$\rho_w^L = 1000.155 - 0.0113 \cdot T_g - 4.87 \cdot 10^{-3} T_g^2 + 7.7027 \cdot 10^{-6} T_g^3$	$T_g = 0-200^\circ\text{C}$
	$C_{pw}^L = 4.21 - 1.097 \cdot 10^{-3} T_g + 9.889 \cdot 10^{-6} T_g^2 + 1.34 \cdot 10^{-8} T_g^3$	
	$r_w = 2495.413 - 2.033 \cdot T_g - 3.537 \cdot 10^{-3} T_g^2$	$T_g = 0-200^\circ\text{C}$
	$T_{wb} = 30.2858 \cdot p_s + \frac{75.3953 \cdot p_s}{0.0749 + p_s}$	

4.3.4. Algoritam modela sušenja suspenzija u fontanskom sloju inertnih čestica sa cevnom umetkom

Bilansi mase i toplote su rešavani po visini transportne cevi podeljene u jednake inkremente. Pretpostavljeno je da su inertne čestice uvek obložene tankim filmom tečnosti, vodom ili suspenzijom. Promena brzine inertnih čestica, poroznosti i statičkog pritiska duž transportne cevi se dobijaju iz hidrodinamičkog modela (Poglavlje 4.3.1). Testiranje sistema na zagušivanje dvofaznog toka u cevnom umetku se vrši pomoću modela za predviđanje poroznosti i brzine pri zagušivanju (Poglavlje 4.3.2). Ulazni podaci za numeričko rešavanje modela su maseni protok vazduha na ulazu u kolonu (G_v), maseni protok vazduha kroz anularnu zonu sloja inertnih čestica (G_a), maseni protok čestica kroz cevni umetak (G_p) i statički pritisak na vrhu cevnog umetka (p_{d1}). Uslovi na ulazu u cevni umetak su: $y(z=0)=y_0$, $T_g(z=0)=T_{g0}=T_{gCl}$ i $T_p(z=0)=T_{p0}=(T_a)_{z1=0.06\text{ m}}$ (videti sliku 4.4).

U literaturi ima vrlo malo modela za simulaciju kontinualnog sušenja suspenzija u sistemima sa inertnim česticama (pregled literature iz Poglavlja 1). Na osnovu pregleda literature postoje dva modela koja se odnose na sušenje na inertnim česticama u transportnim cevima. Blasco i dr. /1996/ su predstavili model za predviđanje procesnih parametara pri sušenju suspenzija na inertnim česticama u pneumatskoj sušnici, razmatrajući hidrodinamičke karakteristike dvofaznog toka van zone ubrzavanja inertnih čestica (transportna cev $L_t=15\text{ m}$). Littman i dr. /2000/ su postavili model za isparavanje tečne faze vode u režimu pneumatskog transporta krupnih staklenih sfera u cevnom umetku ($L_t=3.04\text{ m}$) fontansko-fluidizovanog sloja, pri čemu njihov hidrodinamički model uključuje zonu ubrzavanja.

Predloženi model u ovom radu je vrlo sličan modelu koji su objavili Littman i dr. /2000/. Osnovna razlika u odnosu na model Littman-a i dr. /2000/ je u hidrodinamičkom modelovanju dvofaznog toka gas-čestice, koji je prikazan u njihovom prethodnom radu /Littman i dr., 1993/. Ovi autori zanemaruju efekat trenja čestice-zid cevnog umetka ($F_p=0$) na ukupni gradijent pritiska, s obzirom da nisu vizuelno opazili abraziju zidova cevi, i pored toga što su isti autori pokazali da i male promene F_p bitno utiču na rezultate modela. Garić i dr. /1995/ smatraju da je u sistemu Littman-a i dr. /1993/ prisutno trenje čestice-zid i da se ne može potpuno zanemariti. Pored ovoga, u odnosu na model Littman-a i dr. /2000/ u našem modelu je zanemaren gradijent temperature unutar inertne čestice.

U tabeli 4.9 je dat pojednostavljen algoritam proračuna prema predloženom modelu gde su specificirani ulazni parametri kao i pretpostavke koje su usvojene za proračun.

Rezultati numeričkog proračuna hidrodinamičkih parametara i parametara sušenja prema prikazanom algoritmu su prikazani u tabelama i na slikama za sve izvedene oglede u Prilogu 3 (tabela P3.4). Numerički program (programski jezik: Quick Basic) dat je u Prilogu 4.

Tabela 4.9. Pojednostavljen algoritam proračuna

Napomene	
Ulazni parametri	
G_v	
y_0	
T_{0A}	
G_p	
G_{SUS}	
x_{H_2O}	
T_{gi}	
$(-dp_a/dz)_{z1=0.25\text{ m}}$	
$(T_a)_{z1=0.25\text{ m}}, (T_a)_{z1=0.06\text{ m}}$	
p_{dt}	
d_p	
$\varepsilon_a=0.35, \varepsilon_{mF}=0.40$	eksperimentalno određeni u fluidizacionoj koloni prečnika $D_c=60\text{ mm}$
Protok vazduha kroz anularnu zonu sloja	
G_a	korišćenjem jednačine (4.1) i eksperimentalno određenih vrednosti za $(-dp_a/dz)_{z1=0.25\text{ m}}$ i $(T_a)_{z1=0.25\text{ m}}$
Uslovi na ulazu u cevni umetak	
G_d	$=G_v-G_a$ (jednačina 4.7)
T_{g0}	pretpostavlja se da je $T_{g0}=T_{gi}$
v_0, ε_0	rešavanjem jednačina (4.17), (4.10) i (4.18), početni uslov: $v=0_{z1=0}$ i $(1-\varepsilon)=0_{z1=0}$
Hidrodinamički parametri i parametri procesa sušenja duž cevnog umetka	
Numeričko rešavanje jednačina modela uz uslove na ulazu u cevni umetak, odnosno u napojnoj tački ($z=0$): $T_g=T_{g0}=T_{gi}, T_p=T_{p0}, \varepsilon=\varepsilon_0, y=y_0$	pretpostavlja se da je $T_{p0}=(T_a)_{z1=0.06\text{ m}}$
u, v	iz jednačina (2.48) i (2.49)
$-dp_d/dz$	iz jednačine (4.3) ili (4.4)
$p_d \div z$	iz jednačine (4.3) ili (4.4), uz granični uslov: p_{dt}
ε	iz jednačine (4.6)
F^*	iz jednačine (2.74)
u_{sc}, U_c	iz jednačina (4.22) i (4.23)
U_{mF}	iz Ergun-ove /1952/ jednačine
U_t	prema postupku Kunii-a i Levenspiel-a /1969/
β	iz jednačina (2.24), (2.25) do (2.28)
F_b, F_p	iz jednačina (2.58) do (2.60) i (2.63)
y	iz jednačine (4.26)
T_g	iz jednačine (4.30)
T_p	iz jednačine (4.31)

4.4. ISPITIVANJA SUŠENJA SUSPENZIJA U FONTANSKOM SLOJU INERTNIH ČESTICA SA CEVNIM UMETKOM

4.4.1. Opšte karakteristike sušenja suspenzija i analiza rezultata

U tabeli 4.10 su sumirani operativni uslovi izvršenih ogleda i neki karakteristični hidrodinamički parametri i parametri sušenja izračunati na osnovu predloženog modela.

Tabela 4.10. Pregled eksperimentalnih uslova i proračunatih parametara

ogl.	Susp. ^a	L m	V ₀ m ³ /h	G _{sus} kg/h	G _{H2O0} kg/h	T _{gi} °C	T _{p0} °C	T _{ge} °C	-dp _a /dz ^b Pa/m	p _{d1} Pa	G _d /G _v	G _p kg/h	x _{AH}	x _f %
1	voda, x ₀ =1	0.05	255.1	4.78	4.78	141.1	73.0	100.1	1090	-2511	0.866	868	1	
2		0.05	251.5	8.15	8.15	139.7	37.4	82.5	1003	-2511	0.851	864	0.486	
3		0.05	253.6	9.81	9.81	134.4	32.0	71.6	872	-2521	0.862	936	0.321	
4		0.05	245.7	6.22	6.22	172.3	51.0	107.6	1090	-2649	0.847	1076	1	
5		0.05	239.8	9.51	9.51	176.0	45.0	97.3	1003	-2619	0.847	1080	0.727	
6		0.05	239.2	12.56	12.56	176.0	38.0	79.0	916	-2619	0.852	1044	0.409	
7		0.05	236.5	12.36	12.36	200.0	37.8	95.2	872	-2619	0.862	1037	0.446	
8		0.05	235.9	9.58	9.58	200.0	70.0	112.6	916	-2453	0.865	986	1	
9		0.08	228.0	5.85	5.85	157.1	78.7	94.1	1395	-2708	0.821	1370	1	
10		0.08	222.9	6.81	6.81	174.0	85.0	103.5	1395	-2678	0.825	1479	1	
11		0.11	224.1	5.57	5.57	157.1	75.0	91.1	1090	-2541	0.843	1269	1	
12		0.11	219.0	6.76	6.76	168.1	78.3	99.4	1046	-2472	0.846	1187	1	
13	CaCO ₃ , x ₀ =0.70	0.05	256.7	9.99	6.99	141.2	56.0	100.0	567	-2335	0.905	364	0.589	
14		0.08	247.3	8.37	5.86	149.0	56.0	86.8	1046	-2403	0.853	1109	1	0.61
15		0.08	244.6	17.57	12.30	167.3	43.0	103.3	872	-2433	0.861	1224	0.535	0.85
16	Ca-stearat, x ₀ =0.82	0.08	234.2	17.22	14.12	168.3	47.0	88.0	1526	-2551	0.794	1357	0.57	5.04
17		0.08	232.2	9.3	7.63	167.5	58.3	96.6	1657	-2894	0.786	1519	1	3.47
18	Cineb	0.08	238.7	25.31	18.99	171.0	45.5	86.4	1003	-2433	0.844	1076	0.362	
19	fungicid, x ₀ =0.75	0.08	220.4	14.94	11.24	171.7	35.0	107.9	959	-2119	0.836	652	0.311	

^a gustine suspenzija: CaCO₃: 1130 kg/m³, Ca-stearat: 880 kg/m³, Cineb fungicid 1070 kg/m³;
^b na z1=0.25 m

nastavak Tabele 4.10.

ogl.	Susp. ^a	δ _{film0} μm	T _{ge} cal °C	ε ₀	v ₀ m/s	dp _d /dz ₀ Pa/m	G _{H2O0} , cal kg/h	τ _R s	τ _{cikl} min	SV kg _{vaz} /kg _{H2Oisp}	W _{H2O} , volum. kg/m ³ h	W _{H2O} , površ. kg/m ² h	η' _T (T _{p1})
1	voda, x ₀ =1	2.86	110.2	0.9393	1.12	3039	5.15	0.227	3.02	62.3	101.01	147.27	0.566
2		4.81	97.1	0.9362	1.06	2918	7.1	0.239	3.03	74.2	172.22	251.10	0.563
3		5.34	92.3	0.9338	1.11	3265	7.86	0.233	2.80	94.3	207.30	302.25	0.632
4		2.96	114.9	0.9252	1.13	3787	7.91	0.227	2.43	46.2	131.44	191.64	0.534
5		4.5	114.4	0.9236	1.11	3767	9.51	0.233	2.42	40.6	200.96	293.01	0.598
6		6.13	112.2	0.9262	1.11	3645	11.65	0.233	2.51	54.5	265.41	386.98	0.720
7		6.08	127.3	0.9298	1.16	3720	12.41	0.226	2.52	50.2	261.19	380.82	0.667
8		5.03	137.9	0.9329	1.15	3524	10.62	0.225	2.66	28.8	202.44	295.16	0.646
9		2.22	105.2	0.9107	1.2	3378	7.2	0.246	1.91	45.6	123.62	180.24	0.788
10		2.41	113.5	0.9067	1.24	3731	7.93	0.241	1.77	38.3	143.91	209.82	0.781

oglj.	Susp. ^a	$\delta_{\text{film}0}$ μm	$T_{\text{ge}0}$ cal °C	ϵ_0	v_0 m/s	dp_d/dz_0 Pa/m	$G_{\text{H}_2\text{O}0}$ cal kg/h	τ_R s	τ_{cikl} min	SV kg _{vaz} /kg _{H₂Oisp}	$W_{\text{H}_2\text{O}}$ volum. kg/m ³ h	$W_{\text{H}_2\text{O}}$ površ. kg/m ² h	η'_T (T_{pl})
11	voda,	2.28	102.4	0.9273	1.37	2583	7.41	0.244	2.06	47	117.70	171.61	0.791
12	$x_0=1$	2.96	109.9	0.9312	1.35	2401	7.6	0.248	2.21	37.9	142.85	208.28	0.743
13	CaCO ₃ , $x_0=0.70$	9.88	119.3	0.9739	1.09	1276	5.13	0.237	7.19	72.9	147.71	215.36	0.420
14		2.72	100.9	0.9347	1.33	2862	7.64	0.227	2.36	49.3	123.83	180.55	0.654
15		5.13	103.6	0.9318	1.41	3283	7.73	0.219	2.14	43.5	259.92	378.97	0.515
16	Ca- stearat, $x_0=0.82$	5.32	90.8	0.9083	1.16	3234	9.59	0.249	1.93	34	298.38	435.04	0.653
17		2.58	92.8	0.8973	1.16	3641	8.33	0.248	1.73	35.6	161.23	235.08	0.645
18	Cineb	9.02	105.3	0.9345	1.29	2718	10.17	0.233	2.43	40.6	401.29	585.09	0.668
19	fungicid, $x_0=0.75$	8.78	114.3	0.9512	1.05	1484	6.82	0.278	4.01	73.7	237.52	346.31	0.483

U tabeli 4.11 su prikazani izračunati hidrodinamički parametri dvofaznog toka za početak i kraj cevnog umetka prema predloženom hidrodinamičkom modelu za dva tipična ogleda. Mada su opšti hidrodinamički uslovi prilikom izvođenja ova dva ogleda bili slični, može se uočiti da brzina inertnih čestica i poroznost za ogled 16 (sušenje vodene suspenzije kalcijum(II)-stearata) imaju nešto niže vrednosti u odnosu na ogled 1 (doziranje tečne faze vode). Ovo je posledica intenzivnije cirkulacije inertnih čestica, tj. značajno većeg masenog protoka inertnih čestica u ogledu 16 (1357 kg/h u ogledu 16, 868 kg/h u ogledu 1). Kalcijum(II)-stearat je suspenzija malog viskoziteta, tako da je trenje između čestica u klizećem pakovanom sloju kroz anularnu zonu manje.

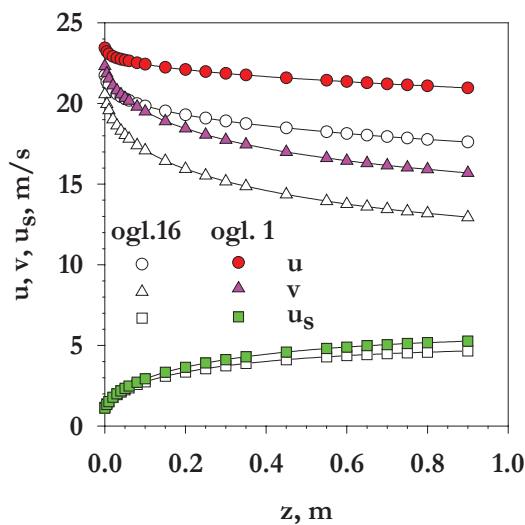
Tabela 4.11. Osnovni hidrodinamički parametri na početku i kraju cevnog umetka

	Ogled 1		Ogled 16	
	na $z=0$	na $z=L_t$	na $z=0$	na $z=L_t$
u (m/s)	23.44	20.96	21.73	17.61
v (m/s)	1.12	5.27	1.16	4.66
ϵ	0.9393	0.9871	0.9083	0.9772
$-dp_d/dz$ (Pa/m)	3039	382	3234	462

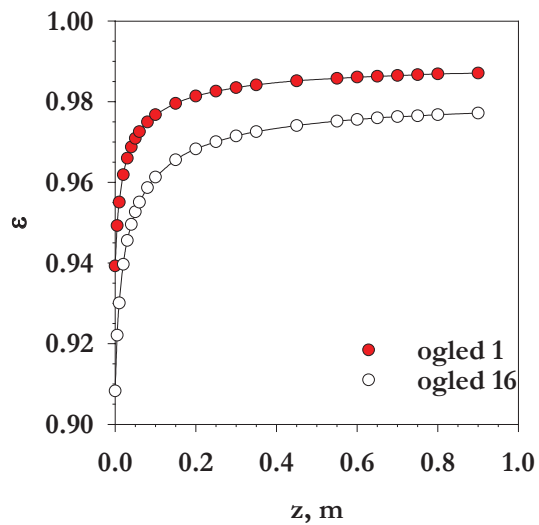
Na slici 4.15 su prikazani izračunati profili brzine inertnih čestica, brzine gasa i relativne brzine između gasa i inertnih čestica duž cevnog umetka za ogled 1 i 16 (sa tečnom fazom vode i kalcijum(II)-stearatom). Može se uočiti da je relativna brzina između faza najveća pri dnu cevnog umetka (u donjoj zoni).

Na slici 4.16 prikazana je promena izračunatih vrednosti poroznosti duž cevnog umetka za iste ogleda.

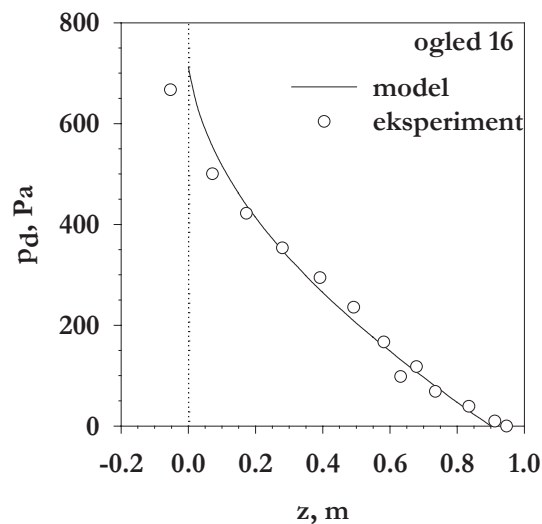
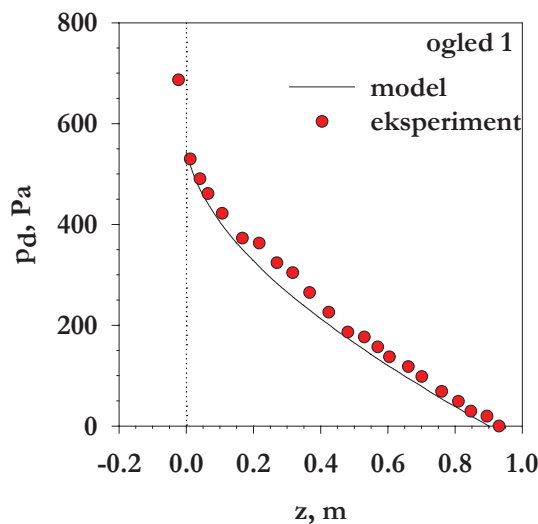
Poređenje izmerenih sa izračunatim vrednostima statičkog pritiska duž cevnog umetka je predstavljeno na slici 4.17 (ogled 1 i ogled 16). Slaganje između eksperimentalnih i predviđenih podataka je u granicama od 7% za sve ogleda. Ovo je ujedno i indirektna verifikacija hidrodinamičkog modela, s obzirom da nije postojala mogućnost merenja poroznosti ili brzine inertnih čestica u cevnom umetku.



Slika 4.15. Profil brzine gasa, brzine čestica i relativne brzine između faza duž cevnog umetka, ogled 1 (voda), ogled 16 (kalcijum(II)-stearat)



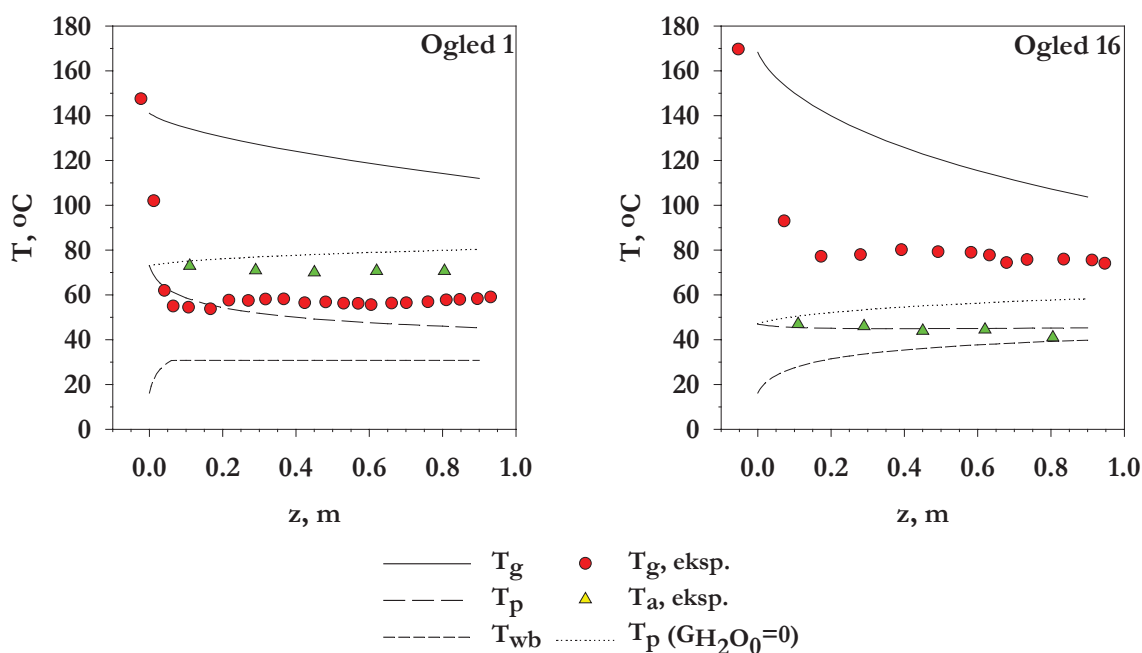
Slika 4.16. Promena poroznosti duž cevnog umetka, ogled 1 (voda), ogled 16 (kalcijum(II)-stearat)



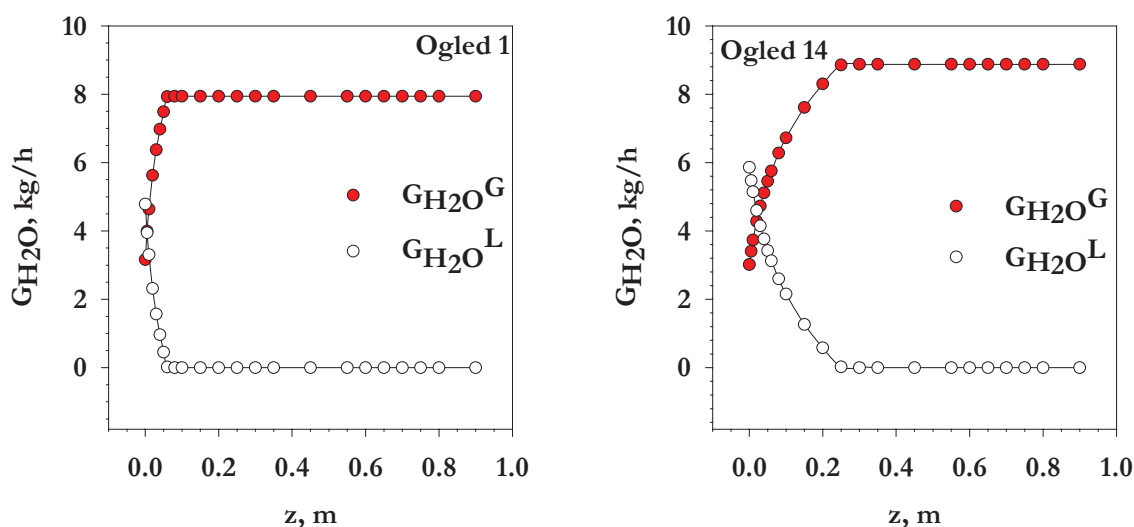
Slika 4.17. Promena statičkog pritiska duž cevnog umetka, ogled 1 (voda), ogled 16 (kalcijum(II)-stearat)

Na slici 4.18 (ogled 1 i ogled 16) su prikazane izračunate vrednosti temperatura vazduha, temperatura inertnih čestica i temperatura adijabatskog zasićenja vazduha u funkciji rastojanja od ulaza u cevni umetak. Na istoj slici su takođe prikazane i izmerene vrednosti temperatura vazduha u cevnom umetku i u anularnoj zoni sloja. Na osnovu izračunatih i izmerenih profila navedenih temperatura po dužini cevi može se zaključiti da gasna faza znatno sporije odaje toplotu od inertnih čestica. U anularnoj zoni je temperatura približno konstantna po visini iznad pozicije gde se ubacuje suspenzija ($z_1 > L_f$, slika 4.2). Imajući u vidu merene vrednosti temperature vazduha duž cevnog umetka, treba napomenuti da je sonda za merenje temperature u zavisnosti od aksijalnog položaja bila

manje ili više vlažna tako da su izmerene vrednosti bliske temperaturi adijabatskog zasićenja vazduha.



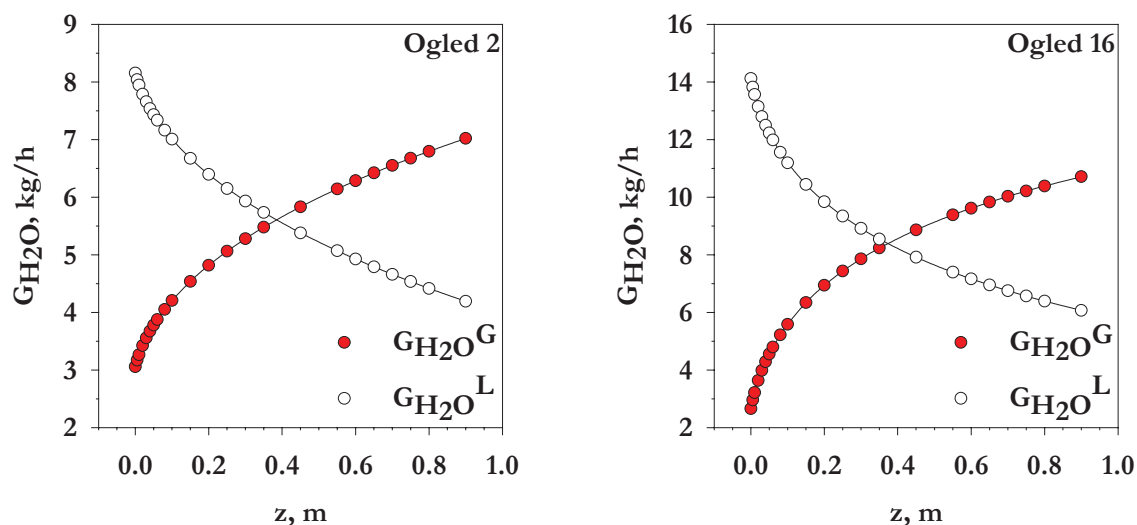
Slika 4.18. Promena temperatura vazduha u cevnom umetku i u anularnoj zoni sloja, ogled 1 (voda), ogled 16 (kalcijum(II)-stearat)



Slika 4.19. Promena masenog protoka tečne i gasovite faze vode duž cevnog umetka, ogled 1 (voda), ogled 14 (kalcijum(II)-karbonat)

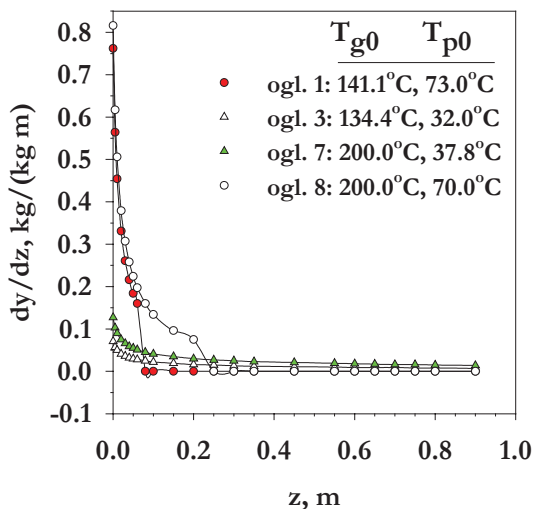
Na slici 4.19 (ogled 1 i ogled 14) je prikazana promena sadržaja vode po visini cevnog umetka. Isparavanjem vode iz filma suspenzije količina vodene pare u gasnoj fazi raste, dok istovremeno količina vode u tečnoj fazi opada. U ogledu 1 (slika 4.19, doziranje tečne faze vode) na osnovu proračuna proizilazi da je celokupna količina tečne faze vode isparila do $z \approx 0.08$ m od ulaza u cevni umetak. U ogledu 14 (slika 4.19, sušenje suspenzije kalcijum(II)-karbonata) proračun ukazuje da je celokupna količina tečne faze vode isparila do $z \approx 0.30$ m od ulaza u cevni umetak.

Na slici 4.20 (ogled 2 i ogled 16) je prikazana promena sadržaja vode u gasnoj i tečnoj fazi duž cevnog umetka za ogled 2 i 16. U ovim ogledima brzina doziranja tečne faze vode (ogled 2), odnosno suspenzije kalcijum(II)-stearata (ogled 16) je bila relativno velika, tako da dužina cevnog umetka (900 mm) nije dovoljna za kompletno isparavanje tečne faze vode. Predviđeni sadržaj vode u obe faze duž cevnog umetka, dobijen proračunom iz modela, je u kvalitativnoj saglasnosti sa vizuelnim opažanjima, odnosno u ovim ogledima je zapažena pojava kapljica vode na staklenom prozoru pri vrhu kolone. Može se zapaziti da je brzina isparavanja vode najveća na početku cevi, gde je pogonska sila najveća, a brzina inertnih čestica najmanja.



Slika 4.20. Promena masenog protoka tečne i gasovite faze vode duž cevnog umetka, ogled 2 (voda), ogled 16 (kalcijum(II)-stearat)

Na slici 4.21 je data promena brzine sušenja sa rastojanjem od ulaza u cevni umetak. Interesantno je pomenuti da ulazna temperatura inertnih čestica ima mnogo veći uticaj na brzinu sušenja od ulazne temperature vazduha. Na osnovu poređenja zavisnosti $dy/dz \div z$ za ogled 1 i 3, u kojima su ulazne temperature vazduha slične, vidi se da se sa povećanjem ulazne temperature inertnih čestica od 32°C do 73°C početna brzina sušenja povećava sa faktorom 10.7 (ogled 1). Isti zaključak se može izvesti i na osnovu poređenja ogleda 7 i 8, s tim što je u ovom slučaju faktor uvećanja 6.4 (za ogled 8). Sa druge strane, povećanje ulazne temperature vazduha u ogledu 7 od 134.4°C do 200°C , pri približno istoj vrednosti ulazne temperature inertnih čestica u odnosu na ogled 3, ima mnogo manji efekat na povećanje brzine sušenja (faktor uvećanja je 1.8). Mnogo veći



Slika 4.21. Promena brzine sušenja duž cevnog umetka

uticaj temperature inertnih čestica na brzinu sušenja je povezan sa naglim povećanjem napona pare na površini tečnog filma koji oblaže inertnu česticu usled porasta temperature inertnih čestica. Sa druge strane, u slučaju prestanka doziranja suspenzije ($G_{H_2O_0}=0$) proračun pokazuje da će se temperatura inertnih čestica povećati za $7.8^{\circ}C$ do $44^{\circ}C$ do kraja cevnog umetka u zavisnosti od ulazne temperature vazduha. Za uslove iz ogleđa 1 i 8 ova povećanja temperature inertnih čestica na izlazu iz cevnog umetka pri prestanku doziranja suspenzije ili vode iznose $35^{\circ}C$ i $31.8^{\circ}C$, respektivno, a za ogleđe 3 i 7 iznose $7.8^{\circ}C$ i $11.5^{\circ}C$, respektivno. Promena izračunatih vrednosti temperature inertnih čestica duž cevnog umetka za slučaj da je $G_{H_2O_0}=0$ prikazana je isprekidanim linijama na slici 4.18 za ogleđe 1 i 16.

Za sve ispitivane suspenzije, u našim eksperimentima, granulometrijski sastav suvog produkta je praktično isti granulometrijskom sastavu čestica iz polazne suspenzije. Ovo je takođe karakteristično i za sušenje u fluidizovanom sloju inertnih čestica. Zapažanja i zaključci koji su navedeni u Poglavljima 3.6, 3.7 i 3.8, a koji se odnose na dosušivanje, hlađenje i izdvajanje osušenog praškastog produkta, su isti i za sušnicu sa fontanskim slojem inertnih čestica i cevnom umetkom.

4.4.2. Uslovi za stabilan rad i uticaj prisustva suspenzije na cirkulaciju inertnih čestica

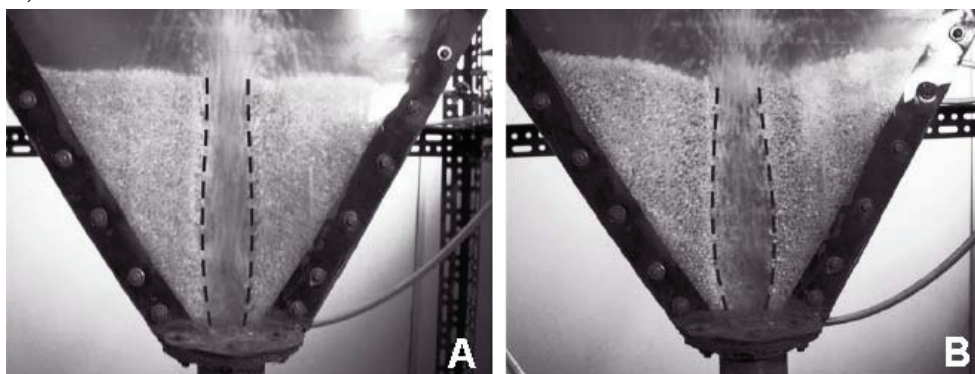
Važna prednost sušnice sa fontanskim i fontansko-fluidizovanim slojem inertnih čestica i cevnom umetkom je u tome što se u njima mogu sušiti suspenzije koje sadrže organske i biološke komponente /Povrenović, 2003/. Međutim, ova prednost se ne može generalizovati, s obzirom da svaki materijal poseduje određene specifičnosti. Stoga se izvodljivost sušenja bilo koje suspenzije u ovim sistemima mora prvo ispitati na laboratorijskom nivou. Tako se, na primer, sušenje paradajz kaše pokazalo neuspešnim u našem sistemu sa fontanskim slojem inertnih čestica i cevnom umetkom.

Zahtevani kvalitet produkta (sadržaj rezidualne vlage i sadržaj aktivne materije) se može postići izborom adekvatne temperature sušenja (izlazne temperature vazduha merene iznad sloja). U okviru ovih eksperimentalnih ispitivanja nisu sistematski ispitivani parametri kvaliteta produkta. Poznato je da se sadržaj rezidualne vlage smanjuje sa povećanjem izlazne temperature vazduha /Markowski, 1992/. Sa druge strane, kratko vreme boravka inertnih čestica u cevnom umetku omogućava sušenje termoosetljivih materijala /Povrenović, 2003/.

Na brzinu sušenja vlažnog materijala na površini inertne čestice direktno utiče temperatura i protok ulaznog vazduha, a indirektno brzina cirkulacije inertnih čestica. Na brzinu uklanjanja osušene skrame sa površine inertnih čestica utiče brzina vazduha, masa sloja i brzina cirkulacije inertnih čestica, pored adhezivnih karakteristika inertna čestica-suv film. S obzirom da je uklanjanje suvog materijala iz sušnice kritična faza za hidrodinamičku stabilnost sloja, potrebno je da površina inertnih čestica, koje iz cevnog umetka ponovo

dospevaju u anularnu zonu sloja, bude suva u cilju prevencije sinterovanja sloja u sušnici sa fontanskim slojem inertnih čestica i cevnom umetkom. Potrebna dužina cevnog umetka se može proceniti na osnovu predloženog modela. Podaci za oglede u kojima je celokupna količina tečne faze vode unete u sistem isparila unutar cevnog umetka pokazuju da je kritično opterećenje sistema oko $0.005 \text{ kg}_{\text{H}_2\text{O}}$ po 1 kg inertnih čestica u cevnom umetku ($L_t=0.9 \text{ m}$, $T_{g_i}<180^\circ\text{C}$). Ovaj podatak je uporedljiv sa rezultatom Hadžismajlović-a i dr. /1989/ za sušnicu sa fontansko-fluidizovanim slojem inertnih čestica i cevnom umetkom ($0.0048 \text{ kg}_{\text{H}_2\text{O}}/\text{kg}$, za $L_t=0.7 \text{ m}$ i $T_{g_i}=150^\circ\text{C}$). U nekim slučajevima stacionaran režim rada sušnice se može ostvariti i kad postoji izvesna količina zadržanog produkta na inertnim česticama, koja tokom procesa ostaje konstantna. Brereton i Lim /1993/ su u svojim ispitivanjima ustanovili da se formira tanak uniformni sloj produkta (otpadni mulj: smeša gvožđe(II)-hidroksida i cink(II)-hidroksida) na krupnim česticama peska u polukoloni sa fontanskim slojem, međutim, to nije uticalo na stabilnost rada sušnice.

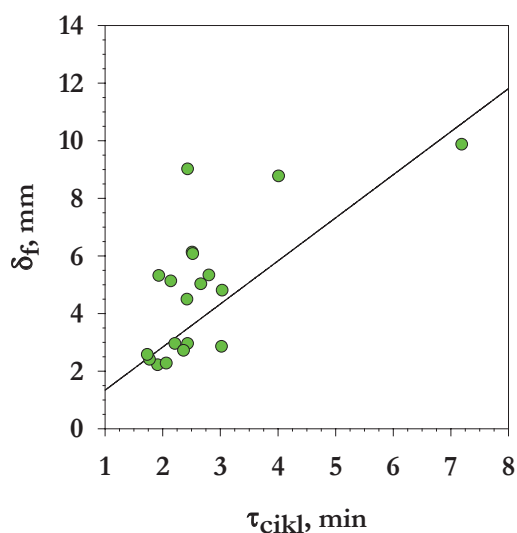
Prisustvo inertnih čestica sa vlažnom površinom u anularnom prostoru sloja utiče na smanjenje brzine cirkulacije inertnih čestica. Koliko će smanjenje cirkulacije biti zavisi od karakteristika materijala koji se suši, kao i od sadržaja vlage u filmu vlažnog materijala oko inertnih čestica. Pri sušenju suspenzije kalcijum(II)-stearata cirkulacija inertnih čestica se vrlo malo smanjila sa skoro duplo povećanim protokom suspenzije, kao što se može videti na osnovu poređenja brzina cirkulacije inertnih čestica za oglede 16 i 17 (tabela 4.10), što je verovatno posledica malog viskoziteta ove suspenzije, tako da je trenje između inertnih čestica u klizećem pakovanom sloju kroz anularnu zonu sloja manje. Međutim, u slučaju suspenzija kalcijum(II)-karbonata i Cineb fungicida, smanjenje brzine cirkulacije inertnih čestica može biti značajno usled prisustva vlažnog materijala u anularnom prostoru sloja (ogledi 13 i 19, tabela 4.10). Veliki broj radova u literaturi je posvećen uticaju prisustva tečnosti na hidrodinamičke karakteristike slojeva inertnih čestica /napr. Daleffe i Freire, 2004; Passos i Mujumdar, 2000; McDougall i dr., 2005, itd./ . Spitzner-Neto i dr. /2002/, Vieira i dr. /2004/ i Trinidad i dr. /2004/ su ustanovili da u prisustvu suspenzije gradijent pritiska opada, minimalna brzina fontanovanja u klasičnom fontanskom sloju inertnih čestica raste sa povećanjem protoka suspenzije i da se istovremeno smanjuje brzina cirkulacije inertnih čestica (slika 4.22) .



Slika 4.22. Uticaj prisustva glicerola na oblik fontane u fontanskom sloju polipropilenskih čestica, A-bez glicerola, B-sa glicerolom (slika 4 iz Trinidad i dr. /2004/)

Stabilni radni režim sušnice se može ostvariti kad je brzina uklanjanja filma suspenzije sa površine inertne čestice veća ili u krajnjem slučaju jednaka brzini doziranja suspenzije. Kudra i dr. /1989/ su ustanovili da je stabilan rad sušnice i intenzivno kretanje inertnih čestica izvodljivo do neke maksimalne vrednosti protoka suspenzije, i u slučaju sušenja CaCO_3 suspenzije u fontanskom sloju sa centralno postavljenim pužnim transporterom su zapazili da pri protoku suspenzije iznad $310 \text{ kg}/(\text{m}^3\text{h})$, i pored kontinualnog rada pužnog transportera, dolazi do skoro potpunog prestanka kretanja inertnih čestica i naglog porasta sadržaja vlage produkta. Takođe, Pallai i dr. /2001/ su ukazali na značajan uticaj parcijalnih mehanizama sušenja na stabilnost rada sušnice sa mehaničkim fontanovanjem (centralno postavljenim pužnim transporterom) i naglasili su da je vrlo važno uskladiti brzine parcijalnih procesa u okviru jednog ciklusa cirkulacije inertnih čestica da bi se ostvarili stacionarni operativni uslovi. Tia i dr. /1995/ su pri sušenju suspenzije pirinčanog brašna na keramičkim kuglicama u fontanskom sloju koji radi u “režimu brzog fontanovanja u plitkom sloju” ustanovili da sistem prelazi u nestacionarni i nestabilan režim rada pri ulaznim temperaturama vazduha ispod 90°C , $U/U_{\text{ms}} < 2.55$ i protoku suspenzije od $2.85 \text{ kg}/\text{h}$, odnosno pri ovim uslovima prestaje sušenje i elutracija sušenog materijala iz sloja i počinje kotiranje i aglomeracija inertnih čestica suspenzijom.

S obzirom da stabilnost rada sušnice zavisi od međusobne usklađenosti parcijalnih mehanizama sušenja, u cilju kontrole ovih mehanizama podešavanjem procesnih parametara važno je odrediti vreme boravka inertnih čestica u različitim delovima sloja. Na osnovu proračuna prema predloženom modelu procesa sušenja dobijene vrednosti trajanja jednog



Slika 4.23. Zavisnost debljine filma od dužine jednog ciklusa cirkulacije

ciklusa cirkulacije i vremena boravka inertnih čestica u cevnom umetku su prikazane u tabeli 4.10, a na slici 4.23 je prikazan uticaj dužine ciklusa cirkulacije na debljinu formiranog tečnog filma oko inertne čestice na ulazu u cevni umetak. Brzina cirkulacije inertnih čestica je obrnuto proporcionalna dužini jednog ciklusa, tako da će debljina filma biti manja što je ciklus kraći, što se može uočiti i iz trenda podataka sa slike 4.23. U našem sistemu se ova vremena kreću između 1.73 i 7.19 min, zavisno od uslova ogleđa, dok transport inertnih čestica kroz cevni umetak iznosi u proseku svega 0.16% od vremena potrebnog za jedan ciklus cirkulacije kroz sloj.

Takođe, povećanjem protoka suspenzije, pored povećanja protoka tečne faze vode na ulazu u cevni umetak, povećava se i debljina filma suspenzije na površini inertnih čestica. Prema tome, sadržaj vlage i srednja veličina čestica produkta su rezultat trenja i sudara između inertnih čestica i inertnih čestica sa zidom cevnog umetka. Kada uneta količina toplote i/ili

intenzitet sudara i trenja između inertnih čestica nisu dovoljni za potpuno sušenje i otiranje filma suspenzije ne mogu se postići uslovi za stabilan rad sistema, što se dogodilo pri sušenju suspenzije CaCO₃ pod uslovima iz oglada 15 (tabela 4.10). Pored toga što su operativni uslovi između oglada 14 i 15 slični, čak je u ogledu 15 brzina cirkulacije inertnih čestica nešto veća, usled znatno većeg protoka suspenzije (ogled 15) došlo je do potpune blokade sloja.

Hidrodinamički model je proširen modelom za predviđanje vrednosti poroznosti pri zagušivanju i brzine zagušenja vertikalnog dvofaznog toka vazduh-inertne čestice. Eksperimentalna verifikacija je prikazana u Poglavlju 4.3.2.3. Izračunate vrednosti, prikazane u tabeli 4.12, ukazuju da je u svim ogledima površinska brzina vazduha kroz cevni umetak veća od predviđene brzine zagušenja, tako da je sa hidrodinamičkog aspekta zadovoljen uslov stabilnog pneumatskog transporta inertnih čestica kroz cevni umetak.

Tabela 4.12. Vrednosti parametara za stanje zagušivanja u cevnom umetku određene prema modelu iz Poglavlja 4.3.2.3

ogled	U_{cH} m/s	U_d/U_{cH}	ϵ_{cH}
1	14.31	1.462	0.9807
2	14.09	1.392	0.9806
3	14.16	1.389	0.9798
4	14.95	1.344	0.9785
5	14.94	1.31	0.9785
6	14.83	1.316	0.9789
7	15.08	1.347	0.9791
8	15.2	1.389	0.9797
9	15.42	1.147	0.9756
10	15.8	1.129	0.9747
11	15.23	1.173	0.9766
12	15.21	1.18	0.9774
13	12.69	1.774	0.9871
14	14.8	1.331	0.9781
15	15.13	1.316	0.977
16	15.24	1.129	0.9756
17	15.55	1.087	0.9742
18	14.89	1.295	0.9785
19	13.83	1.291	0.9833

4.4.3. Efikasnost procesa i kapacitet isparavanja

Efikasnosti procesa, koje su definisane u Poglavlju 3.5.4, su određivane za sušnicu sa fontanskim slojem inertnih čestica i cevnom umetkom prema sledećim izrazima adaptiranim za cevni umetak:

$$\eta'_T = \frac{(T_{gi} - T_{ge})}{(T_{gi} - T_{p1})}, \quad \text{ili} \quad \eta_T = \frac{(T_{gi} - T_{ge})}{(T_{gi} - T_{0A})} \quad (4.37)$$

$$\eta_E = \frac{\text{Energija potrebna za isparavanje}}{\text{Ulaz energije}} = \frac{G_{\text{H}_2\text{O,ispareno,CAL}} r_w (naT_{ge})}{G_v C_{pg} (naT_{ge}) (T_{gi} - T_{0A})} \quad (4.38)$$

$$\eta_D = \frac{\text{Energija potrebna za isparavanje}}{\text{Ulaz energije} - \text{Izlaz energije}} = \frac{G_{\text{H}_2\text{O,ispareno,CAL}} r_w (naT_{ge})}{G_v C_{pg} (naT_{ge}) (T_{gi} - T_{ge})} \quad (4.39)$$

$$\eta_T = \frac{\eta_E}{\eta_D}$$

Na osnovu podataka iz tabele 4.10 za oglede gde je postignuto potpuno isparavanje tečne faze vode, može se uočiti da veće vrednosti termičke efikasnosti (η_T) odgovaraju tanjim filmovima tečnosti. U ovim oglecima je temperatura izlaznog vazduha bila bliska temperaturi adijabatskog zasićenja vazduha, tj. krajnji sadržaj vlage u vazduhu je blizak maksimalnoj vrednosti, pri čemu je izlazni vazduh i dalje u nezasićenom stanju. Kao što je navedeno u Poglavlju 3.5.4, tehnologije zasnovane na sušenju suspenzija na inertnim česticama, bilo da se radi o sistemima sa fluidizovanim, fontanskim ili modifikovanim fontanskim slojem, pokazuju dobre performanse u poređenju sa drugim sistemima za sušenje suspenzija. Naime, raspršavanjem i nanošenjem suspenzije materijala koji se suši na inertne čestice u vidu tankog tečnog filma moguće je ostvariti veliku koncentraciju sušenog materijala u raspoloživoj zapremini sušnice. I povećanje površine za razmenu i povećanje koncentracije čestica sušenog materijala vode ka intenzifikaciji procesa rada sušnice i povećanoj efikasnosti korišćenja energije, tj. povećan je efekat isparavanja vlage u odnosu na sisteme za sušenje bez inertnih čestica. Vrednosti termičke efikasnosti η_T , obračunate u odnosu na T_{0A} , za sušnicu sa fontanskim slojem inertnih čestica i cevnom umetkom variraju između 0.217 i 0.457 (za oglede u kojima je postignuto kompletno isparavanje tečne faze vode duž cevnog umetka), što je generalno manje od vrednosti dobijenih u sušnici sa fluidizovanim slojem inertnih čestica ($\eta_T=0.911 \div 0.344$).

U našoj sušnici sa fontanskim slojem inertnih čestica i cevnom umetkom volumetrijska brzina isparavanja vode varira između 101 i 203 $\text{kg}_{\text{H}_2\text{O}}/\text{m}^3_{\text{SLOJ}}\text{h}$, u zavisnosti od ulazne temperature vazduha (uzeti su u razmatranje samo ogleci u kojima je postignuto kompletno isparavanje tečne faze vode duž cevnog umetka, tabela 4.10). Ovi rezultati su bliski rezultatima Markowski-og /1992/ za maksimalni volumetrijski kapacitet isparavanja vode od približno 180 $\text{kg}_{\text{H}_2\text{O}}/\text{m}^3_{\text{SLOJ}}\text{h}$ ostvarenog pri sušenju životinjske krvi u fontanskom sloju inertnih čestica sa “plitkim slojem i brzim režimom fontanovanja” (ulazna temperatura vazduha 180°C, izlazna temperatura vazduha 90°C). U sličnom sistemu pri sušenju suspenzije pirinčanog brašna Tia i dr. /1995/ su, zavisno od operativnih uslova ($H_c=45\text{cm}$, $T_{gi}=90-130^\circ\text{C}$), dobili zapreminski kapacitet isparavanja vode od 30 do 70 kg/hm^3 i vrlo niske vrednosti termičke efikasnosti od 6 do 20%. Za fontansko-fluidizovani sloj inertnih čestica sa cevnom umetkom Hadžismajlović i dr. /1989/ su objavili podatak za volumetrijski kapacitet isparavanja vode od 330 $\text{kg}_{\text{H}_2\text{O}}/\text{m}^3_{\text{SLOJ}}\text{h}$ (prečnik kolone $D_c=0.25$ m, dužina cevnog umetka $L_r=0.7$ m, ulazna temperatura vazduha 150°C, izlazna temperatura vazduha 70°C), koji je za oko 50% veći u

odnosu na fontanski sloj inertnih čestica sa cevnim umetkom. Za fontanski sloj inertnih čestica sa centralno postavljenim pužnim transporterom Pallai i dr. /2001/ su dobili srednju vrednost volumetrijskog kapaciteta od $250 \text{ kg}_{\text{H}_2\text{O}}/\text{m}^3_{\text{SLOJh}}$ pri sušenju krompir kaše (prečnik kolone $D_c=0.14 \text{ m}$, dužina pužnog transportera $0.4\text{-}0.7 \text{ m}$, prečnik pužnog transportera 0.04 m , ulazna temperatura vazduha 110°C , izlazna temperatura vazduha 65°C). Ovaj podatak je nešto veći od naše maksimalne vrednosti volumetrijskog kapaciteta isparavanja vode od $210 \text{ kg}_{\text{H}_2\text{O}}/\text{m}^3_{\text{SLOJh}}$, pošto je u sistemu sa mehaničkim fontanovanjem cirkulacija inertnih čestica nezavisna od protoka vazduha. Kudra i dr. /1989/ su objavili rezultate za sušenje suspenzije kalcijum(II)-karbonata u sušnici sa fontanskim slojem inertnih čestica i centralno postavljenim vertikalnim pužnim transporterom. Operativni uslovi su vrlo bliski uslovima iz našeg ogleda 14. Kudra i dr./1989/ su dobili volumetrijski kapacitet isparavanja vode od $260 \text{ kg}/\text{m}^3_{\text{SLOJh}}$ i specifičnu potrošnju vazduha od $28 \text{ kg}_{\text{vazd.}}/\text{kg}_{\text{H}_2\text{O}}$. Međutim, u našem ogledu 14 dobijen je niži volumetrijski kapacitet isparavanja vode, a veća specifična potrošnja vazduha ($123.83 \text{ kg}_{\text{H}_2\text{O}}/\text{m}^3_{\text{SLOJh}}$ i $49.3 \text{ kg}_{\text{vazd.}}/\text{kg}_{\text{H}_2\text{O}}$, respektivno), opet iz istog razloga kao u odnosu na rezultate Pallai-a i dr. /2001/, tj. u sistemu sa mehaničkim fontanovanjem cirkulacija inertnih čestica je nezavisna od protoka vazduha.

Poređenje volumetrijskog kapaciteta isparavanja vode sa fluidizovanim slojem inertnih čestica nije realno pošto je za isti prečnik kolone statička visina fontanskog sloja sa cevnim umetkom znatno veća. Za fontanski sloj sa cevnim umetkom odnos H/D_c je 4.2, dok je za fluidizovani sloj inertnih čestica srednji odnos oko 0.5, iako je ukupna visina kolone za ova dva sistema približno ista. Razmatrajući brzinu isparavanja vode po jedinici površine poprečnog preseka sloja inertnih čestica, najveća vrednost je dobijena za našu sušnicu sa fontanskim slojem i cevnim umetkom i ona iznosi $295.6 \text{ kg}_{\text{H}_2\text{O}}/\text{m}^2\text{h}$, pri čemu su uzeti u obzir samo ogledi u kojima je postignuto kompletno isparavanje tečne faze vode duž cevnog umetka (ogled 8, tabela 4.10). Pod sličnim uslovima, u sušnici sa fluidizovanim slojem inertnih čestica sa istim prečnikom kolone dobijena je brzina isparavanja od $421 \text{ kg}_{\text{H}_2\text{O}}/\text{m}^2\text{h}$ (ogled 41: $T_{gi}=203^\circ\text{C}$, $T_{ge}=61.5^\circ\text{C}$, $V_0=222.5 \text{ m}^3/\text{h}$, tabela P2.3 u Prilogu 2).

Masa isparene vode u fontanskom sloju inertnih čestica sa cevnim umetkom se može izračunati korišćenjem ukupnog bilansa prenosa toplote. Zanemarujući gubitke toplote, ovaj bilans ima sledeći oblik:

$$G_v C_{pg} (T_{gi} - T_{ge}) = G_{dm} C_{pm} (T_{ge} - T_{0A}) + G_{\text{H}_2\text{O}} [C_{pw}^L (T_{ge} - T_{0A}) + r_w] \quad (4.40)$$

Pošto je:

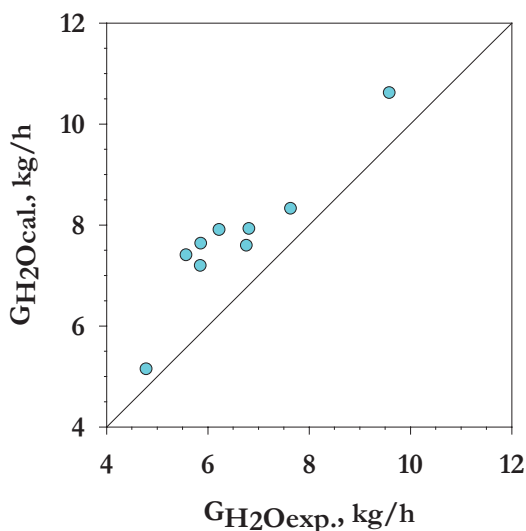
$$G_{\text{SUS}} = G_m + G_{\text{H}_2\text{O}} \quad \text{i} \quad x_0 = \frac{G_{\text{H}_2\text{O}}}{G_{\text{SUS}}}$$

jednačina (4.40) prelazi u oblik:

$$G_{\text{H}_2\text{O}} = \frac{G_v C_{pg} (T_{gi} - T_{ge})}{[(1 - x_0)/x_0] C_{pm} (T_{ge} - T_{0A}) + C_{pw}^L (T_{ge} - T_{0A}) + r_w} \quad (4.41)$$

Za poznatu geometriju sušnice sa fontanskim slojem inertnih čestica i cevnim umetkom, maseni protok vazduha na ulazu u kolonu proizilazi iz mehanike sloja. S obzirom da je izlazna temperatura vazduha (T_{ge}) izabrana prema termičkoj stabilnosti sušenog materijala i

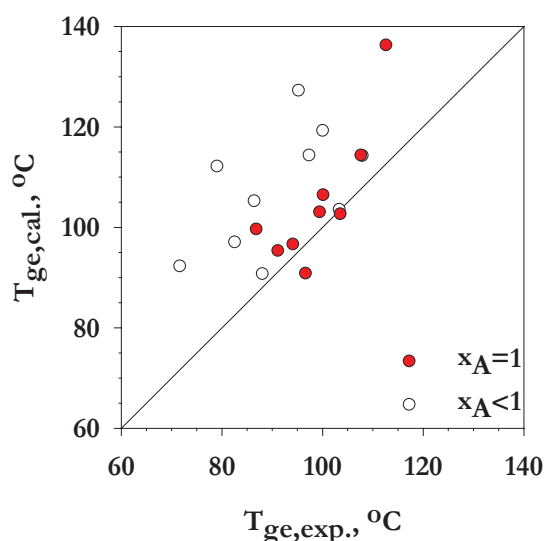
zahtevanom sadržaju rezidualne vlage produkta, jednačina (4.41) daje jednostavnu zavisnost između ulazne temperature vazduha (T_{g1}) i brzine isparavanja vode (G_{H_2O}). Poređenje eksperimentalnih i izračunatih vrednosti za G_{H_2O} (ogledi sa kompletno isparenom tečnom fazom vode, $x_A=1$), za procenjenju vrednost specifičnog toplotnog kapaciteta čvrste materije



Slika 4.24. Poređenje eksperimentalnih i izračunatih vrednosti za brzinu isparavanja vode (ogledi sa $x_A=1$)

sušenja po jedinici zapremine sloja, kao i ukupnu efikasnost sistema. Uvođenje zagrejanog vazduha direktno u anularni prostor sloja povećaće brzinu cirkulacije inertnih čestica /Hadžismajlović i dr., 1989/ kao i temperaturu inertnih čestica na ulazu u cevni umetak. Oba ova parametra imaju značajan uticaj na brzinu isparavanja vlage.

4.4.4. Indirektna verifikacija predloženog modela



Slika 4.25. Poređenje eksperimentalnih i izračunatih vrednosti temperature vazduha na izlazu iz kolone

iz suspenzije $C_{pm} \approx 0.85 \text{ kJ/kg}^\circ\text{C}$, je prikazano na slici 4.24. Kao što se vidi sa slike slaganje eksperimentalnih podataka sa podacima dobijenim iz jednačine (4.41) je u granicama od 19%, tako da se ukupni bilans prenosa toplote može koristiti u modelovanju procesa kao korisna kontrolna jednačina.

Kapacitet isparavanja vode u sistemu može biti povećan na nekoliko načina, koje su u svom radu razmatrali Littman i dr. /2000/. Prikazani rezultati sugerišu da bi uvođenje izvesne količine zagrejanog vazduha u anularni prostor sloja inertnih čestica (odnosno korišćenje sistema sa fontansko-fluidizovanim slojem i cevnom umetkom) povećalo kapacitet

isparavanja vode u sistemu može biti povećan na nekoliko načina, koje su u svom radu razmatrali Littman i dr. /2000/. Prikazani rezultati sugerišu da bi uvođenje izvesne količine zagrejanog vazduha u anularni prostor sloja povećaće brzinu cirkulacije inertnih čestica /Hadžismajlović i dr., 1989/ kao i temperaturu inertnih čestica na ulazu u cevni umetak. Oba ova parametra imaju značajan uticaj na brzinu isparavanja vlage.

Nije postojala mogućnost za merenje relativne vlažnosti vazduha i temperature inertnih čestica na izlazu iz cevnog umetka. Indirektan test kvantitativnog predviđanja modela je merenje temperature vazduha na izlazu iz kolone, pretpostavljajući da su tok vazduha iz cevnog umetka i tok vazduha iz anularnog dela sloja dobro izmešani. Poređenje eksperimentalnih podataka i vrednosti izračunatih prema bilansu:

$$\begin{aligned} (T_{ge})_{calc} &= \\ &= \left[G_d (T_{g1})_{model} + G_a (T_{aH})_{exp} \right] / G_v \end{aligned} \quad (4.42)$$

daje izvesne informacije o pouzdanosti modela.

Slika 4.25 prikazuje poređenje eksperimentalnih vrednosti temperature vazduha na izlazu iz kolone i vrednosti koje su izračunate prema jednačini (4.42), gde su T_{aH} temperatura vazduha merena neposredno iznad vrha anularne zone sloja i T_{g1} izračunata vrednost temperature vazduha na izlazu iz cevnog umetka po modelu. Može se sa slike 4.25 uočiti da je 9 izračunatih vrednosti veće od eksperimentalnih u proseku za 20°C i srednje apsolutno odstupanje za sve oglede u proseku iznosi 13.2%. Međutim, ako se posmatraju samo ogleđi u kojima je duž cevnog umetka postignuto isparavanje celokupne količine vode (osenceni simboli) vidi se da je slaganje bolje i uzimajući u obzir samo ove oglede srednje apsolutno odstupanje iznosi u proseku 7.4%. Za ostale oglede je moguće da je pojava kapljica vode u cevnom umetku uticala na merenja temperatura.

4.4.5. Simulacije uticaja radnih uslova na performanse sušnice

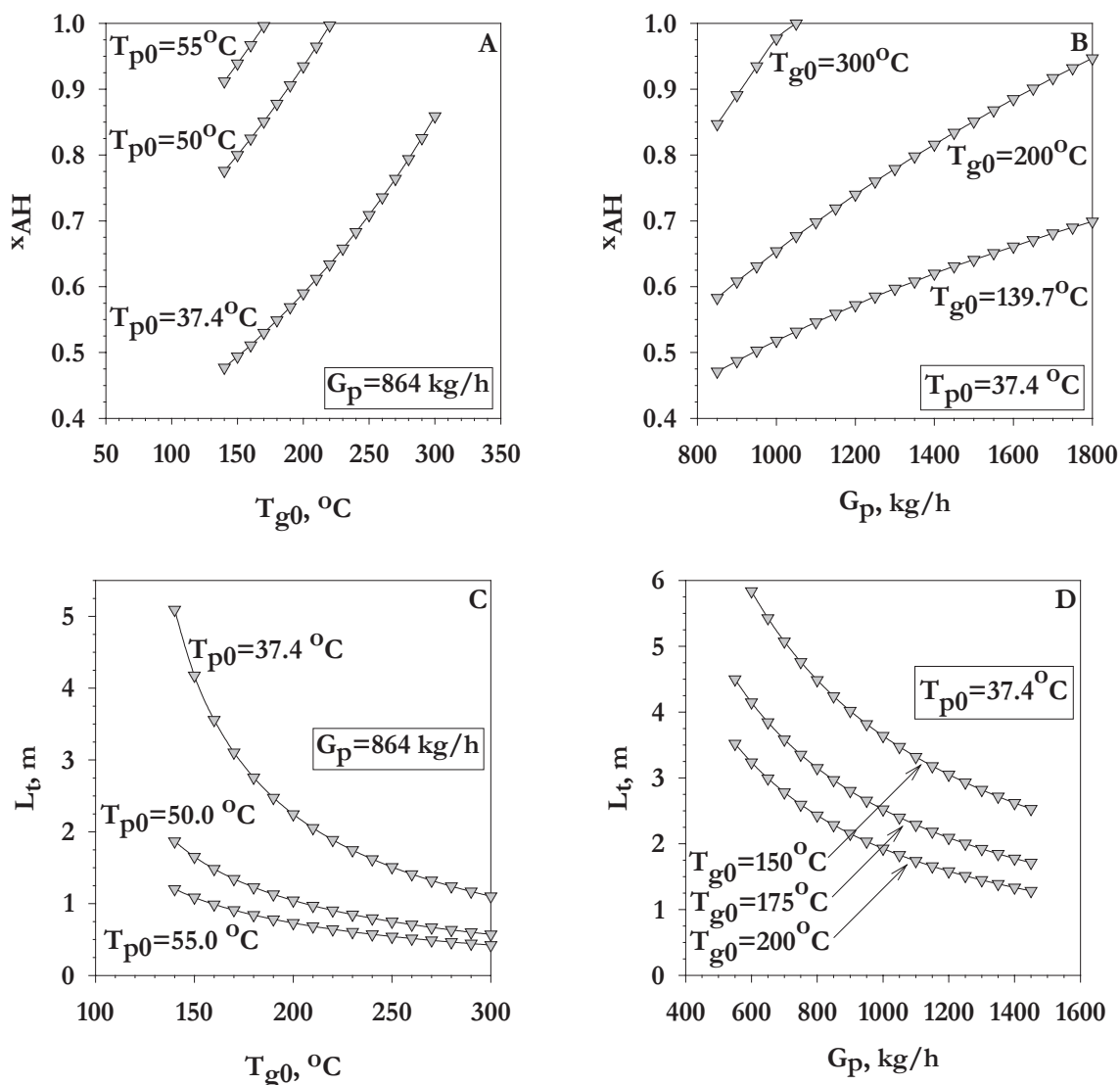
Vreme boravka inertnih čestica u cevnom umetku je relativno kratko i iznosi oko 0.24 sekunde (tabela 4.10). Koliko će trajati transport inertnih čestica kroz cevni umetak je pre svega određeno hidrodinamičkim karakteristikama sistema i za datu geometriju se ne može bitno menjati. Jedini način da se postigne isparavanje celokupno unete količine tečne faze vode unutar cevnog umetka je da se koristi duža cev. Predloženi model za sušenje suspenzija u sušnici sa fontanskim slojem inertnih čestica i cevnom umetkom se može iskoristiti za ispitivanje uticaja radnih uslova na performanse sistema kao i za predviđanje dužine cevi potrebne za kompletno isparavanje tečne faze vode.

Na slici 4.26 (A, B, C, D) su prikazani uticaji tri parametra na primeru ogleđa 2 u kome je dozirana tečna faza vode i za uslove pod kojima je ovaj ogleđ izvođen nije postignuto potpuno isparavanje tečne faze vode do izlaza iz cevnog umetka.

Na slici 4.26-A je prikazan uticaj ulazne temperature vazduha (T_{g0}) i ulazne temperature inertnih čestica (T_{p0}) na količinu isparene vode u cevnom umetku, računata na osnovu podataka za ogleđ 2. Povećanje ulazne temperature vazduha za 50°C , tj. od $T_{g0}=150^{\circ}\text{C}$ do $T_{g0}=200^{\circ}\text{C}$ pri konstantnoj temperaturi inertnih čestica na ulazu u cevni umetak $T_{p0}=37.4^{\circ}\text{C}$, povećava količinu isparene vode u cevnom umetku samo za 19.4%. Međutim, porast ulazne temperature inertnih čestica za 12.6°C , pri konstantnoj ulaznoj temperaturi vazduha $T_{g0}=200^{\circ}\text{C}$, povećava količinu isparene vode za oko 58.5%. Najveći uticaj ima brzina cirkulacije inertnih čestica (slika 4.26-B). Na primer, za ulaznu temperaturu vazduha od $T_{g0}=300^{\circ}\text{C}$, porast brzine cirkulacije inertnih čestica, tj. masenog protoka od 850 kg/h do 1050 kg/h, povećava količinu isparene vode od 84.7% na 100%. Efekat brzine cirkulacije inertnih čestica je povezan sa bilansom prenosa mase (jednačina 4.26), odnosno prenos mase je proporcionalan brzini cirkulacije inertnih čestica.

Na slici 4.26-C je prikazana potrebna dužina cevnog umetka za isparavanje celokupne količine tečne faze vode kao zavisnost od ulazne temperature vazduha (T_{g0}) i ulazne temperature inertnih čestica (T_{p0}). Za uslove pod kojima je izvođen ogleđ 2 unutar cevnog umetka dužine 0.9 m je isparilo 57% tečne faze vode. Da bi se pod istim operativnim

uslovima postiglo potpuno isparavanje tečne faze vode, tj. $x_A=100\%$, dužina cevnog umetka treba da bude 5.09 m. Povećanjem ulazne temperature vazduha smanjuje se i potrebna dužina cevnog umetka za potpuno isparavanje tečne faze vode.



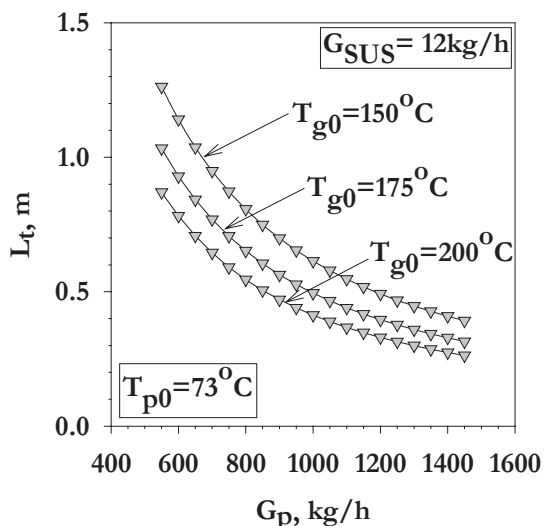
Slika 4.26. Rezultati numeričke simulacije (za uslove iz oglada 2):

A-Uticaj temperature ulaznog vazduha i temperature inertnih čestica na ulazu u cevni umetak na količinu isparene vode duž cevnog umetka, **B-**Uticaj brzine cirkulacije inertnih čestica i temperature ulaznog vazduha na količinu isparene vode duž cevnog umetka, **C-**Potrebna dužina cevnog umetka za potpuno isparavanje vode $G_p=\text{const}$ ($x_A=1$), **D-**Potrebna dužina cevnog umetka za potpuno isparavanje vode $T_{p0}=\text{const}$ ($x_A=1$)

Na slici 4.26-D je prikazana potrebna dužina cevnog umetka za isparavanje celokupne količine tečne faze vode kao zavisnost od masenog protoka inertnih čestica kroz cevni umetak za tri vrednosti temperature ulaznog vazduha. I ova simulacija, kao i simulacija sa slike 4.26-B, potvrđuje da najveći uticaj na performanse sušnice ima brzina cirkulacije inertnih čestica. Sa slike se vidi da se povećanjem vrednosti protoka inertnih čestica kroz cevni umetak 2.3 puta

(od 600 do 1400 kg/h) smanjuje potrebna dužina cevi za potpuno isparavanje tečne faze vode, i to sa faktorom 2 za $T_{g0}=150^{\circ}\text{C}$, 2.3 za $T_{g0}=175^{\circ}\text{C}$ i 2.4 za $T_{g0}=200^{\circ}\text{C}$.

Za istu simulaciju uticaja G_p na L_t na slici 4.27 korišćeni su uslovi iz ogleđa 1, uz



Slika 4.27. Potrebna dužina cevnog umetka za potpuno isparavanje vode pri $T_{p0}=\text{const.}$ za uslove iz ogleđa 1 ($x_A=1$)

napomenu da je računato sa većim protokom suspenzije (tj. tečne faze vode), s obzirom da je za ogleđ 1 za originalni protok tečne faze vode od 4.78 kg/h već postignut maksimalni stepen isparavanja. Pri ovakvim uslovima isto povećanje masenog protoka inertnih čestica kroz cevni umetak, od 600 do 1400 kg/h, za sve tri temperature ulaznog vazduha smanjuju potrebnu dužinu cevi za oko 2.8 puta. U ogleđu 1 je maseni protok suspenzije $G_{SUS}=12$ kg/h, korišćen u ovoj simulaciji (slika 4.27), veći za oko 30%, a ulazna temperatura inertnih čestica veća za 35.6°C u odnosu na odgovarajuće vrednosti iz ogleđa 2, dok su ostali uslovi približno isti. Na osnovu poređenja rezultata simulacije uticaja G_p na L_t , prikazanim na slikama 4.26-D i 4.27 može se

izvesti zaključak da veći stepen smanjenja potrebne dužine cevi za uslove ogleđa 1 potiče od veće vrednosti T_{p0} . Na osnovu prikazanih simulacija proizilazi da ulazna temperatura inertnih čestica ima značajan uticaj na količinu isparene vode u cevnom umetku, kao i na potrebnu dužinu cevnog umetka za potpuno isparavanje, ne ulazeći u to na koji način bi se mogla i ostvariti veća vrednost T_{p0} . Navedeni primeri proračuna ukazuju na kompleksnost sušnice sa fontanskim slojem inertnih čestica i cevnom umetkom. Predloženi model u ovom radu može biti koristan za određivanje optimalnih karakteristika ovakve sušnice i za redukovanje broja eksperimentalnih proba.

4.4.6. Predviđanje brzine cirkulacije inertnih čestica

Veliki uticaj cirkulacije inertnih čestica potiče od toga da što je intenzivnije kretanje čestica to će se tanji film suspenzije koja se suši oformiti na inertnim česticama, što je poželjno sa stanovišta održavanja stabilnog rada sušnice. Pouzdano predviđanje brzine cirkulacije inertnih čestica je od izuzetnog značaja za projektovanje i kontrolu procesa sušenja u sušnici sa fontanskim slojem inertnih čestica i cevnom umetkom.

Od mogućih varijanti primene modela za izračunavanje osnovnih parametara vertikalnog toka gas-čvrste čestice, algoritmom I, prikazanog u tabeli 4.2, može se predvideti brzina cirkulacije inertnih čestica u sušnici sa fontanskim slojem inertnih čestica i cevnom umetkom. U opisanom modelu za izračunavanje osnovnih fluido-dinamičkih karakteristika

vertikalnog dvofaznog toka (G_p , G_d , $-dp_d/dz$ i ϵ), postoje samo dve nezavisne jednačine, a četiri nepoznate veličine. Ako su specificirane dve veličine, na primer maseni protoci gasa i čestica (G_p i G_d), bilansi količine kretanja i jednačine kontinuiteta se redukuju na sistem od dve nezavisne jednačine, tako da se za proračun moraju izabrati dve promenljive kao ulazni parametri. U cilju predviđanja masenog protoka inertnih čestica (G_p), odnosno brzine inertnih čestica i poroznosti u cevnom umetku, s obzirom da su ove tri veličine u međusobnoj vezi, prema jednačini (2.45), neophodno je primeniti iterativni postupak proračuna, tj. metodu probe i greške. S obzirom da vazduh koji se uvodi u kolonu za sušenje delimično penetrira u anularnu zonu sloja inertnih čestica, maseni protok vazduha kroz cevni umetak se može odrediti iz jednačine (4.7), pri čemu se maseni protok vazduha kroz anularnu zonu sloja (G_a) indirektno određuje merenjem gradijenta pritiska u anularnoj zoni i korišćenjem eksperimentalno uspostavljene korelacije za zavisnost gradijenta pritiska od brzine vazduha (jednačina 4.1).

U algoritmu proračuna za predviđanje masenog protoka čestica (G_p) egzistiraju tri veličine kao poznate, tj. ulazni parametri: maseni protok vazduha na ulazu u kolonu (G_v), gradijent pritiska u anularnoj zoni sloja ($-dp_a/dz$) i vrednost statičkog pritiska u cevnom umetku na poziciji $z=0.424$ m [$p_d(0.424)$]. Numerički proračun po ovom algoritmu se izvodi na sledeći način:

1. Pretpostavi se brzina cirkulacije inertnih čestica, odnosno njihov maseni protok kroz cevni umetak (G_p).
2. Izračuna se maseni protok vazduha kroz anularni deo sloja na osnovu izmerene vrednosti gradijenta pritiska u anularnom delu sloja i jednačine:

$$f_{pA} = 94.7 / \text{Re}_{pA} + 0.979 \quad (4.1)$$

Maseni protok vazduha kroz cevni umetak se određuje iz jednačine:

$$G_v = G_d + G_a \quad (4.7)$$

3. Odrede se vrednosti hidrodinamičkih parametara na ulazu u cevni umetak numeričkim rešavanjem jednačine:

$$\frac{v^2}{z_1} + v \frac{dv}{dz_1} = \frac{\beta (u - v)^2}{\rho_p (1 - \epsilon)} - \frac{(\rho_p - \rho_f)g}{\rho_p} \quad (4.17)$$

u kombinaciji sa jednačinama: $v(1 - \epsilon) = c_s \frac{z}{L} \quad (4.10)$

$$U = \frac{4}{\rho_f \pi D_d^2} \left(G_v - G_a \frac{z_1}{L} \right) \quad (4.18)$$

Početni uslovi za proračun duž fontane ispod cevnog umetka su $v=0$ i $\epsilon=1$ na dnu fontane, tj. na $z_1=0$ ($z=-L$). Izračunati hidrodinamički parametri za vrh fontane ($z=0$) istovremeno predstavljaju početne uslove za proračun duž cevnog umetka, tj. $(v)_{z=0}=v_0$ i $(\epsilon)_{z=0}=\epsilon_0$.

4. Izračunava se aksijalna promena poroznosti duž cevnog umetka iz jednačine:

$$\frac{d\varepsilon}{dz} = \frac{\beta(u-v)^2 - \varepsilon \left[(\rho_p - \rho_f) g(1-\varepsilon) + F_p \right] + F_f(1-\varepsilon)}{\gamma \varepsilon + \rho_f u^2} \quad (4.6)$$

U ovom koraku proračuna F_f je dobijeno iz jednačina (2.58) i (2.60), F_p je dobijeno iz jednačina (2.59) i (2.63), a β iz jednačine (2.24).

Brzine gasa i čestica su zatim određivane iz jednačina kontinuiteta:

$$\frac{d}{dz}(\varepsilon \rho_f u A_d) = \frac{d}{dz} G_f \quad (2.48)$$

$$\frac{d}{dz}((1-\varepsilon)\rho_p v A_d) = \frac{d}{dz} G_p \quad (2.49)$$

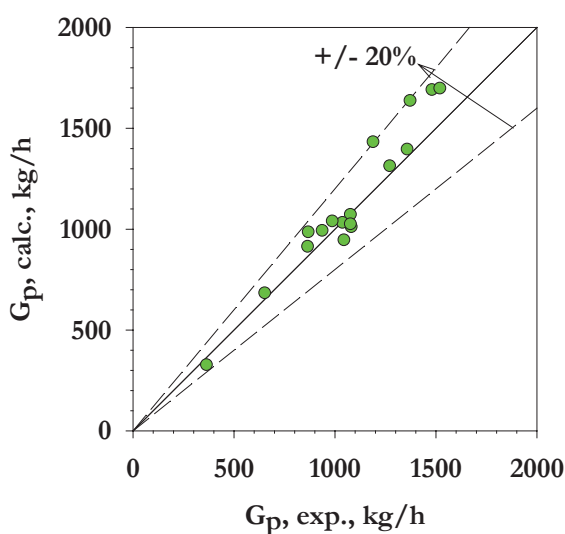
a $-dp_d/dz$ je izračunato iz jedne od jednačina:

$$-\frac{dp_d}{dz} = \frac{1}{\varepsilon} \left[\beta(u-v)^2 + \rho_f g \varepsilon + F_f - \rho_f u^2 \frac{d\varepsilon}{dz} \right] \quad (4.2)$$

$$-\frac{dp_d}{dz} = \left[\rho_p(1-\varepsilon) + \rho_f \varepsilon \right] g + F_f + F_p + \gamma \frac{d\varepsilon}{dz} \quad (4.3)$$

Početni uslov za jednačinu (4.2) ili (4.3) je vrednost poroznosti na ulazu u transportnu cev, ε_0 .

5. Numeričkom integracijom izračunatog gradijenta pritiska duž transportne cevi se dobija aksijalni profil statičkog pritiska duž transportne cevi.
6. Uporedi se vrednost izračunatog statičkog pritiska u cevnom umetku na vertikalnom rastojanju $z=0.424$ m od početka cevi sa eksperimentalno izmerenom vrednosti na istoj poziciji.
7. U slučaju da $p_{d,calc}(0.424) \neq p_{d,exp}(0.424)$ ponavlja se proračun sa novom pretpostavkom za G_p .



Slika 4.28. Poređenje eksperimentalnih i izračunatih vrednosti brzine cirkulacije čestica

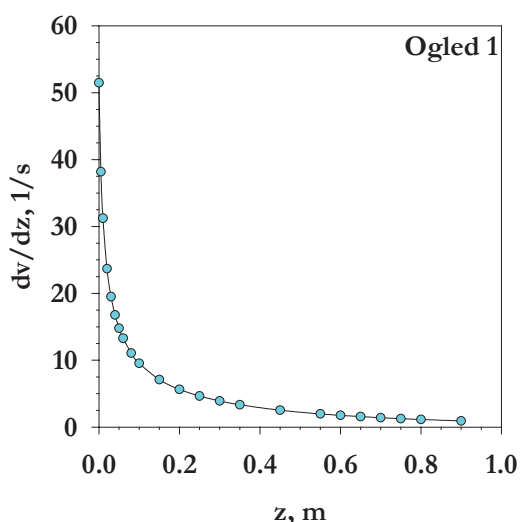
Poređenje eksperimentalnih i izračunatih vrednosti masenog protoka inertnih čestica (G_p) je prikazano na slici 4.28. Na osnovu prikazanih podataka može se zaključiti da je slaganje u zadovoljavajućim granicama, sa srednjim apsolutnim odstupanjem od 8.2 %. Srednje apsolutno odstupanje vrednosti $p_{d,exp}(0.424)$ od $p_{d,calc}(0.424)$ je u granicama od 0% do 0.1%.

Prednost sušnice sa fontanskim i fontansko-fluidizovanim slojem inertnih čestica i cevnom umetkom u odnosu na fluidizovan sloj inertnih čestica u pogledu mogućnosti sušenja suspenzija koje sadrže

organske i biološke komponente /Povrenović, 2003/ je rezultat intenzivnog trenja između inertnih čestica unutar cevi i otresanja suvog produkta sa inertnih čestica prilikom njihovog sudara sa deflektorom, što smanjuje rizik pojave sinterovanja sloja. Sinterovanje, odnosno blokiranje sloja inertnih čestica predstavlja najnepoželjniju pojavu u toku sušenja, s obzirom da može prouzrokovati drastične poraste temperature izlaznog vazduha ili prekomerno povećanje rezidualne vlažnosti produkta. Prvi simptom početka sinterovanja sloja inertnih čestica je opadanje brzine cirkulacije inertnih čestica, tako da se predloženi model za predviđanje G_p može iskoristiti kao osnova za razvoj softvera za kontrolu sušenja. U izvesnim aplikacijama sinterovanje sloja se može sprečiti povremenim uvođenjem tečne faze vode u sistem u kratkim intervalima. Na ovaj način se obezbeđuje periodično čišćenje inertnih čestica, odnosno sprečavanje prekomerne akumulacije vlažnog materijala na njima. Učestanost i dužina perioda čišćenja inertnih čestica mogla bi se kontrolisati pomoću "on-line" proračuna brzine cirkulacije inertnih čestica. Uključivanje ovakve strategije u kontroli sušenja suspenzija može biti korisna u cilju održanja kvaliteta produkta i obezbeđenja stabilnih uslova rada sistema, imajući u vidu kompleksnost procesa, kao i probleme koji mogu nastati pri sušenju nekih materijala u fontanskom sloju inertnih čestica sa cevnom umetkom.

4.4.7. Ograničenja modela sušenja suspenzija u sušnici sa fontanskim slojem inertnih čestica i cevnom umetkom

Praktična primena fontanskih i fontansko-fluidizovanih slojeva sa cevnom umetkom u gasovitoj fazi podrazumeva upotrebu relativno kratkog cevnog umetka (tipične vrednosti su do nekoliko metara), stoga ovi sistemi rade u hidrodinamičkom režimu ubrzavanja čvrstih čestica.



Slika 4.29. Promena izračunatog gradijenta brzine čestica duž cevnog umetka (ogled 1-voda)

Na slici 4.29 je prikazana je promena izračunatog gradijenta brzine inertnih čestica duž cevnog umetka za uslove iz ogleđa 1. Kao što se može videti, celokupna zona sušenja se nalazi u oblasti ubrzavanja inertnih čestica. Za sve ostale oglede ova zavisnost je praktično ista.

Pored toga, proračunata dužina cevi u kojoj se odvija režim ubrzavanja inertnih čestica, definisana kao rastojanje od ulaza u cevni umetak na kome brzina inertnih čestica dostiže vrednost od 99% konačne vrednosti brzine, za sve oglede iznosi oko 1.7 m. Ova vrednost je skoro dva puta veća od dužine cevnog umetka korišćenog u našem eksperimentalnom sistemu ($L_t=0.9$ m). Veoma

važno pitanje je kako na relacije za određivanje koeficijenta trenja fluid-čestice, faktora trenja fluid-zid cevi i faktora trenja čestice-zid cevi, koje su upotrebljene u modelu, utiče

zona ubrzavanja. Sve navedene relacije su izvedene za stacionarni dvofazni tok gas-čestice van zone ubrzavanja čestica. Pored toga, inertne čestice u cevnom umetku su vlažne, tako da je realno očekivati da će prisustvo tečne faze u cevnom umetku uticati na trenje. Jednačine (4.32) i (4.33) za određivanje koeficijenata prenosa toplote i mase su u osnovi izvedene za usamljenu česticu izloženoj strujanju fluida van zone ubrzavanja. Iako je poroznost u cevnom umetku relativno visoka, postoje značajne razlike u zavisnosti $\varepsilon(z)$ između različitih ogleda. U raspoloživoj literaturi ne postoje podaci za prenos toplote i mase u vertikalnom dvofaznom toku vazduh-krupne čestice. Veliki problem je takođe i precizno određivanje masenog protoka vazduha kroz cevni umetak, s obzirom da se ova veličina u našem radu indirektno određivala iz materijalnog bilansa, pod pretpostavkom da se protok kroz anularnu zonu sloja inertnih čestica može odrediti iz zavisnosti gradijenta pritiska od brzine vazduha. Kalibracioni dijagram ove zavisnosti je dobijen na osnovu merenja u pakovanom sloju čistih i suvih inertnih čestica, dok su u fontanskom sloju sa cevnom umetkom inertne čestice u anularnoj zoni već delimično vlažne. Sa druge strane, ne može se zanemariti ni izvesni stepen zadržavanja osušenog produkta u sloju (“hold-up”). Oba navedena faktora verovatno utiču na tačnost određivanja masenog protoka vazduha kroz cevni umetak.

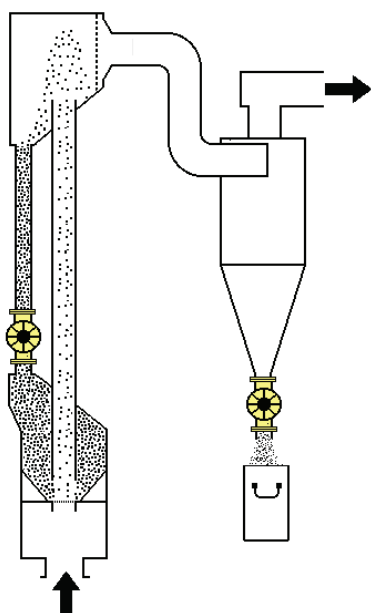
Da bi se upotpunilo modelovanje sušenja u ovom sistemu, kao i za potrebe projektovanja i uvećanja procesa, neophodno je razviti nezavisne metode za određivanje brzine cirkulacije inertnih čestica i za određivanje masenog protoka vazduha koji penetrira iz fontane ispod cevnog umetka u anularni prostor sloja.

5. POREĐENJE SUŠNICA SA FLUIDIZOVANIM SLOJEM INERTNIH ČESTICA I FONTANSKIM SLOJEM INERTNIH ČESTICA I CEVNIM UMETKOM

Oba ispitivana uvećana laboratorijska uređaja za sušenje suspenzija u pokretnom sloju inertnih čestica, tj. sušnica sa fluidizovanim slojem inertnih čestica (u daljem tekstu ovog poglavlja FB-sušnica) i sušnica sa fontanskim slojem inertnih čestica i cevnom umetkom (u daljem tekstu ovog poglavlja SBDT-sušnica), su praktično identični, a razlika je samo u centralnom delu postrojenja, tj. komori za sušenje, koja je u prvom slučaju kolona sa fluidizovanim slojem inertnih čestica, a u drugom slučaju kolona sa fontanskim slojem inertnih čestica i cevnom umetkom, što je detaljno opisano u Poglavljima 3.2.2 i 4.2. Ova okolnost, kao i činjenica da su protoci ulaznog vazduha u oba sistema bili približno isti, omogućuje da se ukratko analiziraju prednosti i nedostaci oba sistema.

Količina inertnih čestica

Za sistem sa fluidizovanim slojem inertnih čestica karakteristična je relativno mala visina fluidizovanog sloja, tako da je odnos statičke visine sloja i prečnika kolone $H_0/D_c=0.4\div 0.6$, odnosno ukupna zapremina inertnih čestica je oko 0.002 m^3 . Kod fontanskog sloja sa cevnom umetkom ovaj odnos je mnogo veći i iznosio je $H_0/D_c\approx 4.2$, odnosno zapremina inertnih čestica je bila 0.047 m^3 . Ova okolnost predstavlja nedostatak za SBDT-sušnicu, jer je jedinična cena kvalitetnijih inertnih čestica (Al_2O_3 , ZrO_2) prilično



Slika 5.1. Šematski prikaz modifikovanog fontanskog sloja sa cevnom umetkom i razdvojenom anularnom zonom

visoka. Imajući u vidu da inertne čestice u anularnoj zoni sloja nemaju bitnu ulogu u sušenju suspenzija, ovaj problem bi se mogao prevazići snižavanjem visine sloja inertnih čestica u anularnoj zoni. Međutim, ovim bi se poremetila i hidrodinamika sloja budući da bi veći deo ulaznog vrelog vazduha penetrirao u anularni prostor u ulaznoj zoni ispod cevnog umetka. Ovaj vazduh bi mogao izazvati fluidizaciju inertnih čestica u anularnoj zoni, a sa druge strane ne bi doprineo sušenju u cevnom umetku. I ovaj problem bi se u načelu mogao rešiti da se anularna zona "preseče", a da se priliv inertnih čestica u cevni umetak obezbedi preko rotacionog ventila, prikazanog na slici 5.1. Međutim, može se konstatovati da bi se ovakvim rešenjem konstrukcija uređaja dodatno komplikovala.

Pad pritiska

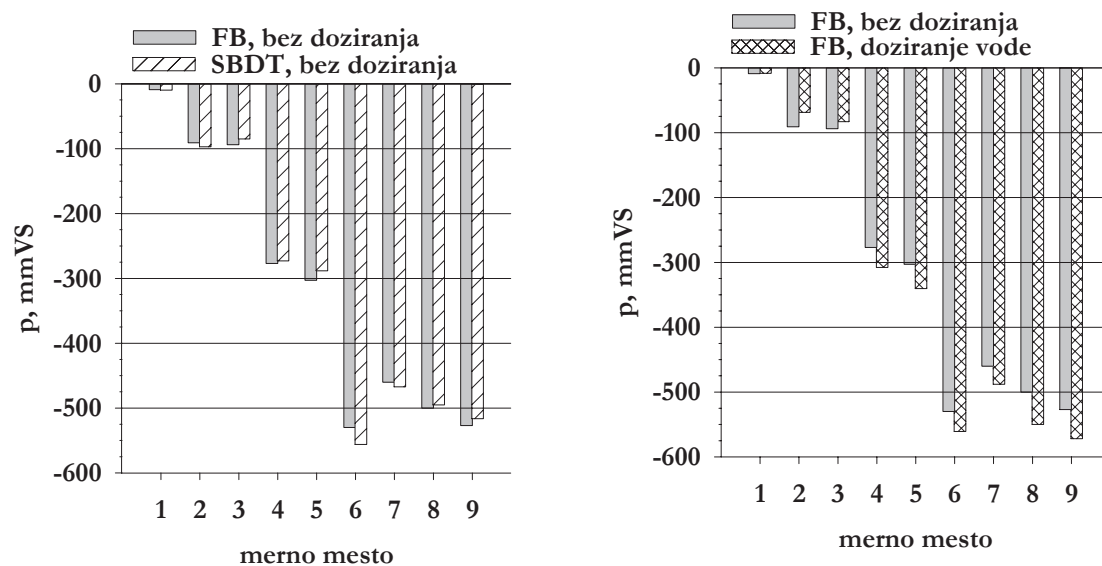
S obzirom da je oba uvećana laboratorijska uređaja vazduhom snabdevaio isti ventilator, ukupni padovi pritiska u oba ispitivana sistema su slični, kako je prikazano na slici 5.2.

Pad pritiska u FB-sušnici u prisustvu tečne faze se povećava u odnosu na sloj suvih inertnih čestica sa smanjenjem temperature sušenja do neke kritične vrednosti neophodne za stabilan rad. Daljim smanjivanjem temperature sloja ispod kritične vrednosti pad pritiska počinje da opada usled slepljivanja sloja i kanalisanja vazduha. U SBDT-sušnici pad pritiska opada usled različitog mehanizma sinterovanja sloja, s obzirom da se snižavanjem temperature sušenja smanjuje brzina cirkulacije inertnih čestica, odnosno maseni protok inertnih čestica kroz cevni umetak.

Međutim, treba imati u vidu da je gustina inertnih čestica (polietilen) koje su korišćene u SBDT-sušnici bila 921 kg/m^3 , a gustina staklenih sfera korišćenih u FB-sušnici je bila oko 2500 kg/m^3 , što je oko 3 puta veća vrednost. Ako bi se u SBDT-sušnici koristile iste staklene sfere kao i u FB-sušnici, time bi se i u SBDT-sušnici omogućio rad sa visokim ulaznim temperaturama vazduha, međutim, pad pritiska u ovom sistemu bi bio približno 3 puta veći. Napomenimo da bi u ovom slučaju napor ventilatora morao biti srazmerno veći da bi se obezbedio isti protok vazduha kao pri cirkulaciji čestica polietilena.

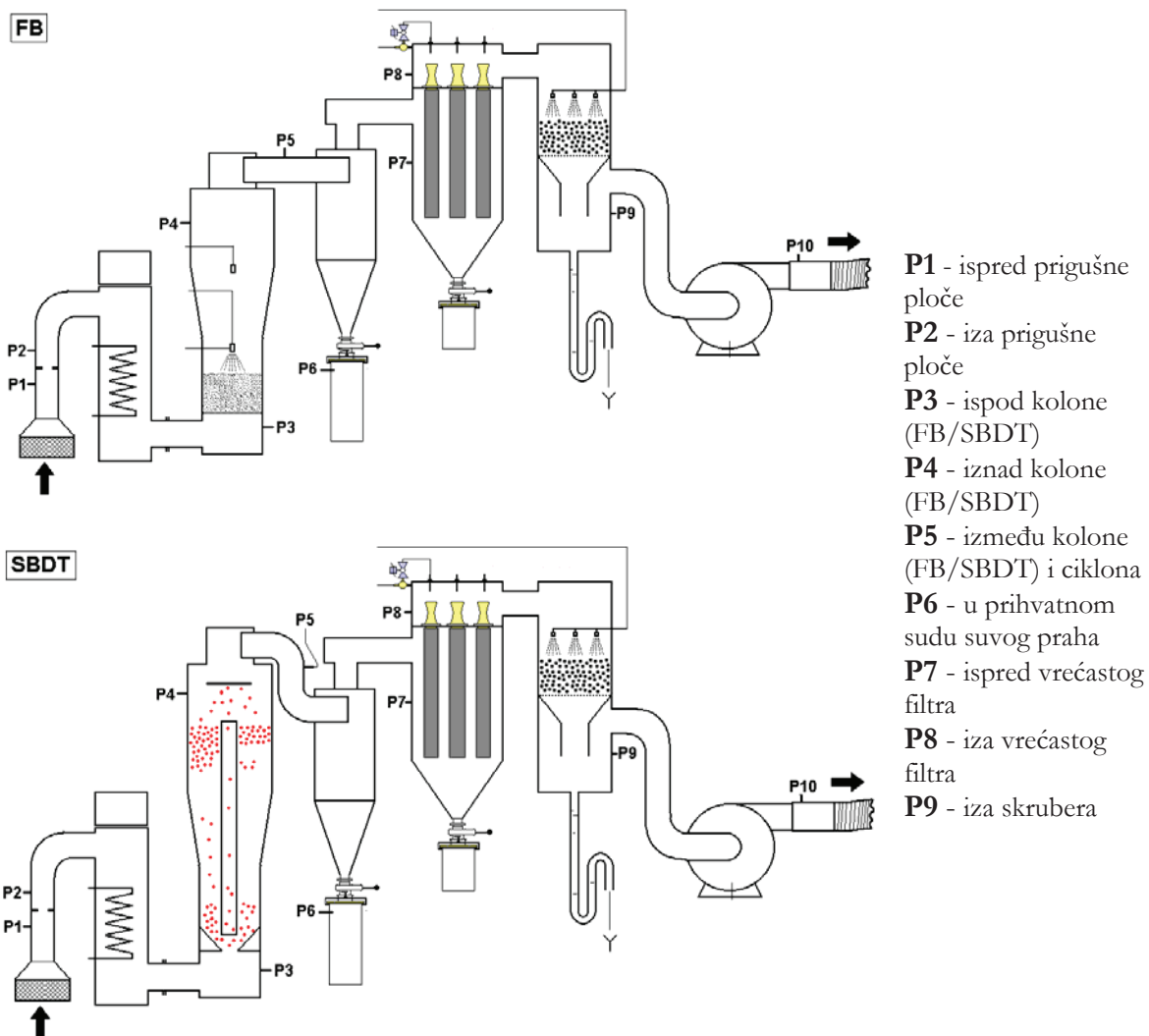
Regulacija procesa

Za FB-sušnicu je karakteristična relativno laka regulacija procesa, obzirom da se suspenzija direktno uvodi u sloj inertnih čestica, a termokontroler koji upravlja radom pumpe za doziranje je postavljen neposredno iznad sloja. U svim slučajevima temperatura sušenja je bila približno konstantna sa vremenom, bilo da pumpa radi kontinualno ili u režimu diskontinualne regulacije protoka suspenzije ("on-off" regulacija). Međutim, kod SBDT-sušnice termokontroler koji upravlja radom sistema za doziranje je takođe postavljen iznad sloja, ali se suspenzija uvodi u centralni deo anularne zone sloja (videti sliku 4.2). U ovom slučaju inercija sistema je mnogo veća, jer od momenta kada termokontroler registruje poremećaj u doziranju suspenzije do momenta kada povećana ili smanjena količina suspenzije stigne u cevni umetak protekne dosta vremena, prosečno oko 1 minut. Još je nepovoljnija varijanta ako se suspenzija dozira na vrh anularne zone sloja. U ovom slučaju diskontinualna ("on-off") regulacija protoka suspenzije ima za posledicu variranje temperature sušenja po približno sinusoidalnoj liniji. Ovaj problem je znatno manji ako se koristi kontinualno doziranje suspenzije. Ovaj problem bi se mogao značajno ublažiti raspršivanjem suspenzije u ulaznu zonu sloja ispod cevnog umetka. Međutim, i ova varijanta ima nedostatak pošto je mlaznica postavljena u najtoplijem delu sistema. Eventualno zagušivanje mlaznice ima za posledicu pregrevanje sloja inertnih čestica. Ovi problemi nisu prisutni kod FB-sušnice, usled toga što nema potrebe da se suspenzija raspršava mlaznicama.



bez doziranja: $V_0=292.5 \text{ m}^3/\text{h}$, $T_{gi}=T_{ge}=21^\circ\text{C}$

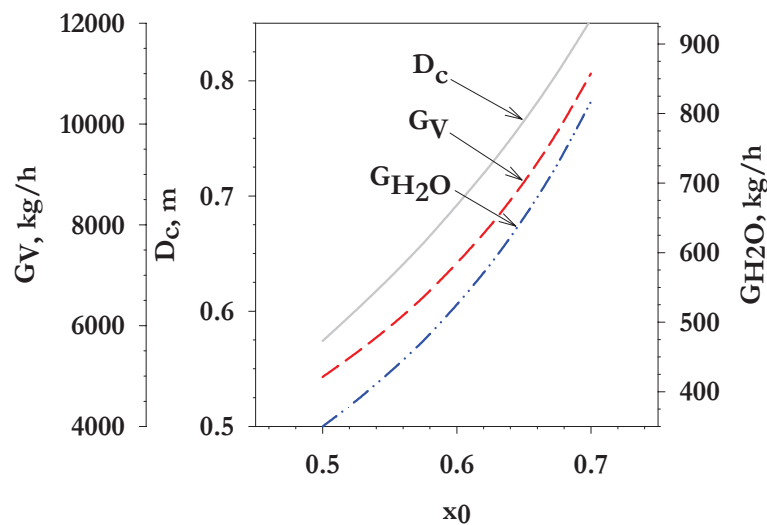
doziranje vode: $V_0=233.7 \text{ m}^3/\text{h}$, $T_{gi}=252.0^\circ\text{C}$, $T_{ge}=91.3^\circ\text{C}$



Slika 5.2. Šeme mernih mesta i vrednosti padova pritiska u FB-sušnici i SBDT-sušnici

Sadržaj vode u suspenziji

Utvrđeno je da se stabilan radni režim FB-sušnice može postići pri doziranju suspenzija sa različitim sadržajem vlage, od vrlo retkih do polusuvih pasta. Međutim, u SBDT-sušnici stabilan radni režim je ograničen na doziranje retkih tečljivih suspenzija, što predstavlja nedostatak sa aspekta razmera procesa u odnosu na FB-sušnicu. Na slici 5.3 prikazan je izračunati uticaj sadržaja vode u suspenziji na potreban prečnik kolone, maseni protok vazduha i količinu isparene tečne faze vode za zadati kapacitet FB-sušnice u odnosu na suhu materiju. Za zadati kapacitet u odnosu na suhu materiju Cineba ($G_m=350$ kg/h), pri $T_{gi}=300^\circ\text{C}$ i $T_{ge}=105^\circ\text{C}$, smanjenje sadržaja vode u suspenziji za 5% (sa 65 na 60%) smanjuje prečnik kolone (D_c) za 10.5%, potreban maseni protok vazduha (G_v) za 22.2% i količinu tečne faze vode koju je potrebno ispariti (G_{H_2O}) za 23.8%.



Slika 5.3. Uticaj sadržaja vode u suspenziji na potreban prečnik kolone (D_c), potreban protok vazduha (G_v) i količinu isparene vode (G_{H_2O}) za dati kapacitet FB-sušnice od $G_m=350$ kg/h pri $T_{gi}=300^\circ\text{C}$ i $T_{ge}=105^\circ\text{C}$ (izračunate vrednosti)

Uvećanje razmera procesa

Za FB-sušnicu je generalno karakteristično jednostavno uvećanje razmera procesa, budući da se u osnovi svodi na to da su najvažniji procesni parametri (protok vazduha i kapacitet isparavanja vlage) direktno proporcionalni prečniku kolone, odnosno površini poprečnog preseka sloja inertnih čestica. Preliminarna ispitivanja obavljena na laboratorijskoj ($D_c=72$ mm) FB-sušnici sa povećanjem razmera procesa uspešno su preneti na poluindustrijsku ($D_c=215$ mm) FB-sušnicu. Upoređivanjem ova dva sistema proizilazi da za iste temperature vazduha na ulazu i izlazu iz sušnica važi sledeća zavisnost za kapacitet isparavanja vlage:

$$(G_{H_2O})_{\text{POLUIND.}} = (G_{H_2O})_{\text{LAB.}} \cdot \frac{(U)_{\text{POLUIND.}}}{(U)_{\text{LAB.}}} \cdot \left[\frac{(D_c)_{\text{POLUIND.}}}{(D_c)_{\text{LAB.}}} \right]^2$$

Kod SBDT-sušnice, međutim, uvećanje razmera procesa je znatno složenije /Mathur i Epstein, 1974; Povrenović, 1998/. Za sada ne postoji ni na laboratorijskom, ni na poluindustrijskom nivou pouzdana metoda za predviđanje raspodele primarnog protoka između fontane i anularnog dela sloja u ulaznoj zoni zbog kompleksne geometrijske i hidrodinamičke strukture ovog sistema. Sa druge strane, u cevnom umetku se u osnovi odvija pneumatski transport u režimu ubrzavanja čestica. Dosadašnja istraživanja su pokazala da je u cevima većeg prečnika strujna slika znatno kompleksnija, ne mogu se zanemariti radijalni profili brzina i koncentracija čestica, a broj mogućih režima strujanja čestica je znatno veći, uključujući i to da pod određenim uslovima strujanje čestica neposredno uz zid može biti naniže /Briens i Bergognou, 1986; Bi i Grace, 1999/.

Sušenje lepljivih materijala

Pri sušenju lepljivih materijala SBDT-sušnica ima prednost s obzirom da se sušenje uglavnom odvija u cevnom umetku: kraće vreme zadržavanja u toku sušenja (oko 0.24 s u cevnom umetku), dodatna pomoć u otiranju praha je intenzivniji sudar inertnih čestica sa deflektorom, u odnosu na FB-sušnicu. Pri tome treba voditi računa da se ne premaši vrednost maksimalnog protoka suspenzije, s obzirom da može doći do slepljivanja inertnih čestica u anularnom delu sloja, što rezultuje u manjem padu pritiska kroz cevni umetak, iz razloga što manju količinu inertnih čestica iz anuluranog dela sloja u ulaznoj zoni zahvata vazduh za fontanovanje. Samim tim je i proizvodnost praškastog produkta manja. U FB-sušnici bi se mogli sušiti ovakvi materijali, ali pod uslovom da se ne drže prejakim adhezionim silama za inertne čestice, što se može rešiti izborom materijala inertnih čestica: teflon, i sl. Pored toga treba izbeći toplu zonu pri dnu sloja ili mehaničkom agitacijom ili uvođenjem suspenzije na dno sloja, kako bi se vršilo pothlađivanje ove kritične zone. U FB-sušnici je nedostatak što je vreme boravka materijala koji se suši neuniformno, za razliku od sistema sa cevnom umetkom gde su čestice primorane da provedu približno isto vreme u sloju. Termoostetljivi i lepljivi materijali bi mogli da se suše na umerenim temperaturama, što u oba sistema smanjuje kapacitet isparavanja vlage.

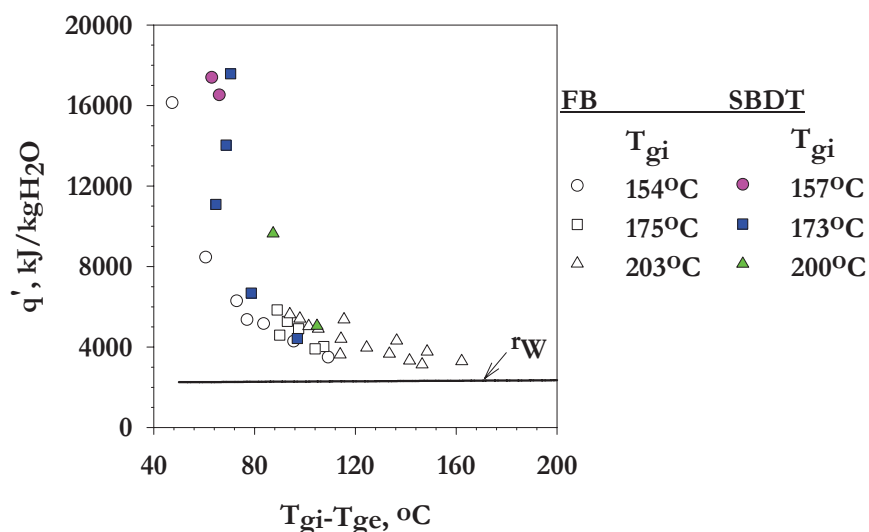
Kapacitet isparavanja vode, specifična potrošnja toplote i specifična potrošnja vazduha

Za oba tipa sušnica sa pokretnim slojem inertnih čestica mogu se postaviti ukupni bilansi za komoru za sušenje na osnovu kojih se mogu proračunati osnovni parametri sušenja: specifični kapacitet isparavanja vlage, specifični utrošak toplote, specifična potrošnja vazduha i termička efikasnost.

U SBDT-sušnici volumetrijska brzina isparavanja vode varirala je između 101 i 203 $\text{kg}_{\text{H}_2\text{O}}/\text{m}^3_{\text{SLOJ}}\text{h}$, u zavisnosti od ulazne temperature vazduha (razmatrani su samo ogledi u kojima je postignuto kompletno isparavanje tečne faze vode duž cevnog umetka, tabela 4.10). Poređenje volumetrijskog kapaciteta isparavanja između FB-sušnice i SBDT-sušnice je nerealno s obzirom da je za isti prečnik kolone statička visina sloja u SBDT-sušnici

znatno veća. Za SBDT-sušnicu odnos H/D_c je 4.2, dok je za FB-sušnicu srednji odnos oko 0.5, iako je ukupna visina kolone za ova dva sistema približno ista. Upoređujući brzine isparavanja po jedinici površine poprečnog preseka kolone, najveća vrednost za SBDT-sušnicu iznosi $295.6 \text{ kg}_{\text{H}_2\text{O}}/\text{m}^2\text{h}$, pri čemu su razmatrani samo ogleđi u kojima je postignuto kompletno isparavanje tečne faze vode duž cevnog umetka (ogled 8, tabela 4.10). Pod sličnim uslovima, u FB-sušnici dobijena je brzina isparavanja od $421 \text{ kg}_{\text{H}_2\text{O}}/\text{m}^2\text{h}$ (ogled 41, tabela P2.3 u Prilogu 2). Generalno, u oba sistema kapacitet isparavanja vode se može povećati u zavisnosti od varijacije procesnih uslova. Tako na primer, pri konstantnim ostalim parametrima, kapacitet isparavanja vode će se povećati povećanjem ulazne temperature vazduha, s obzirom da je direktno proporcionalan razlici temperatura ($T_{gi}-T_{ge}$). Sa druge strane, kapacitet isparavanja vode raste sa povećanjem brzine vazduha pri ostalim konstantnim parametrima, s obzirom da je direktno proporcionalan protoku vazduha. U odnosu na FB-sušnicu, u SBDT-sušnici je uticaj povećanja ulazne temperature vazduha relativno mali što ukazuje na ograničenja prenosa toplote i mase u retkom dvofaznom toku u centralnoj cevi. Pored toga, u SBDT-sušnici uvođenje izvesne količine zagrejanog vazduha u anularni prostor sloja (odnosno korišćenje sistema sa fontansko-fluidizovanim slojem i cevnom umetkom) povećalo bi kapacitet sušenja po jedinici zapremine sloja, kao i ukupnu efikasnost sistema, usled povećane brzine cirkulacije inertnih čestica, kao i povećane temperature inertnih čestica na ulazu u cevni umetak. Oba ova parametra imaju značajan uticaj na brzinu isparavanja vlage.

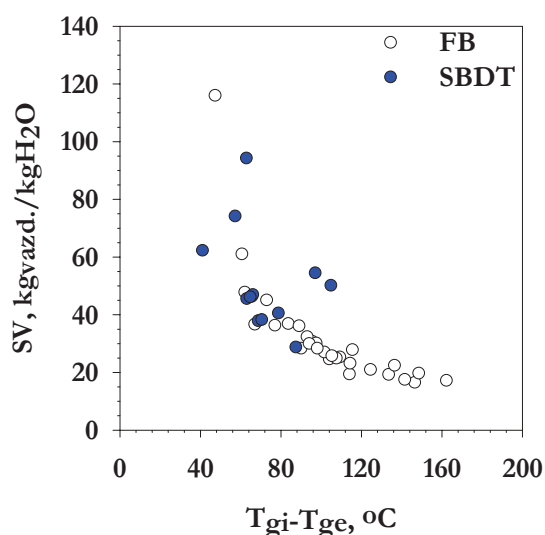
Specifična potrošnja toplote (q') obračunata kao utrošak u odnosu na stvarno unetu količinu toplote, odnosno utrošak baziran na stvarnoj razlici temperatura $\Delta T=T_{gi}-T_{0A}$, je prikazana za oba sistema na slici 5.4. U oba tipa sušnica za male razlike temperatura ulaznog i izlaznog vazduha specifični utrošak toplote je veoma visok, da bi sa povećanjem razlike temperatura ($T_{gi}-T_{ge}$) opadao, asimptotski se približavajući teorijskom utrošku, tj. vrednosti latentne toplote isparavanja vode. Energija uneta agensom za sušenje (vazduh) u sušnici se



Slika 5.4. Specifična potrošnja toplote pri isparavanju vode u funkciji razlike temperatura u FB-sušnici i SBDT-sušnici pri doziranju vode

koristi, osim za isparavanje vlage, za zagrevanje inertnih čestica, suspenzije, zidova uređaja i na gubitke u okolinu. Iskorišćena energija se sa masom isparene vlage nadoknađuje izlaznom vazduhu i sa povećanjem ($T_{gi}-T_{ge}$) realna sušnica se približava teorijskoj (adijabatskoj, izoentalpijskoj) sušnici u kojoj celokupni energijski potencijal vazduha koristi samo na isparavanje vlage. Budući da je realna potrošnja toplote srazmerna razlici temperatura između ulaznog i izlaznog vazduha ($T_{gi}-T_{ge}$), podaci na ovoj slici sugerišu zaključak da su i FB-sušnica i SBDT-sušnica utoliko termički efikasnije ukoliko se radi na većoj razlici temperatura ulaznog i izlaznog vazduha. Na osnovu podataka sa slike 5.4 može se uočiti da je specifična potrošnja toplote generalno veća za SBDT-sušnicu nego za FB-sušnicu, pri približno istim vrednostima ulazne temperature vazduha.

Specifični utrošak vazduha pri isparavanju vode je (slika 5.5), takođe, manji što je razlika temperatura između ulaznog i izlaznog vazduha ($T_{gi}-T_{ge}$) veća. Uočava se da podaci za oba tipa sušnica slede istu liniju. Kada su ostvareni uslovi za ravnomerno sušenje i isparavanje vlage iz materijala koji se suši, što je niža temperatura vazduha na izlazu iz sušnice to je veće energijsko iskorišćenje rada sušnice i manja specifična potrošnja vazduha.



Slika 5.5. Specifična potrošnja vazduha u funkciji razlike temperatura u FB-sušnici i SBDT-sušnici pri doziranju vode

U pogledu sva tri relevantna parametra konvektivnih sušnica: specifičnog kapaciteta isparavanja vode, specifične potrošnje toplote i specifične potrošnje vazduha, iz ukupnog toplotnog bilansa proizilazi da su za svaku konstantnu brzinu vazduha (odnosno maseni protok vazduha) za oba sistema vrednosti navedenih parametara direktno proporcionalni razlici temperatura između ulaznog i izlaznog vazduha ($T_{gi}-T_{ge}$).

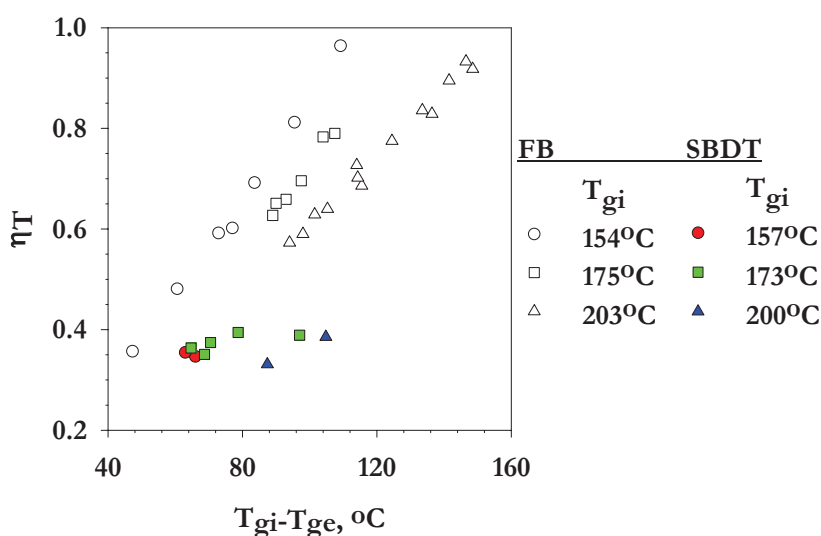
Pri sušenju nezasićenim vlažnim vazduhom, u kome je sadržaj vlage određen pritiskom, temperaturom i relativnom vlažnošću vazduha, porast temperature vazduha na ulazu u sušnicu rezultuje u mogućnosti povećanja sadržaja vlage u izlaznom vazduhu, kao i smanjenju specifične potrošnje toplote i specifične potrošnje vazduha. Pri konstantnoj temperaturi sušenja (T_{ge}), sa porastom ulazne temperature vazduha raste i temperaturni potencijal sušenja ($T_{gi}-T_{ge}$) iz razloga što se smanjuje relativna vlažnost u ulaznom vazduhu.

Teorijski bi sušenje moglo da se odvija na temperaturi mokrog termometra, koja je znatno niža od ulazne temperature vazduha, i u režimu kvazi-konstantne brzine procesa ulazna temperatura vazduha može biti visoka što doprinosi ubrzavanju sušenja vlažnog materijala. Međutim, u praksi temperatura sušenja mora biti viša od temperature mokrog

termometra da bi se izbegla kondenzacija gasovite faze vlage u cevovodima, u uređajima za izdvajanje praškastog produkta i ostalim delovima postrojenja za sušenje. Sa druge strane, temperatura izlaznog vazduha, tj. temperatura sušenja (T_{ge}), je ograničena kvalitetom produkta i hidrodinamičkom stabilnošću pokretnih slojeva inertnih čestica. Najčešće je rezidualna vlaga produkta glavni kriterijum za vođenje procesa i generalno sadržaj vlage u izlaznom prahu opada sa povećanjem temperature sušenja (videti sliku 3.26).

Termička (energijska) efikasnost

Termička efikasnost (η_T), koja povezuje količinu toplote iskorišćene za sušenje vlažnog materijala u sušnici sa ukupnom toplotom dovedenom u sušnicu obračunatom u odnosu na temperaturu okoline (η_T), definisana je jednačinom (3.15) ili (4.37). Na slici 5.6 su prikazana po tri seta izračunatih vrednosti termičke efikasnosti za FB-sušnicu i SBDT-sušnicu sa pri približno istim ulaznim temperaturama vazduha. Za SBDT-sušnicu ove vrednosti variraju između 0.22 i 0.40 (za oglede u kojima je postignuto kompletno isparavanje vode duž cevnog umetka), što je generalno manje od vrednosti dobijenih u FB-sušnici ($\eta_T=0.91\div 0.34$). Visoke vrednosti termičke efikasnosti su ostvarene u slučajevima kad je temperatura izlaznog vazduha bila bliska temperaturi adijabatskog zasićenja vazduha, pri čemu je izlazni vazduh i dalje u nezasićenom stanju. Tehnologije zasnovane na sušenju suspenzija na inertnim česticama, bilo da se radi o sistemima sa fluidizovanim, fontanskim ili modifikovanim fontanskim slojem, pokazuju dobre performanse u poređenju sa drugim sistemima za sušenje suspenzija. Raspršavanjem i nanošenjem suspenzije materijala koji se suši na inertne čestice u vidu tankog tečnog filma moguće je ostvariti veliku koncentraciju sušenog materijala u raspoloživoj zapremini sušnice. I povećanje površine za razmenu i povećanje koncentracije čestica sušenog materijala vode ka intenzifikaciji procesa rada sušnice i povećanoj efikasnosti korišćenja energije, tj. povećan je efekat isparavanja vlage u



Slika 5.6. Termička efikasnost procesa sušenja u funkciji razlike temperatura u FB-sušnici i SBDT-sušnici

odnosu na sisteme za sušenje bez inertnih čestica. Da bi se obezbedila maksimalna efikasnost procesa pri zadatoj temperaturi ulaznog vazduha (T_{gi}), potrebno je temperaturu izlaznog vazduha (T_{ge}) održavati na što nižoj mogućoj vrednosti koja je ograničena kvalitetom produkta i obezbeđenjem stabilnih hidrodinamičkih uslova u pokretnim slojevima inertnih čestica. S obzirom da rezidualna vlažnost praškastog produkta direktno zavisi od temperature sušenja, termička efikasnost opada kada se materijal suši do nižih sadržaja vlage. Sa slike 5.6 se može uočiti da je termička efikasnost veća za FB-sušnicu pri približno istoj T_{gi} i razlici temperatura ($T_{gi} - T_{ge}$) u odnosu na SBDT-sušnicu.

Brzina sušenja

Za oba ispitivana konvektivna sistema sušenja na inertnim česticama pretpostavljeno je formiranje tankog uniformnog filma suspenzije na površini inertnih čestica. Iz ovog razloga se može smatrati da nema otpora difuziji vlage i prenosu toplote kroz film suspenzije i da se sušenje odvija u periodu "kvazi-konstantne" brzine sušenja. U tom periodu temperatura površine inertnih čestica ostaje približno konstantna i bliska je temperaturi adijabatskog zasićenja vazduha (T_{wb}). Za period konstantne brzine sušenja karakteristično je da se toplota koristi samo za isparavanje vlage (period zagrevanja vlažnog materijala je kratak i zanemaruje se, pošto je film suspenzije izuzetno tanak). Kada spoljašnji otpor difuziji vlage kroz gasoviti granični sloj dominira tada se sa površi vlažnog materijala isparava slobodna, površinska ili slabo vezana vlaga.

Na osnovu eksperimentalnih merenja i proračuna parametara sušenja prema predloženim modelima ustanovljeno je da je temperatura materijala tokom sušenja između temperature adijabatskog zasićenja vazduha (T_{wb}) i temperature izlaznog vazduha. Ovi rezultati ukazuju na to da nije celokupna površina inertnih čestica u sloju prekrivena filmom suspenzije, tako da se sušenje, pored konvektivnog odvija delimično i konduktivnim mehanizmom. Intenzifikaciji sušenja doprinosi veća pokrivenost površine inertnih čestica, što potvrđuju veće vrednosti termičke efikasnosti i kapaciteta isparavanja vlage pri većim protocima suspenzija, pri ostalim optimalno podešenim radnim parametrima.

Brzina sušenja je najveća gde je najveća pogonska sila i najveća površina raspoloživa za razmenu toplote i mase. U oba sistema povećanje temperature inertnih čestica prouzrokuje i povećanje temperature tečnog filma na površini inertnih čestica. Na ovaj način se povećava parcijalni pritisak vodene pare neposredno iznad površine tečnog filma, čime se povećava pogonska sila procesa. Ovo pospešuje i povećanje toplotnog kapaciteta inertne čestice. Usled intenzivnog kretanja inertnih čestica u pokretnim slojevima dolazi do učestalih međusobnih sudara čime se narušava granični gasoviti sloj neposredno iznad površine tečnog filma suspenzije. Ovo ima za posledicu obnavljanje površine za razmenu toplote i mase, smanjenje otpora difuziji vlage kroz gasoviti film oko inertne čestice, što utiče na povećanje brzine sušenja.

6. ZAKLJUČCI

U ovom radu ispitivano je sušenje suspenzija u pokretnom sloju inertnih čestica na dva sistema, tj. sušenje u fluidizovanom sloju inertnih čestica i sušenje u fontanskom sloju inertnih čestica sa cevnom umetkom. Ispitivanja su rađena na laboratorijskim aparaturama i na uvećanim laboratorijskim (poluindustrijskim) postrojenjima. Najvažniji zaključci koji su rezultirali iz ovih istraživanja su:

Sušenje u fluidizovanom sloju inertnih čestica

Sušenje rastvora, suspenzija i pasta u fluidizovanom sloju inertnog materijala predstavlja vrlo atraktivnu alternativu ostalim postupcima sušenja suspenzija. U ovom sistemu moguće je ostvariti višestruko veći specifični kapacitet, tj. produkciju suvog praha po jedinici zapremine uređaja, a time znatno manje investicione troškove. U odnosu na sprej sušnicu fluidizacioni sistem je jednostavnije konstrukcije i omogućuje jednostavniju kontrolu procesa. Rezultati dobijeni u ovom radu su u saglasnosti sa literaturnim navodima da je produktivnost sušnice sa fluidizovanim slojem inertnih čestica, izražena kao produkcija suve materije po jedinici volumena uređaja, oko 10 puta veća od produktivnosti sprej sušnice.

Sistem radi stabilno i karakteriše ga visoka efikasnost. Specifični kapacitet isparavanja vode je vrlo visok, tipično oko $500 \text{ kg}_{\text{H}_2\text{O}}/\text{m}^2_{\text{sloja}}\text{h}$. Maksimalna ostvarena vrednost u koloni prečnika $D_c=215 \text{ mm}$ je $1000 \text{ kg}_{\text{H}_2\text{O}}/\text{hm}^2_{\text{sloja}}$ pri doziranju tečne faze vode i $896 \text{ kg}_{\text{H}_2\text{O}}/\text{hm}^2_{\text{sloja}}$ pri sušenju suspenzija.

Efikasnost sistema iskazana po tri osnovna parametra: specifični kapacitet isparavanja vode $W_{\text{H}_2\text{O}}$ ($\text{kg}_{\text{H}_2\text{O}}/\text{m}^2\text{h}$), specifičan utrošak toplote q ($\text{kJ}/\text{kg}_{\text{H}_2\text{O}}$) i specifičan utrošak vazduha SV ($\text{kg}/\text{kg}_{\text{H}_2\text{O}}$) je utoliko veća ukoliko sistem radi na većoj razlici temperatura između ulaznog vazduha i fluidizovanog sloja inertnih čestica na koje je naneta suspenzija.

Visoka efikasnost u pogledu specifičnog utroška toplote q' ($\text{kJ}/\text{kg}_{\text{H}_2\text{O}}$) i specifičnog utroška vazduha SV ($\text{kg}/\text{kg}_{\text{H}_2\text{O}}$) je rezultat visoke razlike temperatura između temperatura ulaznog vazduha i fluidizovanog sloja ($T_{\text{gi}}-T_{\text{ge}}$) i time uslovljene kinetike sušenja, pri čemu se temperatura sloja održava na željenoj, odnosno dozvoljenoj, vrednosti. Zahvaljujući intenzivnom mešanju inertnih čestica u fluidizovanom sloju i eventualne dodatne mehaničke agitacije sloja, temperatura sloja je ravnomerna po volumenu i umanjena je opasnost od lokalnog pregrevanja materijala koji se suši.

Utrošak toplote, obračunat na razliku temperatura između ulaznog i izlaznog vazduha ($T_{\text{gi}}-T_{\text{ge}}$), je blizu teorijski potrebnog za faznu transformaciju vode iz tečne u gasovitu fazu, tj. blizak je vrednosti latentne toplote isparavanja. Utrošak toplote, obračunat u odnosu na stvarnu razliku temperatura $T_{\text{gi}}-T_{0A}$ (gde je T_{0A} temperatura okoline) je najveći pri najmanjoj razlici temperatura $T_{\text{gi}}-T_{\text{ge}}$, i do $90000 \text{ kJ}/\text{kg}_{\text{H}_2\text{O}}$, a asimptotski se približava

teorijskom utrošku sa porastom razlike temperatura ($T_{gi}-T_{ge}$). S obzirom da je realno korišćenje energije srazmerno razlici temperatura između ulaznog i izlaznog vazduha ($T_{gi}-T_{ge}$), proizilazi zaključak da je fluidizovani sistem utoliko termički efikasniji ukoliko se radi na većoj razlici temperatura..

Termička efikasnost je relativno visoka i u zavisnosti od uslova pod kojima su izvođeni ogledi kreće se u intervalu $\eta_T=0.911\div 0.344$.

Za stabilan radni režim sušnice, kao i za kvalitet produkta, najvažnije je pouzdano automatsko doziranje suspenzija i pasta, budući da se konstantna temperatura sloja, pri konstantnom protoku i temperaturi ulaznog vazduha, može obezbediti samo kontrolom protoka suspenzije ili paste. Ispitano je nekoliko sistema za doziranje suspenzija različitog početnog sadržaja vlage. Utvrđeno je da sušnica sa fluidizovanim slojem inertnih čestica stabilno radi i kada se u sloj dozira tečna suspenzija pomoću peristaltičke pumpe, kao i polusuva pasta pomoću pužnog transportera. Zahvaljajući intenzivnom mešanju inertnih čestica, kao i mehaničkoj mešalici, dozirani materijal se praktično trenutno rasporedi po zapremini fluidizovanog sloja.

Na osnovu granulometrijske analize za većinu sušenih suspenzija je ustanovljeno da je granulometrijski sastav suvog praha skoro identičan granulometrijskom sastavu polazne suspenzije. Stoga se u većini aplikacija sušenja u fluidizovanom sloju inertnih čestica u daljem tehnološkom procesu može izbeći naknadna operacija mlevenja. Ako se za formiranje fluidizovanog sloja koriste teže čestice (napr. ZrO_2) obezbeđuje se u određenom stepenu niži granulometrijski sastav izlaznog praha.

Smanjenje sadržaja vode u polaznoj suspenziji kao i povećanje ulazne temperature vazduha (pri konstantnoj temperaturi sloja) značajno redukuju prečnik kolone, potrošnju vazduha i potrošnju energije.

Ustanovljeno je da jednostavan model sušenja, koji se bazira na ukupnim bilansima toplote i mase postavljenim za ceo sloj inertnih čestica, veoma dobro predviđa performanse sušnice. Srednje apsolutno odstupanje između eksperimentalnih i izračunatih vrednosti specifičnog kapaciteta isparavanja vode (W_{H_2O}) iznosi 5.8%, pri čemu su za 85% podataka odstupanja u intervalu od $\pm 10\%$.

Sušenje u fontanskom sloju inertnih čestica sa cevnom umetkom

Razvijen je matematički model za predviđanje performansi sušnice sa fontanskim slojem inertnih čestica i centralnom cevi. Model bazira na jednačinama kontinuiteta, bilansima količine kretanja za fluid i čestice i bilansima za prenos toplote i mase postavljenim za cevni umetak. Praktično korišćenje modela zahteva i korelacije za predviđanje koeficijentata trenja fluid-čestice, fluid-zid transportne cevi i čestice-zid transportne cevi.

Predloženi model se generalno zasniva na jednodimenzionom hidrodinamičkom modelu vertikalnog dvofaznog toka gas-čvrste čestice, u koji je uključen model za određivanje

brzine i poroznosti pri zagušivanju, dopunjenog bilansima prenosa mase i toplote u cevnom umetku u cilju predviđanja promene sadržaja vlage u gasovitoj fazi tokom sušenja, promene temperatura gasne faze i čvrste faze.

Predloženi model je generalno primenljiv za vertikalni dvofazni redak tok fluid-čestice. Međutim, predloženi postupak za određivanje početnih uslova na ulazu u cevni umetak ograničen je na slučajeve gde se primenjuje fontanski ili fontansko-fluidizovani sloj kao rešenje za doziranje čvrstih čestica u cevni umetak.

Praktična primena fontanskih i fontansko-fluidizovanih slojeva sa cevnom umetkom u gasovitoj fazi podrazumeva upotrebu relativno kratkog cevnog umetka usled čega se dvofazni tok kroz cevni umetak odvija u hidrodinamičkom režimu ubrzavanja čestica. U predloženom modelu su korišćene relacije za koeficijent trenja fluid-čestice, faktor trenja fluid-zid i faktor trenja čestice-zid izvedene za stacionarni dvofazni tok van zone ubrzavanja čestica, pa se postavlja pitanje kako na njih utiče zona ubrzavanja. Pored toga, inertne čestice u cevnom umetku su vlažne, tako da je realno očekivati da će prisustvo tečne faze u cevnom umetku uticati na trenje. Upotrebljene korelacije za određivanje koeficijenata prenosa toplote i mase su u osnovi izvedene za usamljenu česticu izloženoj strujanju fluida van zone ubrzavanja čestica, tako da bi budućim radom trebalo istražiti uticaj ubrzavanja inertnih čestica i vlažnosti inertnih čestica na koeficijente trenja, kao i uticaj zadržavanja ("hold-up"-a) sušenog materijala u anularnoj zoni sloja na brzinu cirkulacije inertnih čestica

Ispitivani su režimi strujanja u vertikalnom toku gas-čestice, posebno uslovi koji mogu dovesti do zagušivanja u cevnom umetku. Utvrđeno je da je najjednostavnija metoda za eksperimentalno određivanje granica prelaza između različitih režima strujanja čestica u vertikalnom pneumatskom transportu merenje fluktuacija pritiska duž transportne linije.

Razvijena je i eksperimentalno utvrđena i verifikovana metoda za predviđanje brzine zagušenja i poroznosti u vertikalnom pneumatskom transportu. Model se zasniva na bilansima količine kretanja, određivanju koeficijenta trenja fluid-čestice varijacionim modelom i korelacijama za relativnu brzinu između fluida i čestica pri zagušivanju. Predloženi model je u veoma dobroj saglasnosti sa raspoloživim podacima za brzinu zagušenja za sisteme sa krupnim česticama.

Razvijen je i eksperimentalno određen i verifikovan matematički model za predviđanje brzine cirkulacije inertnih čestica u sušnici sa fontanskim slojem inertnih čestica i cevnom umetkom. Brzina cirkulacije čestica se izračunava iz jednačina kontinuiteta i bilanasa količine kretanja za turbulentni dvofazni tok gas-čestice metodom probe i greške, iterativnim postupkom, sve dok se na osnovu pretpostavljene vrednosti brzine čvrstih čestica ne dobije vrednost statičkog pritiska fluida koja je ista izmerenoj vrednosti na određenoj aksijalnoj poziciji u cevnom umetku

Hidrodinamika fontanskog sloja sa centralnom cevi je kompleksna tako da se optimalne karakteristike sušnice mogu dobiti na više načina.

Rezultati proračuna hidrodinamičkih parametara i parametara sušenja su generalno u dobroj saglasnosti sa eksperimentalnim rezultatima. I pored navedenih nedostataka predloženi model predstavlja dobru osnovu za proračun, projektovanje i simulaciju procesa. Najvažniji zaključci izvedeni iz proračuna prema predloženom matematičkom, i simulacionom, modelu su:

- Na osnovu modela može se doći do potrebne dužine i prečnika cevnog umetka, kao i do operativnih uslova za optimalan rad sistema.
- Najveća brzina isparavanja vlage se postiže u donjoj zoni centralne cevi, gde je takođe i relativna brzina između vazduha i inertnih čestica najveća i time predodređena vrednost koeficijenta prelaženja toplote i supstancije (vlage).
- Povećanjem ulazne temperature vazduha, ulazne temperature inertnih čestica i brzine cirkulacije inertnih čestica povećava se i brzina isparavanja vlage u centralnoj cevi.
- Uticaj povećanja ulazne temperature vazduha je relativno mali što ukazuje na ograničenja prenosa toplote i mase u retkom dvofaznom toku u centralnoj cevi.
- Najveći uticaj na kapacitet sušnice imaju ulazna temperatura inertnih čestica i brzina cirkulacije inertnih čestica. Ovo ukazuje na to da bi uvođenje izvesne količine zagrejanog vazduha direktno u anularnu zonu sloja (tj. primena fontansko-fluidizovanog sloja sa centralnom cevi) značajno povećalo kapacitet sušenja po jedinici zapremine sloja.

Granulometrijski sastav produkta je, kao i u postupku sušenja u fluidizovanom sloju inertnih čestica, praktično identičan granulometrijskom sastavu polazne suspenzije.

Najvažniji uslov za stabilan rad sušnice je da površina inertnih čestica mora biti potpuno suva kada one iz centralne cevi dospeju ponovo u anularnu zonu sloja da ne bi došlo do njihovog međusobnog slepljivanja i sinterovanja sloja. Ispitivanja su pokazala da je kritično opterećenje sistema oko $0.005 \text{ kg}_{\text{H}_2\text{O}}$ po 1 kg inertnih čestica u cevnom umetku ($L_t=0.9 \text{ m}$, $T_{gi}<180^\circ\text{C}$).

Povećanjem protoka suspenzije povećava se protok tečne faze vode na ulazu u cevni umetak, kao i debljina filma suspenzije na površini inertnih čestica. Sadržaj vlage i srednja veličina čestica produkta su rezultat trenja i sudara između inertnih čestica i između inertnih čestica sa zidom cevnog umetka. Kada uneta količina toplote i/ili intenzitet sudara i trenja između inertnih čestica nisu dovoljni za potpuno sušenje i otiranje filma suspenzije ne mogu se postići uslovi za stabilan rad sistema. Brzina cirkulacije inertnih čestica u anularnom delu sloja opada sa povećanjem sadržaja vlage unutar sloja. Smanjenje cirkulacije inertnih čestica veoma zavisi od karakteristika materijala koji se suši i od sadržaja vlage u filmu vlažnog materijala oko inertnih čestica.

U cilju kontrole parcijalnih mehanizama sušenja podešavanjem procesnih parametara važno je odrediti vreme boravka inertnih čestica u različitim delovima sloja. Brzina cirkulacije inertnih čestica je obrnuto proporcionalna trajanju jednog ciklusa cirkulacije, tako da je debljina filma manja što je ciklus kraći. Na osnovu proračuna prema predloženom modelu procesa dobijene vrednosti trajanja jednog ciklusa cirkulacije se kreću između 1.73 i 7.19 min, zavisno od operativnih uslova, pri čemu vreme boravka inertnih čestica u cevnom umetku iznosi u proseku svega 0.16% u odnosu na ukupno trajanje jednog ciklusa cirkulacije.

./.

Ispitivani sistemi za sušenje suspenzija su ekološki na visokom nivou. Prečišćavanju izlaznog vazduha, tj. uklanjanju čestica sušenog materijala iz izlaznog vazduha je posvećena posebna pažnja, s obzirom da ove čestice predstavljaju koristan produkt. Za njihovo izdvajanje korišćeni su centrifugalni separator-ciklon, vrećasti filter i mokri separator čestica-skruber. Koncentracija čestica u izlaznom vazduhu je višestruko ispod dozvoljene vrednosti. U izlaznom vazduhu nema štetnih gasovitih komponenti, budući da se tokom sušenja emituje vodena para. Oba sistema za sušenje suspenzija rade pod vakuumom, tako da je sprečeno emitovanje čestica u okolni prostor. Sva oprema je propisno uzemljena u cilju sprečavanja generisanja statičkog elektriciteta.

./.

Ispitana je mogućnost dosušivanja praškastog produkta iz primarne sušnice u cilju obezbeđivanja konačne rezidualne vlažnosti produkta i hlađenja u cilju sprečavanja slepljivanja i zgrudnjavanja tokom prirodnog hlađenja osušenog materijala.

S obzirom na zahtev da praškasti produkti za zaštitu bilja sadrže manje od 1% vlage, uvećani laboratorijski uređaj je dograđen sa dva sistema za dosušivanje praha. Eksperimenti su pokazali da se, u slučaju potrebe, željena izlazna vlažnost praha može obezbediti u oba sistema, pod uslovom da se reše izvesni problemi strujanja u ovim sistemima. Protok vazduha za dosušivanje (kao i potrošnja energije za ovu svrhu) u oba slučaja je manja od 5% u odnosu na primarnu sušnicu.

Izvršena su preliminarna ispitivanja naknadnog hlađenja praha u nekoliko sistema. U svim sistemima za hlađenje je obezbeđena krajnja temperatura praha ispod 45°C od početnih 95°C. Ispitivanja su pokazala da varijante hlađenja praha hladnim svežim vazduhom (u režimu pneumatskog transporta, fluidizacijom, u ciklonskom hladnjaku) nisu pogodne, s obzirom da je potrebno obezbediti dopunsku opremu i da se povećava sadržaj rezidualne vlage ohlađenog praha. Pužni transporter sa duplikatorom kroz koji struji hladna voda se pokazao kao najpogodniji sistem hlađenja praha s obzirom da je eliminisana mogućnost naknadnog povećanja rezidualne vlažnosti produkta.

./.

Istraživanja sušenja suspenzija koja su izvršena u okviru ovog rada su u potpunoj saglasnosti sa najnovijim svetskim trendovima, s obzirom da je poslednjih godina uočen znatan porast naučnih istraživanja posvećen sušenju materijala u pokretnim slojevima.

Na osnovu eksperimentalnih merenja, poređenja sa matematičkim modelima opisa pojava i upoređivanjem uslova sušenja zaključuje se da je sušenje suspenzija na inertnim česticama jednostavna i vrlo efikasna tehnika za sve materijale koji se neće slepiti za inertne čestice i na taj način izazvati sinterovanje sloja. Ovaj koncept sušenja, nezavisno od toga da li je korišćeno fluidizovanje ili fontanovanje inertnih čestica, ima sledeće bitne prednosti u odnosu na druge postupke sušenja:

- 1) veći kapacitet po jedinici zapremine uređaja,
- 2) manji utrošak energije i
- 3) manju specifičnu potrošnju vazduha.

U odnosu na sušenje u fontanskom sloju inertnih čestica i cevnom umetkom, sušenje u fluidizovanom sloju inertnih čestica je generalno efikasniji proces. Pored toga, prednosti sistema sa fluidizovanim slojem inertnih čestica su i manja količina inertnih čestica, manji pad pritiska, jednostavnija regulacija procesa i znatno jednostavnije uvećanje razmera procesa.

Prednost sušenja na inertnim česticama u fontanskom sloju sa cevnom umetkom je vrlo kratko vreme boravka sušenog materijala u zoni sušenja i praktično idealno klipno strujanje sušenog materijala kroz cevni umetak. U ovom postupku sušenja u vertikalnom dvofaznom toku vazduh-inertne čestice kroz cevni umetak moguće je sušiti i neke materijale koji sadrže organske i biološke komponente. To predstavlja osnovnu prednost u odnosu na sušnicu sa fluidizovanim slojem inertnih čestica. Razlog tome leži u drugačije formiranom temperaturnom polju agensa za sušenje, a time i manjem riziku od slepljivanja sloja. Sušenje termoosetljivih i/ili lepljivih materijala u fontanskom sloju inertnih čestica sa cevnom umetkom je izvodljivije u odnosu na fluidizovani sloj usled kraćeg vremena zadržavanja sušenog materijala u zoni sušenja i intenzivnijeg sudara inertnih čestica sa deflektorom što poboljšava otiranje suvog praha.

Fontanski sloj inertnih čestica sa cevnom umetkom je dobra alternativa sprej sušnici za materijale koji imaju adhezivne karakteristike. Ustanovljeno je da je sušenje suspenzija sa adhezivnim karakteristikama izvodljivo u fontanskom sloju sa cevnom umetkom ako je protok suspenzije takav da se obezbedi formiranje vrlo tankog filma na površini inertnih čestica. U tom slučaju otpor unutrašnjoj difuziji je zanemarljiv i sušenje se odvija u režimu "kvazi-konstantne" brzine sušenja.

Najveća teškoća koja se može javiti u procesu sušenja na inertnim česticama u ovim postupcima formiranja fluidizovanog ili fontanovanog sloja inertnih čestica (nosača filma suspenzije) je sinterovanje sloja. Svaka nova primena za sušenje različitih suspenzija zahteva proveru uspešnosti rada na laboratorijskom nivou u dužem vremenskom periodu kako sa

aspekta utvrđivanja optimalnih parametara procesa tako i sa aspekta bezbednosti izvođenja procesa.

U oba ispitivana sistema sušenja na inernim česticama pretpostavljeno je da se termičko sušenje odvija u periodu kvazi-konstantne brzine sušenja, odnosno da su dominantni otpori difuziji vlage i prenosu toplote kroz film suspenzije. Za ovaj period konstantne brzine sušenja karakteristično je da se toplota koristi samo za isparavanje slobodne, površinske ili slabo vezane vlage (period zagrevanja vlažnog materijala je kratak i zanemaruje se, pošto je film suspenzije izuzetno tanak).

Na osnovu eksperimentalnih merenja i proračuna parametara sušenja prema predloženim modelima ustanovljeno je da je temperatura materijala tokom sušenja između temperature adijabatskog zasićenja vazduha (T_{wb}) i temperature izlaznog vazduha (T_{ge}). Ovi rezultati ukazuju na to da nije celokupna površina inertnih čestica u sloju prekrivena filmom suspenzije, tako da se sušenje, pored konvektivnog odvija delimično i konduktivnim mehanizmom.

./.

Rezultatima iz ovog rada daje se naučni doprinos teoriji fenomena prenosa pri izvođenju sušenja u pokretnim sistemima gas-čvrste čestice.

Razvijeni su matematički modeli za predviđanje karakteristika pomenuta dva sistema sušenja koji omogućavaju prenos rezultata u praksu i uvećanje razmera procesa.

Postignuti rezultati predstavljaju doprinos u tehničkoj praksi za razvoj efikasnijih, ekonomičnijih, sigurnijih i ekološki prihvatljivijih tehnologija i postrojenja znatno manjih dimenzija u odnosu na one sisteme koji su trenutno u primeni u domaćoj industriji. Time bi se smanjila investiciona ulaganja i postupak učinio znatno efikasnijim i ekonomičnijim.

LITERATURA

- Arsenijević Z.Lj., Grbavčić Ž.B., Garić-Grulović R.V., “*Drying of Suspensions in the Spouted Bed with Draft Tube*”, Can. J. Chem. Eng., **82**(3), 450-464 (2004).
- Ashizawa N., Masters K., “*Integrated Fluid Bed Spray Dryers - A New Design Concept*”, Proceedings of the 4th Int. Drying Symp. (IDS’84), Drying’84, Kyoto, Japan (1984).
- AVP Dryer Handbook, Invesys AVP, Technical Centre, New York, USA, www.avp.invesys.com.
- Bai D., Issangya A.S., Grace J.R., “*A Novel Method for Determination of Choking Velocities*”, Powder Technol., **97**, 59-62 (1998).
- Barret N., Fane A., “*Drying of Liquid Material in Spouted Bed*”, Proceedings of the 6th Int. Drying Symp. (IDS’88), Drying’88, Versailles, Paris, France (1988).
- Becher R.D., Schlunder E.U., “*Fluidized Bed Granulation—The Importance of a Drying Zone for the Particle Growth Mechanism*”, Chem. Eng. Process., **37**, 1-6 (1998).
- Benali M., Amazouz M., “*Advanced Processing Technologies for Slurries: Preforming / Drying / Post-Treatment*”, <http://cedrl.mets.nrcan.gc.ca/eng/publication/r2002-015e.html>, CETC Number 2002-015 (OP-J)/01-15-2002 (2002).
- Benali M., Amazouz M., “*Effects of Drying-Aid Agents on Processing of Sticky Materials*”, Dev. Chem. Eng. Mineral Process, **10**(3-4), 1-14 (2002).
- Benali M., Amazouz M., “*Drying of Vegetable Starch Solutions on Inert Particles: Quality and Energy Aspects*”, J. Food Eng., od 10.05.2005 na <http://www.sciencedirect.com/>, u štampi (2005).
- Berruti F., Muir J.R., Behie L.E., “*Solids Circulation in a Spout-Fluid Bed with Draft Tube*”, Can. J. Chem. Eng., **66**, 919-923 (1988).
- Bi H.T., Fan L.S., “*Regime transitions in gas-solid circulating fluidized beds*”, AIChE Annual Meeting, Los Angeles, 17-22 November (1991).
- Bi H.T., Grace J.R., Zhu J.X., “*On Types of Choking in Pneumatic Systems*”, Int. J. Multiphas. Flow, **19**, 1077-1092 (1993).
- Bi H.T., Grace J.R., “*Flow Regime Diagrams for Gas-Solids Fluidization and Upward Transport*”, Int. J. Multiphas. Flow, **21**, 1229-1236 (1995).
- Bi H.T., Grace J.R., “*Flow Patterns in High-Velocity Fluidized Beds and Pneumatic Conveying*”, Can. J. Chem. Eng., **77**, 223-230 (1999).
- Bird R.B., Stewart W.E., Lightfoot E.N., “*Transport Phenomena*”, J.Wiley, New York (1960).
- Blasco R., Diaz G., Reyes A., “*Pneumatic Suspension Drying*”, Proceedings of the 10th International Drying Symposium (IDS’96), Drying’96, Krakow, Poland, **A**, 427-434 (1996).
- Boizan M.A., Chan P.S., Lim C.J., Brereton C.M.H., Epstein N., “*Metal-Oxide Sludge Drying in a Spouted Bed*”, Proceedings of the 10th Int. Drying Symp. (IDS’96), Drying’96, Krakow, Poland, **A**, 435-440 (1996).
- Brereton C., Lim C.J., “*Spouted Bed Drying of Sludge From Metals Finishing Industries Wastewater Treatment Plants*”, Drying Technol., **11**(2), 389-399 (1993).
- Bridgwater J., “*Spouted Beds*”, chapter 6 in *Fluidization 2nd Edition* (Davidson J.F., Clift R., Harrison H., Eds.), Academic press, London, 201-224 (1985).

- Briens C.L., Bergougnou M.A., "New Model to Calculate the Choking Velocity of Monosize and Multisize Solids in Vertical Pneumatic Transport Lines", *Can. J. Chem. Eng.*, **64**, 196-204 (1986).
- Capes C.E., Nakamura K., "Vertical Pneumatic Conveying: An Experimental Study with Particles in the Intermediate and Turbulent Flow Regimes", *Can. J. Chem. Eng.*, **51**, 31-38 (1973).
- Cecen E.A., "Annulus Leakage and Distribution of the Fluid Flow in a Liquid Spout-Fluid Bed with a Draft Tube", *Chem. Eng. Sci.*, **58**, 4739-4745 (2003).
- Chauk S.S., Fan L.S., "Heat Transfer in Packed and Fluidized Beds", chapter 13 in *Handbook of Heat Transfer 3rd Edition* (Rohsenow W.M., Hartnett J.P., Cho Y.I., Eds.), McGraw Hill (1998).
- Chen Z., Yang T., Wu W., Agarwal P.K., "Continuous Drying and Dehydration of Sodium Carbonate Monohydrate in a Fluidized Bed", *Powder Technol.*, **103**, 274-285 (1999).
- Choi J.H., Kim T.W., Moon Y.S., Kim S.D., Son J.E., "Effect of Temperature on Slug Properties in a Gas Fluidized Bed", *Powder Technol.*, **131**, 15-22 (2003).
- Chong Y.O., Leung L.S., "Comparison of Choking Velocity Correlations in Vertical Pneumatic Conveying", *Powder Technol.*, **47**, 43-50 (1986).
- Claflin J.K., "The Effect of Solid Flow on Fluid Distribution in a Spouted Bed Fitted with a Draft Tube", *Proceedings of 10th Australian Conf. on Chem. Eng.*, Sydney, Australia (1982).
- Claflin J.K., Fane A.G., "Spouting with a Porous Draft-Tube", *Can. J. Chem. Eng.*, **61**, 356-363 (1983).
- Claflin J.K., Fane A.G., "Gas Distribution and Heat Transfer in a Draft-Tube Spouted Bed", *AIChE Symp.*, **80**, 17-23 (1984).
- Clift R., Grace J.R., Weber M.E., "Bubbles, Drop and Particles", Academic Press, New York (1978).
- Coltters R., Rivas A.L., "Minimum Fluidation Velocity Correlations in Particulate Systems", *Powder Technol.*, **147**, 34-48 (2004).
- Correa N.A., Correa R.G., Freire J.T., "Self-Tuning Control of Egg Drying in Spouted Bed Using the GPC Algorithm", *Drying Technol.*, **20**(4-5), 813-828 (2002).
- Correa N.A., Freire F.B., Correa R.G., Freire J.T., "Industrial Trials of Paste Drying in Spouted Beds under QDMC", *Drying Technol.*, **22**(5), 1087-1105 (2004).
- Costa I.A., Ferreira M.C., Freire J.T., "Analysis of Regime Transitions and Flow Instabilities in Vertical Conveying of Coarse Particles using Different Solids Feeding Systems", *Can. J. Chem. Eng.*, **82**, 48-59 (2004).
- Daleffe R.V., Freire J. T., "Analysis of the Fluid-Dynamic Behavior of Fluidized and Vibrofluidized Bed Containing Glycerol", *Braz. J. Chem. Eng.*, **21**(01), 35-46 (2004).
- Day J.Y., Littman H., Morgan M.H.III, "A New Choking Velocity Correlation for Vertical Pneumatic Conveying", *Chem. Eng. Sci.*, **45**, 355-360 (1990).
- Dewettinck K., Huyghebaert A., "Fluidized Bed Coating in Food Technology", *Trends Food Sci. Tech.*, **10**, 163-168 (1999).
- Duarte C.R., Neto J.L.V., Lisboa M.H., Santana R.C., Barrozo M.A.S., Murata V.V., "Experimental Study and Simulation of Mass Distribution of the Covering Layer of Soybean Seeds Coated in a Spouted Bed", *Braz. J. Chem. Eng.*, **21**(01), 59-67 (2004).
- Đorđević B., Valent V., Šerbanović S., "Termodinamika sa termotehnikom", Tehnološko metalurški fakultet, Beograd (1997).

- Eckert E.R.G., Drake R.M.Jr., "*Analysis of Heat and Mass Transfer*", McGraw Hill, New York (1972).
- Edwards M.F., Instone T., "*Particulate Products-Their Manufacture and Use*", Powder Technol., **119**, 9-13 (2001).
- Eng J.H., Svrcek W.Y., Behie L.A., "*Dynamic Modeling of Spouted Bed Reactor with a Draft Tube*", Ind. Eng. Chem. Res., **28**(12), 1778-1785 (1989).
- Epstein N., Grace J.R., "*Spouting of Particulate Solids*", in *Handbook of Powder Science and Technology* (Fayed M.E., Otten L., Eds.), Van Nostrand Reinhold Co., New York, 507-536 (1984).
- Ergun S., "*Fluid Flow through Packed Columns*", Chem. Eng. Prog., **48**, 89-94 (1952).
- Freitas L.A.P., Freire J.T., "*Gas-to-Particle Heat Transfer in the Draft Tube of a Spouted Bed*", Drying Technol., **19**(6), 1065-1082 (2001).
- Freitas L.A.P., Freire J.T., "*Heat Transfer in a Draft Tube Spouted Bed with Bottom Solids Feed*", Powder Technol., **114**, 152-162 (2001 b).
- Freitas L.A.P., Freire J.T., "*Sensitivity Analysis on the Fluid Dynamics of a Draft Tube Spouted Bed with Bottom Particles Feed*", Drying Technol., **20**(6), 1161-1175 (2002).
- Garić R.V., Grbavčić Ž.B., Jovanović S.Đ., "*Hydrodynamic Modeling of Vertical Non-Accelerating Gas-Solids Flow*", Powder Technol., **84**, 65-74 (1995).
- Geldart D., "*Types of Gas Fluidization*", Powder Technol., **7**, 285-292 (1973).
- Grbavčić Ž.B., Vuković D.V., Hadžismajlović Dž.E., Garić R.V., Littman H., "*Fluid Mechanical Behaviour of a Spouted Bed with a Draft Tube and External Annular Flow*", Proceedings of 2nd Int. Symp. on Spouted Beds, Vancouver, Canada, **1** (1982).
- Grbavčić Ž.B., "*Ispitivanje mehanike fontanskog sloja niskog pada pritiska sa kontrolisanim kretanjem čestica*", Doktorska disertacija, Univerzitet u Beogradu (1989).
- Grbavčić Ž.B., Vuković D.V., Garić R.V., Hadžismajlović Dž.E., Jovanović S.Đ., Littman H., Morgan H., "*A Variational Model for Prediction Fluid-Particle Interphase Drag Coefficient and Particulate Expansion of Fluidized and Sedimenting Beds*", Powder Technol., **68**, 199-211 (1991).
- Grbavčić Ž.B., Vuković D.V., Jovanović S.Đ., Garić R.V., Hadžismajlović Dž.E., Littman H., Morgan H., "*Fluid Flow Pattern and Solids Circulation Rate in a Liquid Phase Spout-Fluid Bed with Draft Tube*", Can. J. Chem. Eng., **70**, 895-904 (1992).
- Grbavčić Ž.B., Garić R.V., Vuković D.V., Hadžismajlović Dž.E., Littman H., Morgan M.H.III, Jovanović S.Đ., "*Hydrodynamic Modeling of Vertical Liquid-Solids Flow*", Powder Technol., **72**, 183-191, (1992).
- Grbavčić Ž.B., Garić R.V., Jovanović S.Đ., Rožić Lj.S., "*Hydrodynamic Modeling of Vertical Accelerating Gas-Solids Flow*", Powder Technol., **92**, 155-161 (1997).
- Grbavčić Ž.B., Arsenijević Z.Lj., Zdanski F.K., "*Drying of Suspensions in Fluidized Bed of Inert Particles*", Proceedings of the 11th Int. Drying Symp. (IDS'98), Drying'98, Thessaloniki, Greece, **C**, 2090-2097 (1998).
- Grbavčić Ž.B., Arsenijević Z.Lj., Garić-Grulović R.V., "*Drying of Slurries in Fluidized Bed of Inert Particles*", Drying Technol., **22**(8), 1793-1812 (2004).
- Gunn D.J., "*Transfer of Heat and Mass to Particles and Gas in Non-Uniformly Aggregated Fluidized Bed*", Int. J. Heat Mass Tran., **21**, 467-492 (1978).

- Hadžismajlović Dž.E., Grbavčić Ž.B., Vuković D.V., Littman H., “*The Mechanics of Spout-Fluid Beds at the Minimum Spout-Fluid Flowrate*”, Proceedings of 2nd Int. Symp. on Spouted Beds, Vancouver, Canada, **1**, 117-131 (1982).
- Hadžismajlović Dž.E., Povrenović D.S., Grbavčić Ž.B., Vuković D.V., Littman H.A., “*Spout-Fluid Bed Drier for Dilute Solutions Containing Solids*”, in *Fluidization VI* (Grace J.R., Shemilt L.W., Bergougnou M.A., Eds.), Engineering Foundation, New York, 277-283 (1989).
- Hatamipour M. S., Mowla D., “*Shrinkage of Carrots During Drying in an Inert Medium Fluidized Bed*”, J. Food Eng., **55**(3), 247-252 (2002).
- Hatamipour M.S., Mowla D., “*Experimental and Theoretical Investigation of Drying Carrots in a Fluidized Bed with Energy Carrier*”, Drying Technol., **21**(1), 83-101 (2003 a).
- Hatamipour M.S., Mowla D., “*Correlations for Shrinkage, Density and Diffusivity for Drying of Maize and Green Peas in a Fluidized Bed with Energy Carrier*”, J. Food Eng., **59**, 221-227 (2003 b).
- He Y.L., Lim C.J., Grace J.R., “*Spouted Bed and Spout-Fluid Bed Behaviour in a Column of Diameter 0.91 m*”, Can. J. Chem. Eng., **70**, 848-857 (1992).
- Heinrich S., Blumschein J., Henneberg M., Ihlow M., Peglow M., Morl L., “*Study of Dynamic Multi-Dimensional Temperature and Concentration Distributions in Liquid-Sprayed Fluidized Beds*”, Chem. Eng. Sci., **58**, 5135-5160 (2003).
- Hemati M., Cherif R., Saleh K., Pont V., “*Fluidized Bed Coating And Granulation: Influence of Process-Related Variables and Physicochemical Properties on the Growth Kinetics*”, Powder Technol., **130** (1-3), 18-34 (2003).
- Hilal N., Gunn D.J., “*Solid Hold Up in Gas Fluidised Beds*”, Chem. Eng. Process., **41**, 373-379 (2002).
- Hong S.C., Jo B.R., Doh D.S., Choi C.H., “*Determination of Minimum Fluidization Velocity by the Statistical Analysis of Pressure Fluctuations in a Gas-Solid Fluidized Bed*”, Powder Technol., **60**, 215-221 (1990).
- Ishikura T., Nagashima H., Ide M., “*Hydrodynamics of a Spouted Bed with a Porous Draft Tube Containing a Small Amount of Finer Particles*”, Powder Technol., **131**(1), 56-65 (2003).
- Jenkins S.A., Waszkiewicz S., Quarini G.L., Tierney M.J., “*Drying Saturated Zeolite Pellets to Assess Fluidised Bed Performance*”, App. Therm. Eng., **22**, 861-871 (2002).
- Kerkhof P.J.A.M., “*Some Modeling Aspects of (Batch) Fluid-Bed Drying of Life-Science Products*”, Chem. Eng. Process., **39**, 69-80 (2000).
- Khan A.R., Richardson J.F., “*The Resistance to Motion of a Solid Sphere in a Fluid*”, Chem. Eng. Commun., **62**, 135-150 (1987).
- Khan A.R., Richardson J.F., “*Fluid-Particle Interactions and Flow Characteristics of Fluidized Beds and Settling Suspensions of Spherical Particles*”, Chem. Eng. Commun., **78**, 111-130 (1989).
- Kimoto N., Kutsuzawa Z., Ashihara M., “*Coated Granular Pesticide Method for Producing the Same and Applications Thereof*”, United States Patent 6,036,971, March 14 (2000).
- Kiranoudis C.T., Maroulis Z.B., Marinou-Kouris D., “*Drying of Solids-Selection of Some Continuous Operation Dryer Types*”, Comput. Chem. Eng., **20**, S177-S182 (1996).
- Knowlton T.M., Bachovchin D.M., “*The Determination of Gas-Solids Pressure Drop and Choking Velocity as a Function of Gas Density in a Vertical Pneumatic Conveying Line*”, in *Fluidization Technology* (Kearns D. L., Ed.), Hemisphere Publishing Corp., Washington D.C., 253-282 (1976).

- Kraslawski A., Kudra T., "Case-Based Reasoning for Design of Drying Equipment", *Drying Technol.*, **19**(5), 767-783 (2001).
- Krzywanski R.S., Epstein N., Bowen B.D., "Multi-Dimensional Model of a Spouted Bed", *Can. J. Chem. Eng.*, **70**, 858-872 (1992)
- Kudra T., Pallai E., Bartczak Z., Peter M., "Drying of Paste-Like Materials in Screw-Type Spouted-Bed and Spin-Flash Dryers", *Drying Technol.*, **7**(3), 583-597 (1989).
- Kudra T., Mujumdar A.S., "Special Drying Technologies and Novel Dryers", in *Handbook of Industrial Drying 2nd Edition* (Mujumdar A.S., Ed.), Marcel Dekker, Inc., New York, 1087-1149 (1995).
- Kudra T., "Instantaneous Dryer Indices for Energy Performance Analysis", *Inzynieria Chemiczna i Procesowa (Inz. Chem. Procesowa)*, **19**(1), 163-172 (1998).
- Kudra T., Mujumdar A.S., "Advanced Drying Technologies", Marcel Dekker, New York (2002).
- Kunii D., Levenspiel O., "Fluidization Engineering", J.Wiley, New York (1969).
- Kutsakova V.E., Utkin Yu.V., "Kinetics of Drying of Protein Pastes, Suspensions, Emulsions and Solutions in a Fluidized Bed of Inert Substances", Translated from *Zhurnal Prikladnoi Khimii (J. Appl. Chem-USSR+)*, **60**(5), 1143-1147 (1987).
- Larachi F., Grandjean B.P.A., Chaouki J., "Mixing and Circulation of Solids in Spouted Beds-Particle Tracking and Monte Carlo Emulation of The Gross Flow Pattern", *Chem. Eng. Sci.*, **58**, 1497-1507 (2003).
- Lee D.H., Kim S.D., "Drying Characteristics of Starch in an Inert Medium Fluidized Bed", *Chem. Eng. Technol.*, **16**, 263-269 (1993).
- Lee D.H., Kim S.D., "Mathematical Model for Batch Drying in an Inert Medium Fluidized Bed", *Chem. Eng. Technol.*, **22**, 443-450 (1999).
- Lefroy G.A., Davidson J.F., "The Mechanics of Spouted Beds", *Trans. Inst. Chem. Eng.*, **47**, T120-T128 (1969).
- Leontieva A.I., Bryankin K.V., Konovalov V.I., Utrobin N.P., "Heat and Mass Transfer during Drying of a Liquid Film from the Surface of a Single Inert Particle", *Drying Technol.*, **20**(4-5), 729-747 (2002).
- Leung L.S., Wiles R.J., Nicklin D.J., "Correlation for Predicting Choking Flowrates in Vertical Pneumatic Conveying", *Ind. Eng. Chem. Proc. D. D.*, **10**, 183-189 (1971).
- Leung L.S., "The Ups and Down of Gas-Solids Flow-A Review", in *Fluidization* (J.R.Grace and J.M.Matsen, Eds.), Plenum Press, New York, 25-68 (1980 a).
- Leung L.S., "Vertical Pneumatic Conveying: A Flow Regime Diagram and a Review of Choking versus Non-Choking Systems", *Powder Technol.*, **25**, 185-190 (1980 b).
- Li J., Kuipers J.A.M., "Gas-Particle Interactions in Dense Gas-Fluidized Beds", *Chem. Eng. Sci.*, **58**, 711-718 (2003).
- Link K.C., Schlünder E.U., "Fluidized Bed Spray Granulation and Film Coating-A new Method for the Investigation of the Coating Process on a Single Sphere", *Proceedings of the 10th Int. Drying Symp. (IDS'96)*, Drying'96, Krakow, Poland, **A**, 470-480 (1996).
- Littman H., Morgan M.H.III, Paccione J.D., Jovanović S.Đ., Grbavčić Ž.B., "Modeling and Measurement of the Effective Drag Coefficient in Decelerating and Non-Accelerating Turbulent Gas-Solids Dilute Phase Flow of Large Particles in a Vertical Transport Pipe", *Powder Technol.*, **77**, 267-283 (1993).

- Littman H., Day J.Y., Morgan M.H.III, "A Model for the Evaporation of Water from Large Glass Particles in Pneumatic Transport", *Can. J. Chem. Eng.*, **78**, 124-131 (2000).
- Lykov A.V., "Theory of Heat Conduction", Academy in Moscow, Moscow, in Russian (1967).
- Markowski A.S., "Drying Characteristics in a Jet-Spouted Bed Dryer", *Can. J. Chem. Eng.*, **70**, 938-944 (1992).
- Masters K., "Spray Drying Handbook", Halsted Press, New York (1985).
- Mathur K.B., Gishhler P.E., "A Technique for Contacting Gases with Coarse Solid Particles", *AIChE J.*, **1**, 157-164 (1955).
- Mathur K.B., Epstein N., "Developments in Spouted Bed Technology", *Can. J. Chem. Eng.*, **52**, 129-143 (1974).
- Mink W.H., "Critical Velocity in Solids Transport", in *Particulate Systems: Technology and Fundamentals* (Beddow J. K., Ed.), Hemisphere Publishing Corp., Washington D.C., 157-171 (1983).
- Mok S.L.K., Molodtsov Y., Large J.F., Bergougnou M.A., "Characterization of Dilute and Dense Phase Vertical Upflow Gas-Solid Transport based on Average Concentration and Velocity Data", *Can. J. Chem. Eng.*, **67**, 10-16 (1989).
- Mujumdar A.S., "Spouted Bed Technology-A Brief Review", Proceedings of the 4th Int. Drying Symp. (IDS'84), Drying'84, Kyoto, Japan, 151-157 (1984).
- Mujumdar A.S., (Ed.) "Handbook of Industrial Drying", Marcel Dekker, New York (1984).
- Mujumdar A.S., "Developments And Trends In Drying Of Solids", 9th Int. Cong. of Chemical Engineering, Chemical Equipment, Design and Automation - CHISA'87, Praha, Czechoslovakia, F6.1 [286] (1987).
- Mujumdar A.S., "Drying Technologies of the Future", 10th Int. Cong. of Chemical Engineering, Chemical Equipment Design and Automation - CHISA'90, Praha, Czechoslovakia, P1.3 (1990).
- Mujumdar A.S., (Ed.) "Handbook of Industrial Drying", Marcel Dekker, New York (1995).
- Mujumdar A.S., "Classification and Selection of Industrial Dryers", chapter 2 in S. Devahastin (Ed.) Mujumdar's Practical Guide to Industrial Drying, Exergex, Montreal (2000).
- Mujumdar A., "Research and Development in Drying: Recent Trends and Future Prospects", *Drying Technol.*, **22** (1-2), 1-26 (2004).
- Nakamura K., Capes C.E., "Vertical Pneumatic Conveying: A Theoretical Study of Uniform and Annular Flow Models", *Can. J. Chem. Eng.*, **51**, 39-46 (1973).
- Ochoa Martinez L.A., Brennan J.G., Niranjana K., "Drying of Liquid in a Spouted Bed of Inert Particle: Heat Transfer Studies", *J. Food Eng.*, **20**, 135-148 (1993).
- Oliveira W.P., Freire J.T., "Analysis of Evaporation Rate in the Spouted Bed Zones During Drying of Liquid Materials using a Three Region Model", Proceedings of the 10th Int. Drying Symp. (IDS'96), Drying'96, Krakow, Poland, **A**, 504-512 (1996).
- Oliveira I.M., Passos M.L., "Simulation of Drying Suspension in a Conical Spouted Bed", *Drying Technol.*, **15**(2), 593-604 (1997).
- Osorio-Revilla G., Elias-Serrano R., Gallardo-Velazques T., "Drying of Liquid Feedstocks in a Spout-Fluid-Bed with Draft Tube Submerged in Inert Solids: Hydrodynamics and Drying Performance", *Can. J. Chem. Eng.*, **82**, 142-147 (2004).

- Ozmen L., Langrish T.A.G., “*A Study of The Limitations to Spray Dryer Outlet Performance*”, *Drying Technol.*, **21**(5), 895-917 (2003).
- Pallai E., Szentmarjay T., Szijjarto E., “*Effect of Partial Processes of Drying on Inert Particles on Product Quality*”, *Drying Technol.*, **19**(8), 2019-2032 (2001).
- Pan Y.K., Li J.G., Zhao L.J., Ye W.H., Mujumdar A.S., Kudra T., “*Performance Characteristics of the Vibrated Fluid Bed of Inert Particles for Drying of Liquid Feeds*”, *Drying Technol.*, **19**(8), 2003-2018 (2001).
- Passos M.L., Massarani G., Freire J.T., Mujumdar A.S., “*Drying of Pastes in Spouted Beds of Inert Particles: Design Criteria and Modeling*”, *Drying Technol.*, **15**(2), 605-624 (1997).
- Passos M.L., Mujumdar A.S., “*Effect of Cohesive Forces on Fluidized and Spouted Beds of Wet Particles*”, *Powder Technol.*, **110**, 222-238 (2000).
- Passos M.L., Trindade A.L.G., d'Angelo J.V.H., Cardoso M., “*Drying of Black Liquor in Spouted Bed of Inert Particles*”, *Drying Technol.*, **22**(5), 1041-1067 (2004).
- Paterson W.R., Crawshaw J.P., Hart G., Parker S.R., Scott D.M., Young J.P., “*Pressure Drop in Countercurrent Gas Flow through Moving Particulate Beds*”, *Trans. Inst. Chem. Eng.*, **70**(A), 252-254 (1992).
- Perry's Chemical Engineer's Handbook 6th Edition, McGraw Hill, Singapore (1984).
- Pham Q.T., “*Behavior of a Conical Spouted-Bed Dryer for Animal Blood*”, *Can. J. Chem. Eng.*, **61**, 426-434 (1983).
- Povrenović D., Grbavčić Ž., Hadžismajlović Dž., Vuković D., Littman H., “*Fluid-Mechanical and Thermal Characteristics of Spout-Fluid Bed Drier with Draft Tube*”, *Drying'91*, Elsevier, Amsterdam, CA 117, 343-351 (1992).
- Povrenović D.S., “*Application of Spout-Fluid Bed Drier in Industrial Production*”, *Proceedings of the 11th Int. Drying Symp. (IDS'98)*, *Drying'98*, Thessaloniki, Greece, **C**, 2065-2071 (1998).
- Povrenović D.S., “*Drying of High Nutritive Materials in the Spout-Fluid Bed with the Draft Tube*”, *Proceedings of the 4th Int. Sym. for South-East European Countries (SEEC) on Fluidized Beds in Energy Production, Chemical and Process Engineering and Ecology*, Thessaloniki, Greece, 59-64 (2003).
- Punwani D.V., Modi V.M., Tarman P.B., “*A Generalized Correlation for Estimating Choking Velocity in Vertical Solids Transport*”, *Proceedings of Int. Powder and Bulk Solids Handling and Processing Conference*, Powder Advisory Center, Chicago, I11 (1976).
- Qimin G., Hikida S., Takahashi, Y., Nakagawa N., Kato K., “*Drying of Microparticle Slurry and Salt-Water Solution by a Powder-Particle Spouted Bed*”, *J. Chem. Eng. Jpn.*, **29**(1), 152-158 (1996).
- Rambali B., Baert L., Massart D. L., “*Scaling Up of the Fluidized Bed Granulation Process*”, *Int. J. Pharm.*, **252**(1-2), 197-206 (2003).
- Ranz W.E., “*Friction and Transfer Coefficients for Single Particles and Packed Beds*”, *Chem. Eng. Prog.*, **48**, 247-253 (1952).
- Re M.I., Freire J.T., “*Drying of Pastelike Materials in Spouted Beds*”, *Proceedings of the 6th Int. Drying Symp. (IDS'88)*, *Drying'88*, Versailles, Paris, France, OP119-OP125 (1988).
- Reger E.O., Romankov P.G., Rashkovskaya N.B., “*Drying of Paste-like Materials in Spouted Beds with Inert Bodies*”, *Zhurnal Prikladnoi Khimii (J. Appl. Chem-USSR+)*, **40** (10), 2276, in Russian (1967).

- Reyes A., Diaz G., Blasco R., "Experimental Study of Slurries Drying on Inert Particles in Spouted Bed and Fluidized Bed Dryers", Proceedings of the 10th Int. Drying Symp. (IDS'96), Drying'96, Krakow, Poland, **A**, 605-612 (1996).
- Reyes A., Diaz G., Blasco R., "Slurry Drying in Gas-Particle Contactors-Fluid-Dynamics and Capacity Analysis", Drying Technol., **16**(1-2), 217-233 (1998).
- Reyes A., Vidal I., "Experimental Analysis of a Mechanically Stirred Spouted Bed Dryer", Drying Technol., **18**(1-2), 341-359 (2000).
- Reyes A., Diaz G., Marquardt F.H., "Analysis of Mechanically Agitated Fluid-Particle Contact Dryers", Drying Technol., **19**(9), 2235-2259 (2001).
- Romankov P.N., "Drying", in *Fluidization* (J.F. Davidson; D. Harrison, Eds.); Academic Press, London, 569-598 (1971).
- Rovero G., Brereton C.M.H., Epstein N., Grace J.R., Casalegno L., Piccinini N., "Gas Flow Distribution in Conical-Base Spouted Beds", Can. J. Chem. Eng., **61**, 289-296 (1983).
- Rowe P.G., "Experimental Properties of Bubbles", in *Fluidization* (J.F. Davidson; D. Harrison, Eds.); Academic Press, London, 121-191 (1971).
- Sankar S.R., Smith T.N., "Slip Velocities in Pneumatic Transport-Part II", Powder Technol., **47**, 179-194 (1986).
- Satija S., Young J.B., Fan L.S., "Pressure Fluctuations and Choking Criteria for Vertical Pneumatic Conveying of Fine Particles", Powder Technol., **43**, 257-271 (1985).
- Schneider T., Bridgwater J., "Drying of Solutions and Suspensions in Spouted Beds", Proceedings of the 6th Int. Drying Symp. (IDS'88), Drying'88, Versailles, Paris, France, OP113-OP117 (1988).
- Schneider T., Bridgwater J., "The Stability of Wet Spouted Beds", Drying Technol., **11**(2), 277-302 (1993).
- Shaw F.V., "Fresh Options in Drying", Chem. Eng., 76-84 (1994).
- SigmaScan, Image Analysis Software, Jandel Scientific, USA (1993).
- Smith T.N., "Limiting Volume Fractions in Vertical Pneumatic Transport", Chem. Eng. Sci., **33**, 745-749 (1978).
- Soponronnarit S., Wetchacama S., Trutassanawin S., Jariyatontivait W., "Design, Testing and Optimization of Vibro-Fluidized Bed Paddy Dryer", Drying Technol., **19**(8), 1891-1908 (2001).
- Spitzner-Neto P.I., Freire J.T., "Analysis of The Effect of Paste on the Behavior of a Spouted Bed with Inerts", Proceedings of the 11th Int. Drying Symp. (IDS'98), Drying'98, Thessaloniki, Greece, **C**, 1936-1943 (1998 a).
- Spitzner-Neto P.I., Freire J.T., "Evaluation of Models on the Drying of Pastes in Spouted Beds with Inerts", Proceedings of the 11th Int. Drying Symp. (IDS'98), Drying'98, Thessaloniki, Greece, **C**, 2009-2016 (1998 b).
- Spitzner-Neto P.I., Cunha F.O. Freire J.T., "Effect of the Presence of Paste in a Conical Spouted Bed Dryer with Continuous Feeding", Drying Technol., **20**(4-5), 789-811 (2002).
- Szentmarjay T., Pallai E., "Drying of Suspensions in a Modified Spouted Bed Drier with an Inert Packing", Drying Technol., **7**(3), 523-536 (1989).
- Szentmarjay T., Szalay A., Pallai E., Bencze T., Vass J., "Control of Drying Process in Mechanically Spouted Bed Dryer", Drying Technol., **14**(3-4), 501-512 (1996 a).

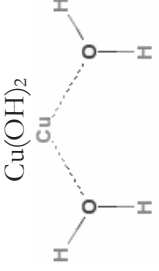
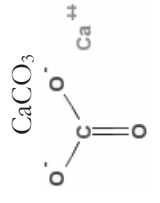
- Szentmarjay T., Pallai E., Regényi Zs., “*Short-Time Drying of Heat-Sensitive, Biologically Active Pulps and Pastes*”, *Drying Technol.*, **14**(9), 2091-2115 (1996 b).
- Szentmarjay T., Pallai E., “*Drying Experiments with A AlO(OH) Suspension of High Purity and Fine Particulate Size to Design an Industrial Scale Dryer*”, *Drying Technol.*, **18**(3), 759-776 (2000).
- Taruna I., Jindal V.K., “*Drying of Soy Pulp (Okara) in a Bed of Inert Particles*”, *Drying Technol.*, **20**(4-5), 1035-1051 (2002).
- Thorley B., Saunby J.B., Mathur K.B., Osberg B.L., “*An Analysis of Air and Solids Flow in a Spouted Bed*”, *Can. J. Chem. Eng.*, **37**, 184-192 (1959).
- Tia S., Tangsatitkulchai C., Dumronglaohapun P., “*Continuous Drying of Slurry in a Jet Spouted Bed*”, *Drying Technol.*, **13**(8-9), 1825-1840 (1995).
- Topuz A., Gur M., Gul M.Z., “*An Experimental and Numerical Study of Fluidized Bed Drying of Hazelnuts*”, *Appl. Therm. Eng.*, **24**, 1535-1547 (2004).
- Trindade A. L. G., Passos M. L., Costa E. F. Jr. and Biscaia E. C. Jr., “*The Effect of Interparticle Cohesive Forces on the Simulation of Fluid Flow in Spout-Fluid Beds*”, *Braz. J. Chem. Eng.*, **21**(01), 113-125 (2004).
- Trojosky M., Morl L., Wnukowski P., Setterwall F., “*Iterative Calculation of the Wetted Part of the Particle Surface and of the Liquid Concentration Profile in Liquid-Sprayed Gas-Fluidized Beds*”, *Proceedings of 5th Int. Symp. on Agglomeration*, UK, Cross M., Oliver R., (Eds.), *Inst. Chem. Eng.*, Rugby, UK, 553-567 (1989).
- Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry, Unit Operation I, **B**, VCH, Weinheim (1988).
- Valent V., “*Sušenje u procesnoj industriji. VI Sušenje vlažnim vazduhom. Industrijski postupci termičkog sušenja*”, *Hem. Ind.*, **49**(4), 187-195 (1995).
- Valent V., “*Sušenje u procesnoj industriji*”, monografija, Tehnološko metalurški fakultet, Univerzitet u Beogradu (2001).
- Viswanathan K., Lyall M.S., Raychaudhury B.C., “*Spouted Bed Drying of Agricultural Grains*”, *Can. J. Chem. Eng.*, **64**, 223-232 (1986).
- Vuković D.V., “*Dvofazni i trofazni fontanski i fluidizovani slojevi kao novi sistemi višefaznog kontakta*”, Doktorska disertacija, Tehnološko metalurški fakultet, Univerzitet u Beogradu (1983).
- Wiriyampaiwong S., Soponronnarit S., Prachayawrakorn S., “*Soybean Drying by Two-Dimensional Spouted Bed*”, *Drying Technol.*, **21**(9), 1735-1757 (2003).
- Xu G., Nomura K., Gao S., Kato K., “*More Fundamentals of Dilute Suspension Collapse and Choking for Vertical Conveying Systems*”, *AIChE J.*, **47**, 2177-2196 (2001).
- Yang W.C., “*A Mathematical Definition of Choking Phenomena and a Mathematical Model for Predicting Choking Velocity and Choking Voidage*”, *AIChE J.*, **21**, 1013-1015 (1975).
- Yang W.C., “*A Correlation for Solid Friction Factor in Vertical Pneumatic Conveying Lines*”, *AIChE J.*, **24**, 548-551 (1978).
- Yang W.C., “*Criteria for Choking in Vertical Pneumatic Conveying Lines*”, *Powder Technol.*, **35**, 143-150 (1983).
- Yang W.C., Keairns D.L., “*Studies on the Solid Circulation Rate and Gas Bypassing in Spouted Fluid-Bed with a Draft Tube*”, *Can. J. Chem. Eng.*, **61**, 349-355 (1983).
- Yang W.C., “*Choking*” revisited, *Ind. Eng. Chem. Res.*, **43**, 5496-5506 (2004).

-
- Ye B., Lim C.J., Grace J.R., “*Hydrodynamics of Spouted and Spout-Fluidized Beds at High Temperature*”, Can. J. Chem. Eng., **70**, 840-847 (1992).
- Yousfi Y., Gau G., “*Aerodynamique de L'écoulement Vertical de Suspensions Concentrees Gaz-Solides. I – Regimes D'écoulement et Stabilité Aerodynamique*”, Chem. Eng. Sci., **29**, 1939-1946 (1974).
- Zahed A.H., Epstein N., “*Batch and Continuous Spouted Bed Drying of Cereal Grains: The Thermal Equilibrium Model*”, Can. J. Chem. Eng., **70**, 945-953 (1992).
- Zenz F.A., Othmer D.F., “*Fluidization and Fluid-Particle Systems*”, Reinold Publ. Co., New York (1960).
- Zhang Y.F., Yang Y., Arastoopour H., “*Electrostatic Effect on the Flow Behaviour of a Dilute Gas/Cohesive Particle Flow System*”, AIChE J., **42**, 1590-1599 (1996).
- Zhao L., Pan Y., Li J., Chen G., Mujumdar A.S., “*Drying of a Dilute Suspension in a Revolving Flow Fluidized Bed of Inert Particles*”, Drying Technol., **22**(1-2), 363-376 (2004).


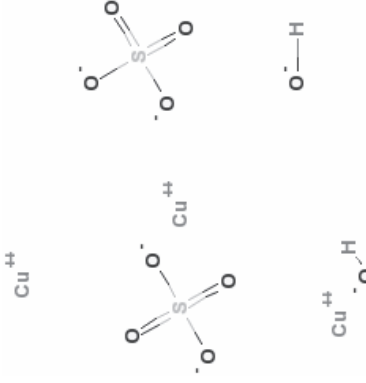




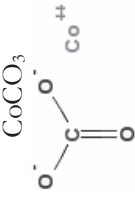
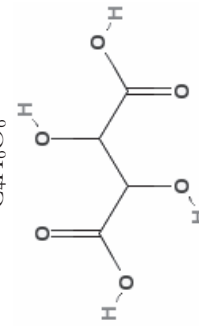
PRILOG 1
Pregled sušenih materijala

Tabela P1.1. Osnovne karakteristike sušenih materijala

Trivijalni naziv	CAS oznaka	IUPAC nomenklatura	Hemijska i strukturna formula	Hemijska klasa	Primena	Rastvorljivost u vodi	Tačka topljenja	Napon pare
CINEB	12122-67-7	čink(II)-etilen-bis-(ditiokarbamat) (polimer)	$C_4H_6N_2S_4Zn$	tiokarbamat	fungicid	praktično nerastvorljiv, 10 mg/l (25°C)	razlaganje pre tačke topljenja	$< 10^{-7}$ mbar (20°C)
BAKAR HIDROKSID ili (BLAUVIT ili KOCIDE)	20427-59-2	bakar(II)-hidroksid		neorganski bakar	fungicid, baktericid	praktično nerastvorljiv	razlaganje pre tačke topljenja	zanemarljiv (25°C)
TALOŽNI KALCIJUM KARBONAT	1317-65-3; 471-34-1	kalcijum(II)-karbonat		neorganski kalcijum	sirovina u proizvodnji, punioc, fungicid, herbicid, ...	praktično nerastvorljiv, 0.001 g/100ml vode (25°C)	razlaganje na 825°C	0 mmHg (25°C)
ZIRAM	137-30-4	čink(II)-bis-(dimetil-ditiokarbamat)	$C_6H_{12}N_2S_4Zn$	tiokarbamat	fungicid	65 mg/l (25°C)	240-250°C	zanemarljiv (25°C)
ELEKTROLITIČKI BAKAR	7440-50-8		Cu	neorganski bakar		nerastvorljiv	1083°C	-

Trivijalni naziv	CAS oznaka	IUPAC nomenklatura	Hemijska i strukturna formula	Hemijska klasa	Primena	Rastvorljivost u vodi	Tačka topljenja	Napon pare
BORDOVSKA ČORBA	8011-63-0	smeša kalcijum(II)-hidroksida i bakar(II)-tetra-okso-sulfata	$\text{CuSO}_4 \cdot 3\text{Cu}(\text{OH})_2 \cdot 3\text{CaSO}_4$	neorganski bakar	fungicid	praktično nerastvorljiv	-	-
TTRAM ili TMTD	137-26-8	bis-(dimetil-tiokarbamil)-disulfid	$\text{C}_6\text{H}_{12}\text{N}_2\text{S}_4$	tiokarbamat	fungicid	30 mg/l (25°C)	155-156°C	$< 7.5 \cdot 10^{-6}$ mmHg (25°C)
MANKOZEB ili DITHANE	8018-01-7	mangan(II)-etilen-bis-(ditiokarbamat) polimerni kompleks sa cink(II) soli		tiokarbamat	fungicid	praktično nerastvorljiv	-	zanemarljiv (25°C)
BAKAR SULFAT	7758-98-7	bakar(II)-tetra-okso-sulfat		neorganski bakar	fungicid, herbicid	praktično nerastvorljiv	-	-

Trivijalni naziv	CAS oznaka	IUPAC nomenklatura	Hemijska i strukturna formula	Hemijska klasa	Primena	Rastvorljivost u vodi	Tačka topljenja	Napon pare
PROPINEB	12071-83-9	polimer cink(II)-propilen-bis-(ditiokarbamat)	$(C_5H_8N_2S_4Zn)_x$	tiokarbamat	fungicid	praktično nerastvorljiv, <math><0.01 \text{ g/l}</math> (25°C)	nije merljiva, razlaganje iznad 150°C	<math><1 \text{ mPa}</math> (20°C)
BAKAR SULFAT ili PLAVI KAMEN	1344-73-6	bazni bakar(II)-sulfat	$CuSO_4$ 	neorganski bakar	fungicid	praktično nerastvorljiv	-	-
BAKAR OKSI HLORID ili BAKROCID	1332-40-7	bakar(II)-oksi-hlorid	$\approx 3Cu(OH)_2 \cdot CuCl_2$	neorganski bakar	fungicid	praktično nerastvorljiv	razlaganje na 140°C	zanemarljiv
BAKAR OKSI SULFAT ili KUPRAGIN	12158-97-3; 82010-79-5	trihidroksid-sulfat kompleks		neorganski bakar	fungicid	-	-	-
BENTONIT	1302-78-9	hidratirani aluminijum-silikat	$Al_2O_3 \cdot SiO_2 \cdot H_2O$	silikat	binder, sorbent, punilac	-	-	-

Trivijalni naziv	CAS oznaka	IUPAC nomenklatura	Hemijska i strukturna formula	Hemijska klasa	Primena	Rastvorljivost u vodi	Tačka topljenja	Napon pare
KALCIJUM STEARAT	1592-23-0	kalcijumova so stearinske kiseline	$\text{Ca}(\text{C}_{18}\text{H}_{35}\text{O}_2)_2$ 	metalni stearat		praktično nerastvorljiv u vodi	160°C	zanemarljiv (25°C)
KALCIJUM SULFAT	10101-41-4 (hidratisan); 7778-18-9 (anhidrovani)	kalcijum(II)-sulfat-dihidrat	$\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ 			slabo, 0,24g u 100ml vode (25°C)	100-150°C (anhidrovani, 1450°C)	-
KOBALT KARBONAT	7542-09-8	kobalt(II)-karbonat	CoCO_3 			-	-	-
NATRIJUM HLORID	7647-14-5	natrijum-hlorid	NaCl			36g/100ml vode (25°C)	razlaganje na 801°C	1.0 mmHg (865°C)
VINSKA KISELINA	87-69-4; 133-37-9	1,2-dihidroksietan-1,2-dikarboksilna kiselina	$\text{C}_4\text{H}_6\text{O}_6$ 		u prehranbenoj industriji	20.6g/100ml vode (20°C)	206°C	-



PRILOG 2

Sušenje suspenzija u fluidizovanom sloju inertnih čestica

Tabela P2.1. Eksperimentalna ispitivanja sa doziranjem tečne faze vode na laboratorijskom uređaju ($D_e=72$ mm)

Ogled	V_0 m ³ /h	U (Γ_{ge}) m/s	$\frac{U}{U_{mf}}$ (Γ_{ge})	T_{gi} °C	T_{ge} °C	SV kg _{vap} /kg _{H2O}	q kJ/kg _{H2O}	q' kJ/kg _{H2O}	$W_{H2O,exp}$ kg/m ² h	$W_{H2O,cal}$ kg/m ² h jednačina (3.9)	η_r	η_E	η_D
1	13.4	1.39	3.00	175	165	269.25	2751	44015	15	-37	0.062	0.057	0.907
2	13.4	1.23	2.56	173	114	49.55	2964	7939	80	51	0.409	0.314	0.842
3	13.4	1.34	2.85	173	148	98.51	2509	15857	40	-12	0.165	0.130	0.823
4	13.4	1.16	2.40	172	94	41.32	3260	6562	96	97	0.554	0.338	0.680
5	13.4	1.29	2.71	172	132	62.86	2556	10030	63	20	0.273	0.211	0.828
6	13.4	1.12	2.28	137	79	49.55	2903	6107	80	72	0.535	0.372	0.783
7	13.4	1.06	2.14	137	61	41.32	3167	5084	96	115	0.718	0.426	0.684
8	13.4	1.17	2.41	137	95	62.86	2671	7758	63	39	0.377	0.298	0.866
9	13.4	1.22	2.54	136	111	98.51	2496	12080	40	6	0.218	0.195	0.945
10	13.4	1.27	2.67	136	127	269.25	2461	33089	15	-25	0.074	0.069	0.922
11	13.4	1.14	2.33	111	85	98.51	2588	9557	40	19	0.289	0.233	0.860
12	13.4	1.00	2.00	111	42	41.32	2872	3996	96	113	0.864	0.546	0.759
13	13.4	1.02	2.05	111	49	49.55	3096	4794	80	92	0.753	0.479	0.742
14	13.4	1.18	2.45	111	100	269.25	2998	26164	15	-10	0.114	0.092	0.802
15	13.4	1.09	2.20	110	69	62.86	2601	6027	63	48	0.487	0.396	0.918

Prečnik inertnih staklenih sfera $d_p=0.835$ mmStatička visina sloja inertnog materijala $H_0=60$ mmUkupna površina inertnih čestica $A_p=1.04$ m²

Tabela P2.2. Eksperimentalna ispitivanja sušenja vodene suspenzije Cineba na laboratorijskom uređaju ($D_c=72$ mm)

Ogled	x_0 kg _{H2O} /kg _{SUS}	ρ_{SUS} kg/m ³	G_{SUS} kg/h	V_0 m ³ /h	$U(T_{ge})$ m/s	$\frac{U(T_{ge})}{U_{mf}}$	T_{gi} °C	T_{ge} °C	x_f %	SV kg _{vaz} /kg _{H2O}	q kJ/kg _{H2O}	q' kJ/kg _{H2O}	$W_{H2O,exp}$ kg/m ² h	$W_{H2O,cal}$ kg/m ² h jednačina (3.9)	η_r	η_E	η_D
1	0.671	1182.1	0.72	14.30	1.19	2.42	137	78		35.87	2138	4420	117.99	72.73	0.569	0.565	1.167
2	0.671	1182.1	0.98	14.30	1.10	2.21	136	51		26.16	2241	3191	161.81	127.10	0.869	0.782	1.113
3	0.671	1182.1	1.04	14.30	1.19	2.42	178	77		24.59	2508	4047	172.17	147.50	0.728	0.572	0.923
4	0.714	1126.8	1.35	14.62	1.19	2.42	184	71	5.4	18.21	2078	3107	237.63	170.98	0.809	0.767	1.147
5	0.735	1099.9	1.62	14.62	1.17	2.37	192	65	6.7	14.82	1898	2646	292.13	203.38	0.881	0.876	1.221
6	0.719	1120.8	1.62	14.62	1.17	2.37	200	65		15.11	2058	2820	286.53	215.78	0.885	0.828	1.134
7	0.690	1157.8	2.40	16.08	1.33	2.71	235	77	2.0	11.71	1873	2601	406.73	270.60	0.865	0.903	1.254
8	0.645	1215.3	2.75	14.30	1.12	2.27	243	59		9.72	1804	2235	435.51	294.55	0.979	1.051	1.302
9	0.671	1182.1	1.97	14.30	1.10	2.21	178	52		13.02	1653	2139	325.21	205.32	0.985	1.084	1.403
10	0.690	1157.8	1.27	20.70	1.68	3.41	126	69	2.2	28.59	1650	3214	214.46	119.50	0.638	0.735	1.432
11	0.690	1157.8	1.45	21.04	1.74	3.55	155	77	1.2	25.28	2004	3582	246.42	166.98	0.673	0.664	1.188
12	0.690	1157.8	2.16	20.87	1.80	3.69	197	91	1.3	16.89	1824	3113	366.06	224.59	0.704	0.751	1.282
13	0.690	1157.8	2.75	20.87	1.68	3.42	197	68	1.9	13.25	1731	2435	466.54	299.32	0.878	0.952	1.339

Prečnik inertnih staklenih sfera $d_p=0.835$ mmStatička visina sloja inertnog materijala $H_0=60$ mmUkupna površina inertnih čestica $A_p=1.04$ m²

Tabela P2.3. Eksperimentalna ispitivanja sa doziranjem tečne faze vode na uvećanom laboratorijskom uređaju ($D_c=215$ mm)

Ogled	V_0 m ³ /h	U (T_{gc}) m/s	$\frac{U}{U_{mf}}$ (T_{gc})	T_{gf} °C	T_{gc} °C	SV kg _{vaz} /kgH ₂ O	q kJ/kgH ₂ O	q' kJ/kgH ₂ O	$W_{H_2O,exp}$ kg/m ² h	$W_{H_2O,cal}$ kg/m ² h jednačina (3.9)	η_T	η_E	η_D
1	252.5	1.97	5.01	291.5	113.5	16.61	2997	4655	505	505	0.725	0.516	0.801
2	251.6	1.96	5.02	288.5	115.0	15.61	2747	4330	535	473	0.718	0.576	0.909
3	252.4	1.96	4.96	289.0	110.0	14.86	2696	4126	564	548	0.742	0.538	0.823
4	253.3	1.97	4.81	288.5	99.0	13.90	2665	3847	605	600	0.791	0.576	0.831
5	256.8	2.00	4.80	285.5	94.0	13.24	2566	3624	644	618	0.812	0.615	0.869
6	260.9	2.03	4.65	284.0	79.5	12.72	2628	3457	681	686	0.876	0.654	0.860
7	263.9	2.05	4.65	283.5	76.0	12.39	2597	3360	707	707	0.892	0.676	0.875
8	266.0	2.07	4.59	283.5	70.0	12.00	2586	3252	736	732	0.920	0.711	0.894
9	266.2	2.07	4.68	298.0	75.5	11.88	2668	3394	744	753	0.903	0.684	0.870
10	259.9	2.02	4.77	299.5	88.5	12.30	2624	3538	702	673	0.849	0.660	0.890
11	260.4	2.03	4.82	305.0	91.5	12.72	2747	3732	680	682	0.839	0.622	0.845
12	254.6	1.98	4.85	307.5	100.0	12.83	2695	3799	659	643	0.807	0.602	0.849
13	258.1	2.01	4.95	307.5	102.5	13.23	2745	3917	648	643	0.795	0.582	0.830
14	249.8	1.94	4.84	308.0	105.5	13.17	2700	3907	630	615	0.784	0.578	0.836
15	252.9	1.97	5.01	309.0	112.5	13.97	2783	4163	601	596	0.755	0.540	0.809
16	249.4	1.94	4.98	309.0	115.5	14.37	2819	4284	576	576	0.742	0.523	0.795
17	281.6	2.19	4.85	233.0	69.5	16.22	2677	3569	576	613	0.876	0.623	0.830
18	285.1	2.22	4.98	228.5	73.5	17.20	2692	3708	550	584	0.846	0.597	0.822

Prečnik inertnih staklenih sfera $d_p=0.925$ mm (frakcija 0.65-1.20 mm)Statička visina sloja inertnog materijala $H_0=80$ mmUkupna površina inertnih čestica $A_p=11.30$ m²

Ogled	V_0 m ³ /h	U (T_{ge}) m/s	$\frac{U}{U_{mf}}$ (T_{ge})	T_{gf} °C	T_{ge} °C	SV kg _{vaz} /kgH ₂ O	q kJ/kgH ₂ O	q' kJ/kgH ₂ O	$W_{H_2O,exp}$ kg/m ² h	$W_{H_2O,cal}$ kg/m ² h jednačina (3.9)	η_R	η_E	η_D
19	282.8	2.20	4.96	227.5	74.5	18.01	2782	3864	521	543	0.836	0.605	0.840
20	278.1	2.16	5.18	238.0	93.0	19.07	2797	4301	484	485	0.745	0.541	0.832
21	265.7	2.07	5.03	237.0	98.0	19.86	2793	4461	444	437	0.716	0.521	0.832
22	265.2	2.06	5.19	243.5	109.0	21.63	2947	5007	407	417	0.665	0.454	0.772
23	250.5	1.95	4.98	246.0	114.0	21.91	2932	5131	380	381	0.644	0.441	0.772
24	265.0	2.06	4.89	248.0	90.5	15.91	2534	3749	553	525	0.782	0.595	0.881
25	265.0	2.06	5.16	247.0	107.1	19.27	2731	4528	457	447	0.687	0.490	0.812
26	265.0	2.06	4.85	246.0	87.6	16.66	2667	3890	528	521	0.791	0.587	0.856
27	265.0	2.06	4.62	245.0	72.9	14.60	2537	3391	603	598	0.874	0.660	0.882
28	265.0	2.06	4.53	245.0	67.1	13.61	2443	3159	647	614	0.909	0.725	0.937
29	200.0	1.56	3.79	222.5	98.8	21.84	2735	4587	304	283	0.682	0.508	0.851
30	200.0	1.56	3.68	220.0	89.5	20.20	2665	4187	329	306	0.735	0.560	0.879
31	200.0	1.56	3.60	218.0	82.5	19.23	2633	3945	345	336	0.776	0.573	0.858
32	200.0	1.56	3.29	218.0	55.5	15.09	2472	3088	440	432	0.953	0.740	0.925
33	200.0	1.56	3.33	218.0	59.5	15.57	2489	3188	426	413	0.927	0.723	0.925
34	200.0	1.56	3.43	217.5	67.5	17.12	2591	3498	388	372	0.871	0.678	0.915
35	200.0	1.56	3.49	217.0	73.5	17.81	2581	3633	373	351	0.833	0.650	0.915
36	222.5	1.73	3.84	203.0	69.5	19.32	2603	3666	382	371	0.836	0.639	0.900
37	222.5	1.73	3.67	203.0	56.5	16.53	2441	3132	447	424	0.933	0.743	0.953
38	220.0	1.71	4.04	203.0	88.8	23.19	2679	4408	315	295	0.702	0.530	0.873
39	220.0	1.71	4.16	203.0	97.8	25.78	2746	4904	283	260	0.640	0.483	0.863
40	220.0	1.71	4.25	203.0	105.0	28.40	2819	5407	257	242	0.590	0.423	0.811
41	222.5	1.73	3.73	203.0	61.5	17.55	2505	3328	421	415	0.895	0.680	0.903
42	220.0	1.71	3.90	202.5	78.0	20.99	2639	3975	348	346	0.775	0.564	0.850

Ogled	V_0 m ³ /h	$U (T_{ge})$ m/s	$\frac{U}{U_{mf}} (T_{ge})$	T_{gr} °C	T_{ge} °C	SV kg _{vaz} /kgH ₂ O	q kJ/kgH ₂ O	q' kJ/kgH ₂ O	$W_{H_2O,exp}$ kg/m ² h	$W_{H_2O,cal}$ kg/m ² h jednačina (3.9)	η_r	η_E	η_D
43	250.0	1.95	4.85	200.0	106.0	30.02	2859	5626	277	259	0.573	0.419	0.825
44	260.0	2.02	4.73	200.0	86.0	19.43	2238	3633	444	358	0.727	0.637	1.034
45	250.0	1.95	4.72	199.0	97.5	27.06	2779	5039	307	302	0.629	0.445	0.806
46	250.0	1.95	4.61	198.0	90.0	25.14	2746	4653	330	323	0.679	0.493	0.836
47	250.0	1.95	4.52	197.0	84.0	23.66	2702	4352	351	349	0.719	0.520	0.838
48	250.0	1.95	4.43	197.0	77.5	21.79	2629	4004	381	374	0.767	0.570	0.869
49	250.0	1.95	4.30	195.5	68.5	19.92	2552	3628	417	405	0.831	0.634	0.901
50	250.0	1.95	4.20	194.5	61.8	18.92	2533	3425	439	429	0.880	0.676	0.915
51	275.0	2.14	5.39	191.0	109.5	35.12	2901	6264	260	244	0.518	0.374	0.807
52	275.0	2.14	5.26	190.5	101.5	30.59	2756	5435	299	275	0.575	0.434	0.855
53	275.0	2.14	5.14	190.5	94.5	28.25	2743	5015	323	319	0.625	0.445	0.813
54	277.0	2.16	5.07	188.0	87.5	26.43	2685	4622	348	342	0.670	0.487	0.839
55	280.0	2.18	5.00	187.5	80.0	24.31	2640	4236	382	376	0.726	0.536	0.860
56	280.0	2.18	4.92	187.0	75.0	23.23	2627	4034	400	395	0.763	0.568	0.872
57	280.0	2.18	4.80	186.5	67.5	21.32	2560	3690	436	425	0.821	0.626	0.902
58	288.0	2.24	5.28	183.0	88.0	25.37	2437	4309	377	326	0.658	0.539	0.953
59	287.5	2.24	5.50	182.5	101.5	33.52	2749	5685	285	261	0.546	0.412	0.852
60	312.0	2.43	5.63	182.0	83.5	28.74	2861	4851	360	379	0.678	0.472	0.800
61	311.5	2.42	5.42	182.0	72.0	24.25	2693	4089	426	443	0.772	0.551	0.836
62	285.0	2.22	5.25	182.0	90.0	24.92	2319	4209	380	312	0.643	0.547	0.992
63	287.5	2.24	5.59	181.5	106.8	36.33	2751	6128	263	236	0.504	0.380	0.847
64	287.5	2.24	5.38	180.0	94.5	30.57	2644	5103	312	289	0.592	0.448	0.864
65	315.0	2.45	5.23	179.0	58.0	21.91	2674	3624	477	515	0.878	0.618	0.837
66	297.5	2.32	5.45	179.0	87.8	29.31	2704	4859	337	330	0.640	0.467	0.840

Ogled	V_0 m ³ /h	$U(T_{ge})$ m/s	$\frac{U(T_{ge})}{U_{mf}}$	T_{gf} °C	T_{ge} °C	SV kg _{vaz} /kgH ₂ O	q kJ/kgH ₂ O	q' kJ/kgH ₂ O	$W_{H_2O,exp}$ kg/m ² h	$W_{H_2O,cal}$ kg/m ² h jednačina (3.9)	η_T	η_E	η_D
67	285.0	2.22	5.09	179.0	80.0	24.57	2457	4070	385	339	0.708	0.581	0.963
68	297.5	2.32	5.32	178.0	80.8	27.00	2652	4445	366	357	0.693	0.515	0.863
69	312.5	2.43	5.40	178.0	70.0	26.65	2905	4385	389	428	0.771	0.527	0.795
70	300.0	2.34	5.16	177.5	68.5	23.66	2603	3881	421	416	0.792	0.595	0.887
71	297.5	2.32	5.21	177.5	74.0	25.20	2633	4134	392	382	0.746	0.565	0.887
72	310.0	2.41	5.51	176.0	78.5	30.17	2971	4906	341	369	0.696	0.477	0.787
73	310.0	2.41	5.59	176.0	83.0	32.39	3044	5270	318	349	0.659	0.441	0.764
74	310.0	2.41	5.64	175.0	86.0	36.13	3250	5843	285	332	0.627	0.396	0.712
75	310.0	2.41	5.31	175.0	67.5	24.94	2706	4027	413	427	0.790	0.572	0.851
76	320.0	2.49	5.81	175.0	85.0	28.40	2583	4592	374	351	0.651	0.500	0.888
77	312.0	2.43	5.35	172.0	68.0	24.68	2590	3909	420	408	0.783	0.599	0.904
78	312.0	2.43	5.64	161.0	84.0	36.36	2830	5365	285	290	0.602	0.428	0.812
79	315.0	2.45	5.64	148.0	81.0	36.71	2485	4933	285	250	0.582	0.475	0.942
80	311.0	2.42	5.43	139.0	73.5	46.34	3064	5801	223	250	0.599	0.396	0.750
81	311.0	2.42	5.37	132.0	70.0	47.81	2992	5646	216	238	0.603	0.409	0.771
82	320.0	2.49	5.58	121.0	73.0	59.05	2862	6319	180	183	0.508	0.368	0.813

Prečnik inertnih staklenih sfera $d_p=1.94$ mm

Statička visina sloja inertnog materijala $H_0=95$ mm

Ukupna površina inertnih čestica $A_p=6.66$ m²

Ogled	V_0 m ³ /h	$U(T_{ge})$ m/s	$\frac{U(T_{ge})}{U_{mf}}$	T_{gf} °C	T_{ge} °C	SV kg _{vaz} /kgH ₂ O	q kJ/kgH ₂ O	q' kJ/kgH ₂ O	$W_{H_2O,exp}$ kg/m ² h	$W_{H_2O,cal}$ kg/m ² h jednačina (3.9)	η_T	η_E	η_D
83	220.0	2.14	2.24	201.5	99.0	34.34	3562	6307	209	239	0.615	0.396	0.701

Ogled	V_0 m ³ /h	$U(T_{ge})$ m/s	$\frac{U(T_{ge})}{U_{mf}}$	T_{gf} °C	T_{ge} °C	SV kg _{vaz} /kg _{H2O}	q kJ/kg _{H2O}	q' kJ/kg _{H2O}	$W_{H2O,exp}$ kg/m ² h	$W_{H2O,cal}$ kg/m ² h jednačina (3.9)	η_T	η_E	η_D
84	220.0	2.15	2.25	254.5	100.5	22.93	3574	5443	313	404	0.722	0.415	0.632
85	220.0	2.15	2.25	305.5	100.5	15.54	3225	4491	462	547	0.795	0.502	0.699
86	220.0	2.15	2.25	351.0	100.5	12.54	3179	4200	572	675	0.835	0.537	0.710

Prečnik inertnih staklenih sfera $d_p=1.94$ mm
 Statička visina sloja inertnog materijala $H_0=122$ mm
 Ukupna površina inertnih čestica $A_p=8.54$ m²

Ogled	V_0 m ³ /h	$U(T_{ge})$ m/s	$\frac{U(T_{ge})}{U_{mf}}$	T_{gf} °C	T_{ge} °C	SV kg _{vaz} /kg _{H2O}	q kJ/kg _{H2O}	q' kJ/kg _{H2O}	$W_{H2O,exp}$ kg/m ² h	$W_{H2O,cal}$ kg/m ² h jednačina (3.9)	η_T	η_E	η_D
87	251.0	2.53	2.63	250.0	106.8	23.48	3408	5591	355	427	0.682	0.403	0.662
88	251.0	2.49	2.59	253.8	100.0	20.75	3229	5014	402	428	0.726	0.498	0.773
89	251.0	2.42	2.53	260.5	89.7	18.03	3113	4475	462	539	0.790	0.500	0.719
90	231.4	2.15	2.26	255.1	76.2	15.34	2772	3720	501	533	0.861	0.607	0.814
91	233.1	2.10	2.23	255.1	66.5	14.07	2677	3407	550	574	0.914	0.670	0.853
92	234.8	2.02	2.17	255.1	51.0	12.50	2571	3025	624	639	0.999	0.767	0.902
93	220.4	2.20	2.29	309.8	102.9	13.37	2800	3990	548	537	0.795	0.588	0.837
94	218.0	2.10	2.20	309.0	90.2	11.99	2652	3563	604	570	0.850	0.669	0.898
95	221.0	2.08	2.18	306.6	80.9	11.60	2644	3416	633	641	0.887	0.658	0.850
96	220.4	2.01	2.13	308.3	70.1	10.75	2585	3182	681	683	0.934	0.717	0.883
97	221.0	1.94	2.07	307.3	56.9	10.02	2529	2952	733	734	0.991	0.782	0.912
98	221.6	1.88	2.02	305.7	46.6	9.51	2482	2785	774	770	1.035	0.839	0.941
99	232.0	2.31	2.40	205.9	101.8	34.22	3606	6613	225	269	0.605	0.358	0.657
100	230.8	2.23	2.33	205.6	90.1	27.86	3254	5370	275	307	0.686	0.446	0.735

Ogled	V_0 m ³ /h	$U(T_{ge})$ m/s	$\frac{U(T_{ge})}{U_{mf}}$	T_{ge} °C	T_{gv} °C	SV kg _{vaz} /kgH ₂ O	q kJ/kgH ₂ O	q' kJ/kgH ₂ O	$W_{H_2O,exp}$ kg/m ² h	$W_{H_2O,cal}$ kg/m ² h jednačina (3.9)	η_T	η_E	η_D
101	234.2	2.18	2.30	196.2	77.9	24.96	2982	4567	312	349	0.752	0.493	0.755
102	234.2	2.13	2.25	205.4	68.9	22.48	3095	4318	346	410	0.829	0.529	0.738
103	237.0	2.07	2.21	204.8	56.2	19.73	2954	3774	399	462	0.918	0.614	0.784
104	238.7	2.00	2.16	205.0	42.8	17.22	2815	3297	460	520	1.015	0.709	0.831
105	209.4	2.09	2.17	358.2	101.8	10.25	2661	3562	678	632	0.843	0.665	0.891
106	211.9	2.05	2.14	357.4	91.2	9.61	2588	3329	732	672	0.881	0.722	0.928
107	217.4	2.02	2.13	358.9	76.1	9.02	2575	3131	801	803	0.935	0.719	0.875
108	215.6	1.94	2.06	358.0	65.7	8.46	2495	2928	846	831	0.972	0.779	0.914
109	216.8	1.89	2.02	358.9	54.7	8.11	2488	2813	887	876	1.011	0.825	0.933
110	219.2	1.86	2.00	359.3	45.7	7.27	2298	2523	1001	921	1.047	0.930	1.021
111	240.3	2.41	2.50	152.4	105.1	116.01	5557	16138	69	110	0.357	0.147	0.427
112	240.3	2.33	2.43	152.1	91.5	61.06	3742	8466	131	156	0.481	0.283	0.640
113	243.0	2.28	2.40	153.1	80.2	45.12	3323	6294	179	215	0.592	0.356	0.675
114	243.0	2.21	2.34	153.7	70.1	36.89	3112	5163	219	254	0.692	0.442	0.732
115	246.2	2.16	2.31	153.1	57.6	30.79	2964	4287	266	304	0.812	0.539	0.779
116	247.8	2.08	2.24	152.0	42.8	25.34	2788	3498	325	362	0.964	0.668	0.838

Tabela P2.4. Eksperimentalna ispitivanja sušenja vodenih suspenzija na uvećanom laboratorijskom uređaju ($D_c=215$ mm)

Ogled	Suspenzija	x_0 kg _{H2O} /kg _{SUS}	ρ_{SUS} kg/m ³	G_{SUS} kg/h	V_0 m ³ /h	U (Γ_{ge}) m/s	$\frac{U}{U_{mf}} \frac{1}{(\Gamma_{ge})}$	T_{gt} °C	T_{ge} °C	x_f %	SV kg _{vaz} /kg _{H2O}	q kJ/kg _{H2O}	q' kJ/kg _{H2O}	$W_{H2O,exp}$ kg/m ² h	$W_{H2O,cal}$ kg/m ² h jednačina (3.9)	η_T	η_E	η_D
1	CaCO ₃	0.700	1200.0	29.93	214.30	2.10	2.19	308.9	96.3	0.563	12.332	2653.44	3667.28	577.04	553.34	0.825	0.618	0.854
2		0.700	1200.0	37.92	211.90	1.96	2.07	305.6	76.0	0.583	9.624	2231.38	2824.21	731.14	608.12	0.917	0.822	1.040
3		0.700	1200.0	37.91	208.10	1.89	2.00	310.9	68.4	0.704	9.455	2313.74	2823.24	730.91	638.18	0.950	0.829	1.011
4		0.700	1200.0	35.48	214.30	1.89	2.02	306.7	59.6	0.518	10.401	2591.99	3059.83	684.17	678.73	0.977	0.772	0.911
5		0.700	1200.0	30.84	216.20	1.88	2.01	257.4	53.6	0.525	12.074	2480.65	2950.49	594.59	567.19	0.989	0.805	0.958
6		0.700	1200.0	27.66	206.90	1.92	2.03	263.4	76.8	1.942	12.883	2427.67	3231.69	533.31	478.50	0.875	0.717	0.955
7		0.700	1200.0	26.22	217.40	1.97	2.09	260.6	67.9	0.533	14.280	2776.85	3539.15	505.55	528.23	0.908	0.661	0.843
8		0.700	1200.0	23.52	213.70	2.05	2.15	261.9	88.3	0.601	15.648	2746.36	3905.97	453.49	451.35	0.807	0.586	0.833
9		0.700	1200.0	23.05	213.10	2.11	2.20	264.1	99.8	0.877	15.921	2647.78	4014.37	444.47	416.38	0.755	0.562	0.853
10		0.700	1200.0	26.24	213.10	1.88	2.00	262.0	58.9	0.722	13.985	2864.26	3483.37	506.01	553.30	0.953	0.678	0.825
11		0.700	1200.0	36.25	193.10	1.91	1.99	367.5	99.8	0.514	9.174	2485.81	3273.24	698.98	627.78	0.859	0.690	0.908
12		0.700	1200.0	34.39	199.80	1.93	2.02	366.0	90.6	0.611	10.005	2786.40	3551.30	663.11	678.99	0.884	0.643	0.819
13		0.700	1200.0	42.05	201.70	1.89	1.99	362.4	79.1	0.564	8.262	2364.10	2899.01	810.73	715.12	0.930	0.798	0.978
14		0.700	1200.0	43.93	207.50	1.88	1.99	361.6	68.4	0.614	8.135	2406.92	2845.29	847.06	772.92	0.966	0.822	0.972
15		0.700	1200.0	29.66	201.70	1.94	2.03	308.5	89.4		11.711	2593.98	3474.66	571.95	540.95	0.854	0.658	0.881
16		0.700	1200.0	31.40	205.60	1.95	2.05	309.9	84.7		11.276	2566.55	3360.22	605.50	571.76	0.875	0.684	0.895

Prečnik inertnih staklenih sfera $d_p=1.94$ mmStatička visina sloja inertnog materijala $H_0=122$ mmUkupna površina inertnih čestica $A_p=8.54$ m²

Ogled	Suspenzija	x_0 kg _{H2O} /kg _{SUS}	ρ_{SUS} kg/ m ³	G_{SUS} kg/h	V_0 m ³ /h	U (T_{ge}) m/s	$\frac{U}{U^{mf}}$ (T_{ge})	T_{gt} °C	T_{ge} °C	x_f %	SV kg _{vaz} /kg _{H2O}	q kJ/kg _{H2O}	q' kJ/kg _{H2O}	$W_{H2O,exp}$ kg/m ² h	$W_{H2O,cal}$ kg/m ² h jednačina (3.9)	η_T	η_E	η_D
17	CaCO ₃	0.656	1130.0	34.96	261.34	2.39	2.99	269.0	83.5	0.700	13.248	2483.33	3266.48	631.59	590.86	0.850	0.704	0.927
18		0.656	1130.0	31.38	248.27	2.34	2.91	272.0	93.5	0.710	14.023	2531.87	3503.48	566.86	530.70	0.803	0.649	0.898
19		0.690	1130.0	23.43	289.27	2.61	3.27	196.0	79.0	0.790	20.807	2458.98	3593.89	445.12	410.62	0.767	0.644	0.941
20		0.657	1130.0	21.67	294.62	2.75	3.43	194.5	91.0	0.700	24.066	2518.89	4125.13	391.96	359.82	0.675	0.553	0.906
21		0.536	1130.0	20.38	274.12	2.65	3.30	191.0	103.0	0.600	29.179	2600.03	4904.60	300.78	270.10	0.576	0.458	0.865
22		0.528	1130.0	19.49	268.47	2.65	3.29	197.0	111.0	0.590	30.327	2643.43	5286.87	283.43	252.03	0.540	0.421	0.842
23		0.513	1130.0	16.50	258.37	2.61	3.25	195.5	120.5	0.790	35.458	2698.58	6134.76	233.30	200.44	0.469	0.358	0.815
24		0.521	1130.0	38.06	246.79	2.25	2.81	252.0	81.5	0.700	14.474	2493.19	3319.37	545.93	507.85	0.841	0.695	0.925
25		0.521	1130.0	36.12	256.59	2.41	3.00	251.5	92.5	0.690	15.856	2549.92	3632.43	518.11	482.95	0.780	0.627	0.893
26		0.521	1130.0	31.39	239.95	2.31	2.88	252.5	102.0	0.700	17.059	2599.37	3929.27	450.35	417.70	0.731	0.573	0.866
27		0.673	1130.0	22.20	244.11	2.41	3.00	248.0	112.0	0.690	18.993	2618.29	4293.22	411.51	379.54	0.669	0.518	0.849
28		0.673	1130.0	20.60	245.60	2.49	3.09	249.0	121.5	0.590	20.598	2665.31	4682.58	381.77	349.77	0.621	0.469	0.824
29		0.673	1130.0	37.82	245.60	2.23	2.78	297.5	80.0	0.700	11.217	2464.60	3087.83	701.00	656.48	0.891	0.748	0.937
30		0.546	1130.0	40.32	226.00	2.12	2.64	302.0	91.5	0.700	11.930	2539.67	3341.98	606.53	568.88	0.843	0.682	0.898
31		0.667	1130.0	33.23	236.98	2.27	2.83	303.5	100.0	0.700	12.436	2561.72	3505.85	610.11	574.58	0.808	0.644	0.881
32		0.667	1130.0	30.61	236.39	2.34	2.91	304.5	112.5	0.700	13.469	2621.62	3816.37	561.91	529.44	0.756	0.582	0.848
33		0.667	1130.0	29.39	245.30	2.48	3.09	302.0	121.5	0.590	14.555	2666.32	4091.81	539.59	508.71	0.714	0.537	0.824

Prečnik inertnih staklenih sfera $d_p=1.2$ mm

Statička visina sloja inertnog materijala $H_0=80$ mm

Ukupna površina inertnih čestica $A_p=8.42$ m²

Ogled	Suspenzija	x_0 kg _{H2O} /kg _{SUS}	ρ_{SUS} kg/m ³	G_{SUS} kg/h	V_0 m ³ /h	U (T_{ge}) m/s	$\frac{U}{U_{mf}} \frac{1}{(T_{ge})}$	T_{gr} °C	T_{ge} °C	x_f %	SV kg _{vaz} /kg _{H2O}	q kJ/kg _{H2O}	q' kJ/kg _{H2O}	$W_{H2O,exp}$ kg/m ² h	$W_{H2O,cal}$ kg/m ² h jednačina (3.9)	η_T	η_E	η_D
1		0.768	1058.1	19.43	265.00	2.43	4.61	169.0	72.0		21.414	2096.83	3328.98	410.94	315.76	0.761	0.700	1.112
2		0.768	1058.1	12.99	210.00	2.08	4.00	186.0	100.0		25.368	2208.33	4390.98	274.89	201.38	0.584	0.514	1.022
3		0.768	1058.1	16.64	200.00	1.92	3.66	193.0	88.0		18.866	2002.61	3394.90	352.03	245.55	0.703	0.674	1.143
4		0.768	1058.1	20.42	275.00	2.64	5.05	196.0	89.0		21.140	2286.97	3868.61	431.98	353.30	0.694	0.591	1.000
5		0.768	1058.1	23.54	290.00	2.65	5.02	192.0	71.0		19.342	2362.28	3455.57	497.89	438.39	0.813	0.675	0.988
6		0.768	1058.1	22.87	250.00	2.34	4.45	192.0	79.0		17.157	1958.29	3067.41	483.87	344.12	0.770	0.754	1.181
7		0.717	1123.3	14.90	235.00	2.25	4.29	191.0	87.0		26.515	2787.45	4717.22	294.31	290.42	0.680	0.486	0.822
8		0.717	1123.3	22.24	235.00	2.12	4.02	192.0	67.2		17.768	2237.51	3173.39	439.21	365.22	0.847	0.738	1.047
9		0.717	1122.8	21.18	265.00	2.44	4.62	185.0	73.0	1.700	21.022	2376.98	3607.91	418.60	366.21	0.782	0.645	0.979
10		0.717	1122.8	15.93	265.00	2.58	4.94	185.0	93.5	2.020	27.953	2587.13	4806.69	314.81	283.79	0.619	0.473	0.879
11		0.717	1122.8	16.46	270.00	2.58	4.92	187.0	86.4	2.580	27.571	2803.58	4793.40	325.19	325.74	0.672	0.478	0.818
12		0.723	1115.4	17.63	270.00	2.58	4.92	188.0	86.5	2.130	25.523	2618.57	4463.17	351.29	328.67	0.679	0.514	0.876
13		0.740	1093.9	10.54	280.00	2.85	5.49	175.0	109.5	3.580	43.276	2872.44	7016.65	214.85	199.78	0.453	0.318	0.776
14		0.740	1093.9	12.38	280.00	2.84	5.48	177.0	109.0	2.590	36.835	2538.08	6046.60	252.42	208.63	0.472	0.369	0.879
15		0.705	1138.7	19.82	200.00	1.88	3.57	190.0	80.0	1.010	17.256	1917.41	3050.43	384.89	261.99	0.760	0.757	1.205
16		0.705	1138.7	19.82	200.00	1.88	3.57	190.0	80.0	1.100	17.256	1917.41	3050.43	384.89	261.99	0.760	0.757	1.205
17		0.705	1138.7	19.82	200.00	1.88	3.57	190.0	80.0	0.750	17.256	1917.41	3050.43	384.89	261.99	0.760	0.757	1.205
18		0.705	1138.7	19.82	200.00	1.88	3.57	190.0	80.0	0.290	17.256	1917.41	3050.43	384.89	261.99	0.760	0.757	1.205

Prečnik inertnih staklenih sfera $d_p=0.925$ mm (frakcija 0.65-1.20 mm)

Statička visina sloja inertnog materijala $H=100$ mm

Ukupna površina inertnih čestica $A_p=14.13$ m²

Cineb

Ogled	Suspenzija	x_0 kg _{H2O} /kg _{SUS}	ρ_{SUS} kg/m ³	G_{SUS} kg/h	V_0 m ³ /h	U (T_{ge}) m/s	$\frac{U}{U_{mf}}(\frac{1}{T_{ge}})$	T_{gr} °C	T_{ge} °C	x_f %	SV kg _{vaz} /kg _{H2O}	q kJ/kg _{H2O}	q' kJ/kg _{H2O}	$W_{H2O,exp}$ kg/m ² h	$W_{H2O,cal}$ kg/m ² h jednačina (3.9)	η_T	η_E	η_D
19		0.705	1138.7	19.82	200.00	1.88	3.57	190.0	80.0	0.800	17.256	1917.41	3050.43	384.89	261.99	0.760	0.757	1.205
20		0.705	1138.7	17.70	200.00	1.93	3.69	190.0	90.0	0.390	19.324	1953.99	3419.48	343.68	230.57	0.681	0.668	1.169
21		0.710	1132.3	18.76	200.00	1.90	3.63	190.0	85.0	1.760	18.103	1921.06	3201.77	366.87	246.30	0.721	0.717	1.196
22		0.679	1171.9	17.05	250.00	2.40	4.58	185.0	88.1	0.500	26.033	2551.49	4473.99	318.90	286.35	0.661	0.512	0.897
23		0.679	1171.9	17.70	220.00	2.06	3.93	180.0	80.0	2.300	22.071	2229.53	3678.73	331.00	262.09	0.719	0.628	1.036
24		0.708	1134.8	17.06	260.00	2.51	4.79	187.0	90.0	1.150	25.949	2545.09	4512.94	332.73	298.17	0.652	0.506	0.897
25	Cineb	0.693	1154.0	16.43	260.00	2.55	4.89	190.0	96.0		27.538	2619.06	4875.92	313.53	284.35	0.616	0.465	0.866
26		0.693	1154.0	30.54	255.00	2.48	4.75	254.0	93.5		14.527	2358.49	3512.02	582.89	495.52	0.780	0.648	0.964
27		0.700	1145.0	25.48	270.00	2.44	4.62	195.0	67.0	0.780	18.250	2357.15	3314.74	491.28	433.17	0.849	0.707	0.994
28		0.641	1220.0	27.10	275.00	2.64	5.05	230.0	89.0	1.600	19.077	2719.51	4146.77	478.70	470.89	0.756	0.551	0.841
29		0.641	1220.0	28.00	268.00	2.66	5.10	249.0	100.0	0.710	17.993	2713.80	4261.95	494.60	477.27	0.729	0.530	0.832
30		0.641	1220.0	44.00	250.00	2.56	4.96	338.0	113.0	0.720	10.681	2436.42	3497.62	777.23	670.86	0.791	0.635	0.911
31		0.641	1220.0	37.10	250.00	2.57	4.97	318.0	114.0	0.700	12.668	2620.19	3891.75	655.34	605.06	0.763	0.570	0.846

Prečnik inertnih staklenih sfera $d_p=1.2$ mm

Statička visina sloja inertnog materijala $H_0=100$ mm

Ukupna površina inertnih čestica $A_p=10.89$ m²

Ogled	Suspenzija	x_0 kg _{H2O} /kg _{SUS}	ρ_{SUS} kg/m ³	G_{SUS} kg/h	V_0 m ³ /h	U (T_{ge}) m/s	$\frac{U}{U_{mf}}(\frac{1}{T_{ge}})$	T_{gr} °C	T_{ge} °C	x_f %	SV kg _{vaz} /kg _{H2O}	q kJ/kg _{H2O}	q' kJ/kg _{H2O}	$W_{H2O,exp}$ kg/m ² h	$W_{H2O,cal}$ kg/m ² h jednačina (3.9)	η_T	η_E	η_D
32		0.600	1272.8	30.18	237.4	2.313	3.23	330.0	100.0	1.48	15.52	3613.7	4870.6	498.73	659.35	0.814	0.463	0.625
33	Cineb	0.600	1272.8	31.59	237.4	2.344	3.28	345.0	105.0	2.12	14.83	3604.1	4880.5	522.10	684.71	0.809	0.460	0.622
34		0.600	1272.8	31.59	237.4	2.344	3.28	345.0	105.0	1.29	14.83	3604.1	4880.5	522.10	684.71	0.809	0.460	0.622

Ogled	Suspencija	x_0 kg _{H2O} /kg _{SUS}	ρ_{SUS} kg/ m ³	G_{SUS} kg/h	V_0 m ³ /h	U (T_{gc}) m/s	$\frac{U}{U_{mf}} \frac{1}{(T_{gc})}$	T_{gt} °C	T_{gc} °C	x_f %	SV kg _{noz} /kg _{H2O}	q kJ/kg _{H2O}	q' kJ/kg _{H2O}	$W_{H2O,exp}$ kg/m ² h	$W_{H2O,cal}$ kg/m ² h jednačina (3.9)	η_T	η_E	η_D
35		0.600	1272.8	28.76	228.7	2.228	3.11	320.0	100.0	1.09	15.69	3493.4	4763.8	475.36	605.15	0.807	0.474	0.646
36		0.600	1272.8	29.82	228.7	2.273	3.18	335.0	107.5	0.80	15.13	3487.1	4828.3	492.89	620.28	0.793	0.463	0.641
37		0.600	1272.8	33.08	223.5	2.221	3.11	358.0	107.5	0.69	13.33	3382.9	4564.6	546.64	669.35	0.814	0.490	0.661
38		0.600	1272.8	30.60	211.3	2.135	2.99	347.0	114.0	0.71	13.62	3218.0	4516.2	505.74	579.05	0.784	0.491	0.689
39		0.600	1272.8	29.47	217.0	2.215	3.10	343.0	118.0	0.60	14.52	3315.0	4758.8	487.04	570.82	0.764	0.464	0.666
40		0.600	1272.8	36.68	217.8	2.173	3.04	385.0	109.0	0.39	11.71	3276.3	4332.8	606.23	719.28	0.830	0.515	0.681
41		0.600	1272.8	33.71	213.5	2.202	3.08	377.0	122.0	0.29	12.49	3233.1	4526.4	557.16	636.72	0.783	0.485	0.679
42		0.600	1272.8	36.12	217.8	2.255	3.16	395.5	123.5	0.30	11.90	3285.5	4535.6	596.89	695.10	0.792	0.483	0.667
43		0.600	1272.8	37.32	221.1	2.197	3.07	388.0	107.5	0.50	11.69	3321.4	4357.5	616.75	744.52	0.836	0.513	0.673
44		0.670	1183.4	33.64	220.0	2.175	3.04	360.0	105.5	0.20	11.55	2978.2	3978.7	620.85	672.83	0.828	0.563	0.753
45		0.670	1183.4	33.64	220.0	2.175	3.04	360.0	105.5	0.59	11.55	2978.2	3978.7	620.85	672.83	0.828	0.563	0.753
46	Cineb	0.670	1183.4	33.64	220.0	2.175	3.04	360.0	105.5	0.40	11.55	2978.2	3978.7	620.85	672.83	0.828	0.563	0.753
47		0.662	1193.6	33.22	195.2	1.970	2.76	365.0	113.5	0.75	10.51	2678.8	3674.7	605.70	578.47	0.809	0.604	0.828
48		0.662	1193.6	37.88	189.5	1.928	2.70	401.0	116.5	0.60	8.94	2580.9	3456.3	690.80	635.60	0.826	0.640	0.857
49		0.662	1193.6	37.46	188.2	1.929	2.70	401.0	119.5	0.30	8.98	2565.8	3472.7	683.06	621.30	0.818	0.634	0.858
50		0.662	1193.6	36.75	188.2	1.954	2.73	401.0	124.5	0.30	9.16	2570.4	3541.9	670.17	605.33	0.802	0.618	0.851
51		0.662	1193.6	38.59	195.0	1.968	2.75	403.0	113.5	0.50	9.03	2651.2	3507.5	703.69	669.93	0.836	0.633	0.837
52		0.662	1193.6	36.40	201.9	2.033	2.84	386.5	112.5	0.41	9.92	2755.2	3685.3	663.72	657.36	0.827	0.603	0.806
53		0.678	1175.0	39.02	201.9	2.059	2.88	410.0	117.5	0.31	9.04	2680.9	3574.5	728.62	699.89	0.828	0.618	0.824
54		0.678	1175.0	40.08	194.3	2.014	2.82	424.0	124.0	0.90	8.46	2578.0	3471.7	748.43	683.98	0.819	0.631	0.849
55		0.678	1175.0	40.29	192.1	2.009	2.81	429.0	127.5	0.50	8.33	2549.6	3458.7	752.39	676.17	0.812	0.630	0.855
56		0.678	1175.0	42.48	192.6	1.941	2.71	430.0	113.0	0.30	7.91	2543.3	3289.4	793.32	728.04	0.854	0.675	0.873
57		0.678	1175.0	32.02	196.9	1.995	2.79	358.0	115.0		10.74	2646.0	3680.4	597.90	562.39	0.799	0.602	0.837

Ogled	Suspenzija	x_0 kg _{H2O} /kg _{SUS}	ρ_{SUS} kg/m ³	G_{SUS} kg/h	V_0 m ³ /h	U (T_{ge}) m/s	$\frac{U}{U_{mf}} (T_{ge})$	T_{gi} °C	T_{ge} °C	x_f %	SV kg _{vaz} /kg _{H2O}	q kJ/kg _{H2O}	q' kJ/kg _{H2O}	$W_{H2O,exp}$ kg/m ² h	$W_{H2O,cal}$ kg/m ² h jednačina (3.9)	η_T	η_E	η_D
58		0.678	1175.0	31.73	198.2	2.029	2.84	360.0	119.0		10.91	2666.5	3761.9	592.61	558.20	0.786	0.586	0.826
59		0.670	1183.4	28.41	188.4	1.921	2.69	335.0	117.5	0.70	11.71	2584.5	3743.1	524.29	474.35	0.769	0.590	0.854
60		0.670	1183.4	34.91	188.4	1.916	2.68	380.0	116.5	0.40	9.53	2547.4	3480.4	644.34	582.68	0.813	0.635	0.868
61	Cineb	0.670	1183.4	37.46	188.4	1.931	2.70	401.0	119.5	0.30	8.88	2537.5	3434.4	691.32	622.18	0.818	0.641	0.868
62		0.670	1183.4	34.42	188.4	1.884	2.63	370.0	110.0	0.50	9.67	2547.7	3429.5	635.21	579.91	0.827	0.650	0.875
63		0.670	1183.4	32.93	188.4	1.911	2.67	365.0	115.5	0.50	10.10	2556.7	3535.4	607.80	550.77	0.804	0.626	0.866
64		0.670	1183.4	38.59	188.4	1.887	2.64	400.0	110.5	0.40	8.62	2530.2	3321.2	712.19	648.74	0.845	0.671	0.880

Prečnik inertnih staklenih sfera $d_p=0.925$ mm (frakcija 0.65-1.20 mm)

Statička visina sloja inertnog materijala $H_0=80$ mm

Ukupna površina inertnih čestica $A_p=11.30$ m²

Ogled	Suspenzija	x_0 kg _{H2O} /kg _{SUS}	ρ_{SUS} kg/m ³	G_{SUS} kg/h	V_0 m ³ /h	U (T_{ge}) m/s	$\frac{U}{U_{mf}} (T_{ge})$	T_{gi} °C	T_{ge} °C	x_f %	SV kg _{vaz} /kg _{H2O}	q kJ/kg _{H2O}	q' kJ/kg _{H2O}	$W_{H2O,exp}$ kg/m ² h	$W_{H2O,cal}$ kg/m ² h jednačina (3.9)	η_T	η_E	η_D
1		0.760	1221.5	16.70	209.0	2.060	3.95	301.0	98.0	3.97	19.85	4077.5	5744.7	349.61	515.36	0.786	0.394	0.555
2		0.755	1221.5	16.70	202.1	2.013	3.87	312.0	102.0	3.75	19.32	4107.1	5808.7	347.34	512.55	0.781	0.388	0.548
3		0.764	1221.5	16.70	199.0	1.988	3.82	307.5	103.0	3.64	18.81	3894.3	5570.1	351.37	489.63	0.775	0.404	0.577
4		0.764	1221.5	16.70	205.6	2.062	3.97	308.5	104.5	3.80	19.42	4011.5	5771.5	351.57	504.50	0.769	0.389	0.559
5	Cu(OH) ₂	0.762	1221.5	16.70	226.1	2.252	4.33	291.5	102.0	4.04	21.43	4110.9	5998.2	350.38	517.90	0.758	0.375	0.548
6		0.760	1221.5	16.70	221.5	2.151	4.12	298.0	92.5	4.04	21.04	4373.1	6022.3	349.63	559.39	0.802	0.378	0.521
7		0.763	1221.5	16.70	213.0	2.054	3.93	295.5	90.0	3.76	20.16	4188.8	5717.5	350.83	538.57	0.812	0.399	0.545
8		0.701	1221.5	16.70	208.2	2.038	3.91	297.0	95.5	3.09	21.43	4369.0	6114.4	322.65	510.55	0.789	0.371	0.519
9		0.701	1221.5	16.70	208.4	2.084	4.01	299.0	103.5	2.65	21.45	4246.1	6168.2	322.62	489.04	0.759	0.364	0.529

Ogled	Suspenzija	x_0 kg _{H2O} /kg _{SUS}	ρ_{SUS} kg/ m ³	G _{SUS} kg/h	V_0 m ³ /h	$\frac{U}{U_{mf}} \frac{U}{(T_{ge})}$ m/s	T_{ge} °C	T_{gi} °C	T_{ge} °C	x_f %	SV kg _{vaz} /kg _{H2O}	q kJ/kg _{H2O}	q' kJ/kg _{H2O}	$W_{H2O,exp}$ kg/m ² h	$W_{H2O,cal}$ kg/m ² h jednačina (3.9)	η_T	η_E	η_D
10	Cu(OH) ₂	0.693	1221.5	16.70	207.2	2.114	296.5	211.0	2.38	21.58	4056.6	6156.0	318.87	454.04	0.727	0.362	0.549	
11		0.692	1221.5	16.70	207.2	2.144	299.0	116.5	1.98	21.60	3997.6	6220.9	318.57	442.17	0.708	0.355	0.553	
12		0.686	1221.5	16.70	210.4	2.208	278.5	122.0	1.81	22.15	3518.6	5924.2	315.48	376.07	0.659	0.370	0.624	
13		0.686	1221.5	16.70	206.0	1.946	273.5	82.5	2.76	21.66	4180.7	5658.1	315.80	486.04	0.823	0.407	0.551	
14		0.777	1244.9	17.49	255.0	2.442	188.0	87.5	7.25	22.63	2299.1	3957.6	374.19	305.79	0.682	0.579	0.996	
15		0.768	1198.0	15.94	250.0	2.404	190.0	89.0	3.03	24.63	2515.1	4357.9	337.06	300.13	0.670	0.525	0.909	

Prečnik inertnih staklenih sfera $d_p = 1.94$ mm

Statička visina sloja inertnog materijala $H_0 = 122$ mm

Ukupna površina inertnih čestica $A_p = 8.54$ m²

Ogled	Suspenzija	x_0 kg _{H2O} /kg _{SUS}	ρ_{SUS} kg/ m ³	G _{SUS} kg/h	V_0 m ³ /h	$\frac{U}{U_{mf}} \frac{U}{(T_{ge})}$ m/s	T_{ge} °C	T_{gi} °C	T_{ge} °C	x_f %	SV kg _{vaz} /kg _{H2O}	q kJ/kg _{H2O}	q' kJ/kg _{H2O}	$W_{H2O,exp}$ kg/m ² h	$W_{H2O,cal}$ kg/m ² h jednačina (3.9)	η_T	η_E	η_D
1		0.947	1200.0	27.58	208.1	2.073	261.0	102.0	1.56	9.60	1546.0	2392.0	719.54	394.48	0.773	0.941	1.456	
2		0.700	1200.0	27.58	195.1	1.967	269.5	106.5	1.80	12.18	2010.9	3139.7	531.97	369.84	0.747	0.713	1.113	
3		0.700	1200.0	10.98	184.7	1.884	283.0	111.0	1.42	28.97	5050.8	7869.8	211.69	370.29	0.698	0.283	0.441	
4		0.700	1200.0	19.97	176.0	1.742	289.0	99.5	1.74	15.18	2911.1	4209.1	385.08	396.27	0.784	0.536	0.776	
5	bakar(II)-	0.700	1200.0	25.61	179.7	1.750	288.0	93.5	1.81	12.08	2377.1	3336.5	493.88	419.87	0.822	0.682	0.957	
6	oksi-hlorid	0.718	1200.0	15.66	264.0	2.630	206.0	102.0	1.93	28.32	2982.2	5476.9	309.52	319.97	0.615	0.411	0.755	
7		0.718	1200.0	14.80	264.0	2.665	206.0	107.0	1.79	29.95	3004.0	5795.6	292.67	300.06	0.582	0.386	0.745	
8		0.718	1200.0	12.53	267.6	2.730	202.5	111.0	1.50	35.89	3328.4	6820.5	247.63	277.01	0.541	0.326	0.669	
9		0.718	1200.0	18.40	262.9	2.592	207.0	98.0	1.89	24.01	2648.4	4665.0	363.68	337.49	0.651	0.485	0.854	
10		0.713	1200.0	28.38	161.7	1.589	304.0	97.0	2.16	9.63	2016.6	2815.4	557.66	397.97	0.832	0.804	1.123	

Ogled	Suspenzija	x_0 kg _{H2O} /kg _{SUS}	ρ_{SUS} kg/m ³	G_{SUS} kg/h	V_0 m ³ /h	U (Γ_{gc}) m/s	$\frac{U}{U^{mf}}(\Gamma_{gc})$	T_{gi} °C	T_{ge} °C	x_f %	SV kg _{vaz} /kg _{H2O}	q kJ/kg _{H2O}	q' kJ/kg _{H2O}	$W_{H2O,exp}$ kg/m ² h	$W_{H2O,cal}$ kg/m ² h jednačina (3.9)	η_T	η_E	η_D
11	bakar(II)- oksi-hlorid	0.713	1200.0	28.36	157.5	1.569	1.63	308.0	102.0	1.64	9.39	1957.6	2784.4	557.21	381.34	0.816	0.809	1.150
12		0.713	1200.0	28.99	159.6	1.607	1.67	306.0	106.0	1.53	9.30	1884.4	2741.7	569.73	371.65	0.799	0.817	1.189
13		0.713	1200.0	27.85	161.7	1.649	1.71	304.0	111.0	1.52	9.81	1918.8	2873.3	547.30	359.29	0.775	0.775	1.160

Prečnik inertnih staklenih sfera $d_p = 1.94$ mm
 Statička visina sloja inertnog materijala $H_0 = 95$ mm
 Ukupna površina inertnih čestica $A_p = 6.8$ m²

Ogled	Suspenzija	x_0 kg _{H2O} /kg _{SUS}	ρ_{SUS} kg/m ³	G_{SUS} kg/h	V_0 m ³ /h	U (Γ_{gc}) m/s	$\frac{U}{U^{mf}}(\Gamma_{gc})$	T_{gi} °C	T_{ge} °C	x_f %	SV kg _{vaz} /kg _{H2O}	q kJ/kg _{H2O}	q' kJ/kg _{H2O}	$W_{H2O,exp}$ kg/m ² h	$W_{H2O,cal}$ kg/m ² h jednačina (3.9)	η_T	η_E	η_D
1	Propineb	0.769	1120.0	8.71	144.9	1.404	1.50	203.0	98.0	5.11	25.61	2721.3	4742.8	184.50	166.35	0.642	0.477	0.831
2		0.769	1120.0	8.71	141.9	1.382	1.48	205.0	100.0	5.11	25.07	2664.7	4694.9	184.50	161.21	0.635	0.481	0.847
3		0.769	1120.0	8.71	140.4	1.360	1.45	203.0	98.0	5.11	24.80	2635.5	4593.3	184.50	160.25	0.644	0.493	0.858
4		0.769	1120.0	8.71	140.0	1.362	1.45	204.0	99.5	5.11	24.75	2617.7	4609.2	184.50	158.15	0.637	0.490	0.863
5		0.769	1120.0	8.71	139.4	1.355	1.45	205.5	99.0	5.11	24.64	2656.1	4626.3	184.50	161.16	0.643	0.488	0.851
6		0.769	1120.0	8.71	138.8	1.349	1.44	207.0	99.0	5.11	24.53	2681.7	4643.3	184.50	162.98	0.647	0.487	0.843
7		0.769	1120.0	8.71	137.3	1.332	1.42	206.0	98.5	5.11	24.26	2639.9	4567.6	184.50	160.28	0.648	0.495	0.856
8	0.769	1120.0	8.71	135.5	1.311	1.40	207.0	97.5	5.11	23.94	2652.9	4530.6	184.50	161.76	0.657	0.500	0.853	
9	0.769	1120.0	8.71	134.3	1.311	1.40	208.0	101.0	5.11	23.73	2570.1	4515.6	184.50	153.93	0.639	0.499	0.877	
10	0.802	1095.0	6.35	139.4	1.376	1.47	198.0	105.0	3.39	32.43	3054.4	5846.0	140.20	134.61	0.573	0.384	0.734	
11	0.802	1095.0	6.35	137.3	1.345	1.43	203.0	102.0	3.39	31.93	3265.3	5916.3	140.20	147.61	0.605	0.381	0.689	
12	0.802	1095.0	6.35	135.8	1.319	1.41	201.0	99.0	3.39	31.58	3260.0	5784.8	140.20	148.95	0.619	0.391	0.693	
13	0.802	1095.0	6.35	133.4	1.299	1.39	203.0	100.0	3.39	31.01	3233.2	5744.5	140.20	146.97	0.618	0.393	0.698	

Ogled	Suspenzija	x_0 kg _{H2O} /kg _{SUS}	ρ_{SUS} kg/m ³	G_{SUS} kg/h	V_0 m ³ /h	U (Γ_{gc}) m/s	$\frac{U}{U_{mf}}(\Gamma_{gc})$	T_{gt} °C	T_{gc} °C	x_f %	SV kg _{vaz} /kg _{H2O}	q kJ/kg _{H2O}	q' kJ/kg _{H2O}	$W_{H2O,exp}$ kg/m ² h	$W_{H2O,cal}$ kg/m ² h jednačina (3.9)	η_T	η_E	η_D
14		0.802	1095.0	6.35	131.8	1.284	1.37	200.0	100.0	3.39	30.66	3103.2	5585.8	140.20	139.94	0.612	0.404	0.727
15		0.802	1095.0	6.35	131.8	1.284	1.37	201.0	100.0	3.39	30.66	3134.3	5616.9	140.20	141.62	0.614	0.402	0.720
16		0.802	1095.0	6.35	131.2	1.275	1.36	202.0	99.0	3.39	30.52	3181.2	5621.2	140.20	144.70	0.623	0.402	0.710
17		0.802	1095.0	6.35	131.2	1.271	1.36	199.0	98.0	3.39	30.52	3119.1	5527.9	140.20	141.87	0.622	0.409	0.725
18		0.802	1095.0	6.35	125.1	1.212	1.30	204.0	98.0	3.39	29.10	3121.6	5418.7	140.20	142.01	0.636	0.417	0.725
19		0.802	1095.0	6.10	151.9	1.504	1.60	201.0	106.0	2.68	36.78	3539.5	6743.7	134.66	152.70	0.568	0.332	0.633
20		0.802	1095.0	6.10	141.3	1.376	1.47	204.0	100.0	2.68	34.20	3600.6	6370.3	134.66	159.17	0.615	0.354	0.627
21		0.802	1095.0	6.10	138.8	1.352	1.44	198.0	100.0	2.68	33.61	3334.4	6056.3	134.66	145.35	0.602	0.373	0.677
22		0.802	1095.0	6.10	136.4	1.329	1.42	200.0	100.0	2.68	33.02	3342.8	6017.0	134.66	145.79	0.608	0.375	0.675
23		0.802	1095.0	6.10	135.2	1.317	1.41	201.0	100.0	2.68	32.73	3346.0	5996.4	134.66	145.96	0.611	0.376	0.674
24		0.802	1095.0	6.10	134.6	1.307	1.40	201.0	99.0	2.68	32.58	3363.6	5968.7	134.66	147.41	0.617	0.379	0.672
25	Propinec	0.802	1095.0	6.10	132.7	1.293	1.38	201.0	100.0	2.68	32.14	3285.8	5888.4	134.66	142.83	0.612	0.383	0.687
26		0.802	1095.0	6.10	132.7	1.293	1.38	202.0	100.0	2.68	32.14	3318.3	5920.9	134.66	144.52	0.614	0.381	0.680
27		0.802	1095.0	6.10	132.7	1.289	1.38	201.0	99.0	2.68	32.14	3317.9	5887.7	134.66	145.04	0.618	0.384	0.681
28		0.802	1095.0	6.10	132.7	1.289	1.38	203.0	99.0	2.68	32.14	3383.0	5952.8	134.66	148.42	0.622	0.380	0.668
29		0.802	1095.0	6.10	132.7	1.289	1.38	202.0	99.0	2.68	32.14	3350.5	5920.2	134.66	146.73	0.620	0.382	0.674
30		0.768	1117.1	8.23	152.1	1.517	1.61	252.0	109.0	3.25	28.45	4122.8	6688.7	174.26	243.20	0.667	0.334	0.541
31		0.768	1117.1	8.23	152.2	1.487	1.59	255.0	101.0	3.25	28.48	4440.2	6775.6	174.26	269.43	0.709	0.333	0.508
32		0.768	1117.1	8.23	152.2	1.491	1.59	249.0	102.0	3.25	28.48	4238.9	6603.4	174.26	255.30	0.696	0.341	0.531
33		0.768	1117.1	8.23	151.9	1.484	1.58	245.0	101.0	3.25	28.42	4143.6	6474.3	174.26	249.52	0.695	0.348	0.544
34		0.768	1117.1	8.23	152.8	1.497	1.60	241.0	102.0	3.25	28.59	4024.2	6398.2	174.26	240.89	0.683	0.352	0.559
35		0.768	1117.1	8.23	153.6	1.496	1.60	248.0	100.0	3.25	28.74	4305.1	6632.2	174.26	260.98	0.703	0.340	0.524
36		0.768	1117.1	8.23	166.2	1.619	1.73	247.0	100.0	3.25	31.10	4627.7	7146.2	174.26	282.65	0.698	0.316	0.488

Ogled	Suspenzija	x_0 kg _{H2O} /kg _{SUS}	ρ_{SUS} kg/ m ³	G_{SUS} kg/h	V_0 m ³ /h	$\frac{U}{(T_{gc})}$ m/s	$\frac{U}{U_{mf}(T_{gc})}$	T_{gi} °C	T_{gc} °C	x_f %	SV kg _{vaz} /kg _{H2O}	q kJ/kg _{H2O}	q' kJ/kg _{H2O}	$W_{H2O,exp}$ kg/m ² h	$W_{H2O,cal}$ kg/m ² h jednačina (3.9)	η_T	η_E	η_D
37		0.768	1117.1	8.23	170.8	1.664	1.78	251.0	100.0	3.25	31.96	4884.2	7471.9	174.26	299.88	0.702	0.302	0.462
38	Propineb	0.768	1117.1	8.23	173.8	1.698	1.81	251.0	101.0	3.25	32.52	4938.9	7605.9	174.26	302.92	0.697	0.296	0.456
39		0.768	1117.1	8.23	174.7	1.707	1.82	252.0	101.0	3.25	32.70	4998.0	7679.0	174.26	306.88	0.698	0.294	0.451

Prečnik inertnih staklenih sfera $d_p=1.94$ mm

Statička visina sloja inertnog materijala $H_0=122$ mm

Ukupna površina inertnih čestica $A_p=8.54$ m²

Ogled	Suspenzija	x_0 kg _{H2O} /kg _{SUS}	ρ_{SUS} kg/ m ³	G_{SUS} kg/h	V_0 m ³ /h	$\frac{U}{(T_{gc})}$ m/s	$\frac{U}{U_{mf}(T_{gc})}$	T_{gi} °C	T_{gc} °C	x_f %	SV kg _{vaz} /kg _{H2O}	q kJ/kg _{H2O}	q' kJ/kg _{H2O}	$W_{H2O,exp}$ kg/m ² h	$W_{H2O,cal}$ kg/m ² h jednačina (3.9)	η_T	η_E	η_D
1		0.750	1100.0	28.82	228.0	2.196	2.29	302.0	95.9	0.53	12.49	2603.9	3562.4	595.37	569.38	0.822	0.637	0.871
2	NaCl	0.750	1100.0	23.14	210.6	2.132	2.20	308.8	114.7	1.17	14.37	2827.4	4206.2	477.96	478.56	0.747	0.527	0.784
3		0.750	1100.0	21.12	197.8	2.042	2.10	305.7	122.2	0.17	14.78	2751.8	4285.7	436.30	415.51	0.713	0.512	0.797
4		0.750	1100.0	26.95	191.7	1.764	1.86	301.8	79.5	0.20	11.23	2520.6	3195.0	556.74	525.97	0.894	0.723	0.917

Prečnik inertnih staklenih sfera $d_p=1.94$ mm

Statička visina sloja inertnog materijala $H_0=122$ mm

Ukupna površina inertnih čestica $A_p=8.54$ m²

Ogled	Suspenzija	x_0 kg _{H2O} /kg _{SUS}	ρ_{SUS} kg/ m ³	G_{SUS} kg/h	V_0 m ³ /h	$\frac{U}{(T_{gc})}$ m/s	$\frac{U}{U_{mf}(T_{gc})}$	T_{gi} °C	T_{gc} °C	x_f %	SV kg _{vaz} /kg _{H2O}	q kJ/kg _{H2O}	q' kJ/kg _{H2O}	$W_{H2O,exp}$ kg/m ² h	$W_{H2O,cal}$ kg/m ² h jednačina (3.9)	η_T	η_E	η_D
1	Mankozeb	0.700	1200.0	25.63	231.4	2.198	2.30	253.6	90.8	1.53	15.27	2513.8	3606.1	494.21	453.99	0.791	0.633	0.908
2		0.700	1200.0	46.46	231.4	2.156	2.26	260.0	83.7		8.42	1500.2	2042.4	895.85	495.54	0.872	1.126	1.533



PRILOG 3

Sušenje suspenzija u fontanskom sloju inertnih čestica sa cevnim umetkom

Tabela P3.1. Pregled eksperimentalnih uslova za sušenje vodenih suspenzija u sušnici sa fontanskim slojem i cevnim umetkom
 Napomena: Ostali parametri za ogledе 1 do 19 dati su u Tabeli 4.10 u Poglavlju 4.4.1.

Ogl.	Suspenzija	$-dp_a/dz$ Pa/m $z_1=250$ mm	T_{aH} °C $z_1=805$ mm	T_a °C $z_1=620$ mm	T_a °C $z_1=450$ mm	T_a °C $z_1=290$ mm	T_a °C $z_1=110$ mm	T_{pl} °C	G_{H_2Oisp} kg/h	q kJ/kg H_2O_{isp}	q' kJ/kg H_2O_{isp}	r_w kJ/kg H_2O_{isp} (T_{g1})	η_T	η_E	η_D
1		1090	70.7	70.7	70.0	71.0	73.0	68.7	4.78	2363.1	15186.1	2211.1	0.225	0.288	1.327
2		1003	56.0	55.3	55.0	42.0	37.4	38.1	3.96	1299.0	5345.0	2245.0	0.320	0.251	0.798
3		872	54.0	46.5	45.5	32.0	32.0	35	3.15	899.5	3877.1	2261.1	0.334	0.210	0.627
4		1090	74.0	76.0	75.0	55.5	50.5	51.2	6.22	2507.3	11089.7	2194.1	0.364	0.299	0.867
5		1003	78.0	73.5	72.5	50.5	44.5	44.4	6.91	1850.5	6680.3	2197.9	0.395	0.330	0.893
6	voda, $x_0=1$	916	66.0	59.0	58.5	43.7	38.0	41.3	5.13	1106.2	4426.9	2200.0	0.390	0.250	0.666
7		872	74.3	64.0	63.0	48.0	37.8	42.9	5.51	1186.6	5047.7	2154.2	0.385	0.227	0.611
8		916	77.0	67.5	66.0	67.0	70.0	64.8	9.58	2206.7	9642.4	2119.1	0.331	0.374	1.231
9		1395	65.3	75.7	75.3	77.3	78.7	77.1	5.85	2485.4	17395.9	2218.1	0.355	0.342	1.028
10		1395	69.0	80.5	80.5	82.0	85.0	83.7	6.81	2418.9	17572.3	2192.2	0.374	0.352	1.011
11		1090	37.3	71.0	69.7	70.3	75.0	73.7	5.58	2446.5	16526.3	2216.1	0.347	0.332	1.016
12		1046	41.7	73.7	72.3	73.0	78.3	75.6	6.76	2355.5	14029.4	2194.2	0.351	0.371	1.141
13	kalcijum(II)-karbonat, $x_0=0.70$	567	53.5	52.5	53.0	54.5	56.0	43	4.12	1303.6	6621.4	2182.7	0.134	0.244	1.854
14		1046	50.0	56.0	55.5	55.0	56.0	53.9	5.86	2464.2	11488.3	2230.1	0.342	0.340	1.055
15		872	40.5	42.5	41.5	42.5	43.0	43	6.58	1365.2	5007.0	2218.4	0.405	0.332	0.870
16	kalcijum(II)-stearat, $x_0=0.82$	1526	41.0	44.5	44.0	46.0	47.0	45.3	8.05	1541.5	4785.3	2246.5	0.503	0.419	0.918
17		1657	51.5	54.0	52.5	55.0	58.3	57.5	7.63	2653.0	11180.2	2245.7	0.495	0.404	0.894
18	Cineb, $x_0=0.75$	1003	36.0	45.5	45.0	46.0	45.5	44.3	6.88	919.0	3275.1	2206.1	0.393	0.343	0.932
19		959	55.0	56.5	53.0	55.5	35.0	39.7	3.50	883.8	3988.5	2183.5	0.322	0.1902	0.601

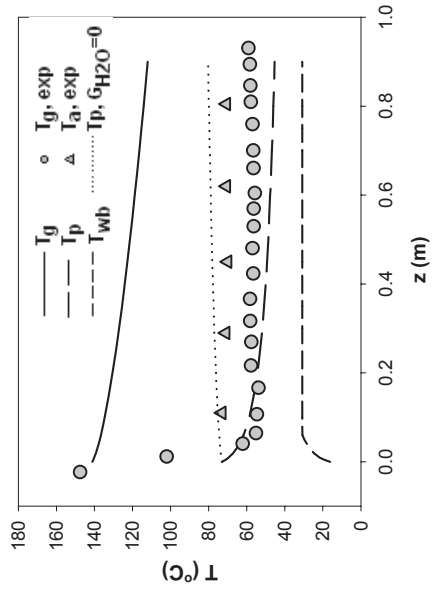
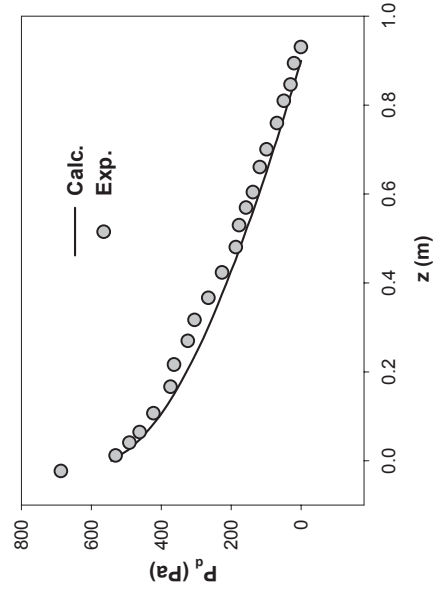
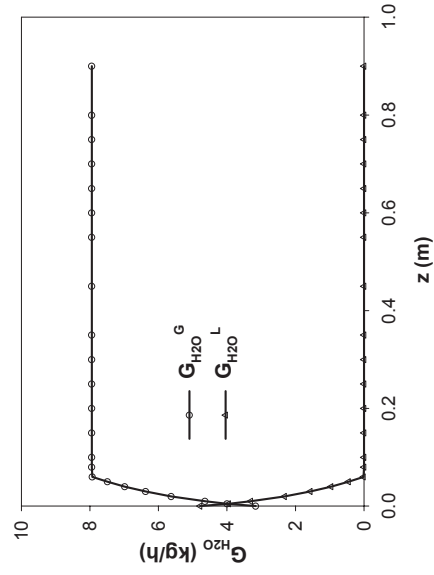
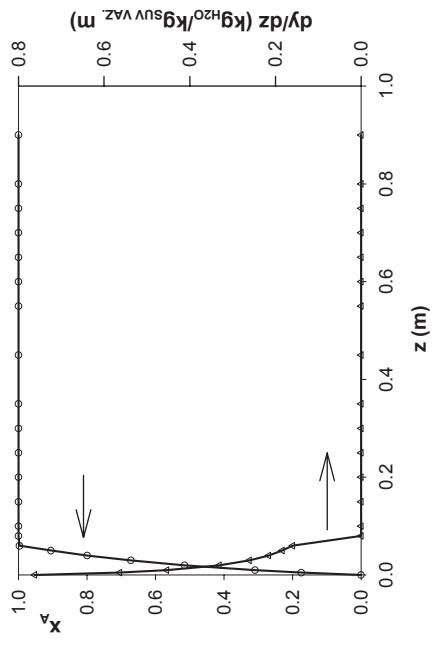
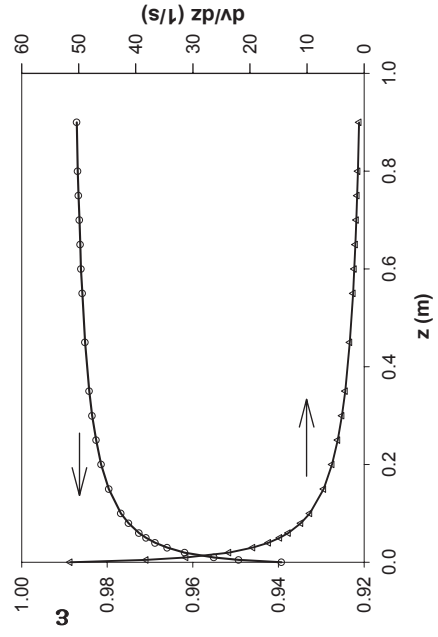
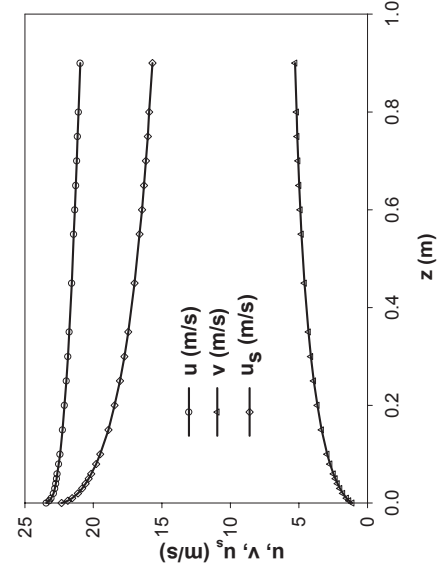
Tabela P3.4. Izračunati hidrodinamički parametri i parametri sušenja u fontanskom sloju inertnih čestica sa cevnim umetkom i karakteristični dijagrami za 19 izvršenih oglada (ogledi 1-12: doziranje tečne faze vode, ogledi 13-19: sušenje vodenih suspenzija)

Ogled 1.

Suspenzija _ Voda, $y_0 = 0.01237 \text{ kgH}_2\text{O/kgSUV.VAZ.}$, $y_c = 0.03111 \text{ kgH}_2\text{O/kgSUV.VAZ.}$

z mm	u m/s	ε -	v m/s	T_g °C	T_p °C	T_{wb} °C	y kg/kg	x_A -	$G_{H_2O}^G$ kg/h	$G_{H_2O}^L$ kg/h	dy/dz kg/kgm	dP _d /dz Pa/m	dv/dz 1/s	T_p ($G_{H_2O}=0$) °C
0	23.44	0.9393	1.12	141.1	73.0	16.2	0.01237	0.000	3.159	4.783	0.762	2568.2	51.49	73.0
5	23.21	0.9493	1.34	140.5	71.0	19.3	0.01564	0.174	3.993	3.948	0.564	2290.5	38.19	73.2
10	23.07	0.9551	1.52	140.1	69.4	21.6	0.01817	0.309	4.639	3.303	0.454	2047.1	31.22	73.3
20	22.91	0.9619	1.79	139.2	67.0	24.7	0.02203	0.515	5.624	2.317	0.331	1713.4	23.68	73.6
30	22.81	0.9660	2.00	138.5	65.2	26.8	0.02497	0.672	6.373	1.568	0.261	1498.9	19.49	73.8
40	22.74	0.9688	2.18	137.8	63.8	28.4	0.02734	0.799	6.979	0.962	0.216	1348.1	16.75	74.0
50	22.68	0.9709	2.34	137.2	62.6	29.7	0.02934	0.905	7.488	0.453	0.184	1235.0	14.78	74.2
60	22.64	0.9726	2.48	136.6	61.6	30.7	0.03106	0.997	7.927	0.015	0.160	1146.4	13.27	74.4
80	22.52	0.9750	2.72	135.6	60.0	30.8	0.03112	1.000	7.943	0.000	0.000	1013.5	11.07	74.7
100	22.43	0.9768	2.93	134.6	58.6	30.8	0.03112	1.000	7.943	0.000	0.000	918.8	9.53	75.0
150	22.24	0.9796	3.34	132.4	56.1	30.8	0.03112	1.000	7.943	0.000	0.000	766.7	7.09	75.6
200	22.10	0.9814	3.65	130.5	54.3	30.8	0.03112	1.000	7.943	0.000	0.000	674.4	5.62	76.1
250	21.97	0.9826	3.91	128.7	52.9	30.8	0.03112	1.000	7.943	0.000	0.000	611.5	4.62	76.5
300	21.86	0.9835	4.12	127.1	51.7	30.8	0.03112	1.000	7.943	0.000	0.000	565.4	3.88	77.0
350	21.76	0.9842	4.30	125.5	50.8	30.8	0.03112	1.000	7.943	0.000	0.000	530.1	3.32	77.3
450	21.58	0.9852	4.59	122.7	49.2	30.8	0.03112	1.000	7.943	0.000	0.000	479.3	2.50	78.0
550	21.43	0.9858	4.81	120.0	48.1	30.8	0.03112	1.000	7.943	0.000	0.000	444.5	1.94	78.6
600	21.35	0.9861	4.90	118.8	47.6	30.8	0.03112	1.000	7.943	0.000	0.000	430.9	1.72	78.9
650	21.28	0.9863	4.98	117.6	47.1	30.8	0.03112	1.000	7.943	0.000	0.000	419.2	1.53	79.1
700	21.21	0.9865	5.05	116.4	46.7	30.8	0.03112	1.000	7.943	0.000	0.000	408.9	1.37	79.4
750	21.15	0.9867	5.12	115.3	46.3	30.8	0.03112	1.000	7.943	0.000	0.000	399.9	1.22	79.6
800	21.09	0.9869	5.17	114.2	46.0	30.8	0.03112	1.000	7.943	0.000	0.000	391.9	1.10	79.9
900	20.96	0.9871	5.27	112.0	45.3	30.8	0.03112	1.000	7.943	0.000	0.000	378.5	0.88	80.3

Ogled 1.

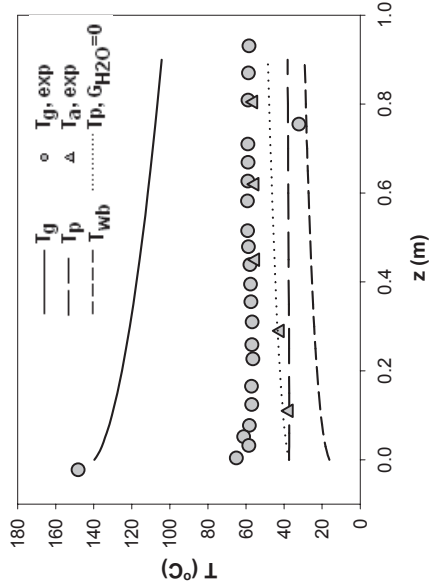
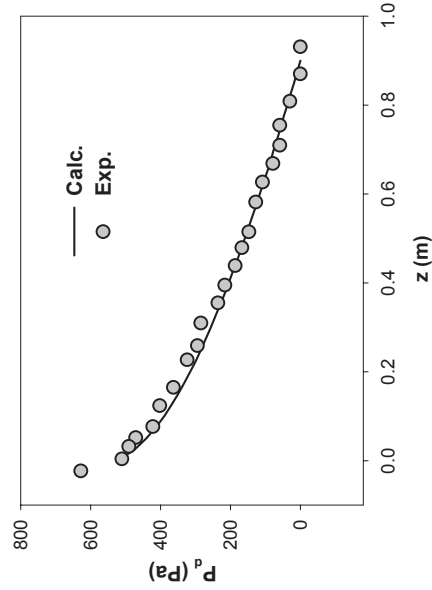
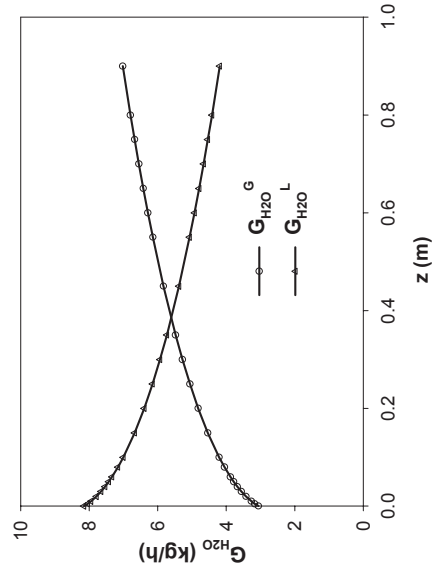
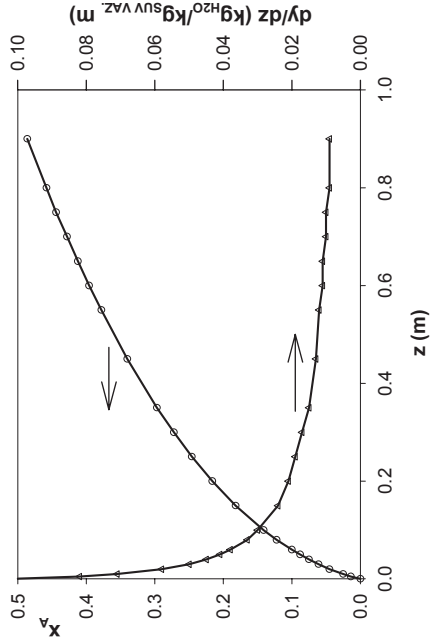
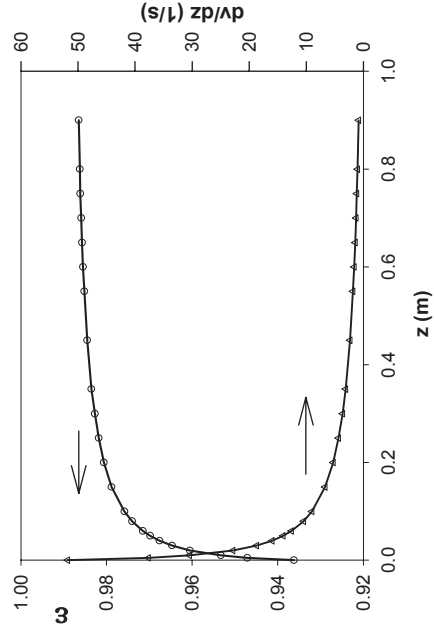
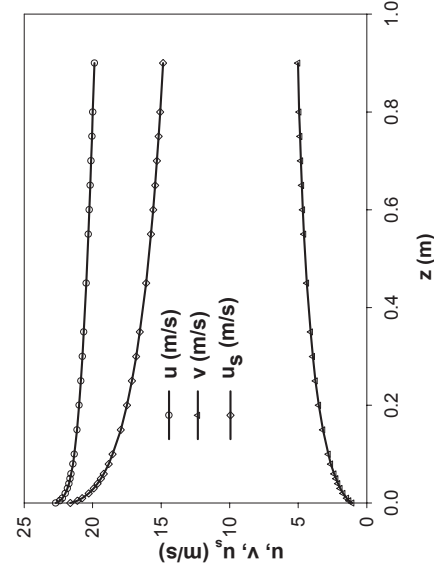


Ogled 2.

Suspenzija _ Voda, $y_0 = 0.01237 \text{ kg}_{\text{H}_2\text{O}}/\text{kg}_{\text{SUV.VAZ.}}$, $y_c = 0.04536 \text{ kg}_{\text{H}_2\text{O}}/\text{kg}_{\text{SUV.VAZ.}}$.

z mm	u m/s	ε -	v m/s	T_g °C	T_p °C	T_{wb} °C	y kg/kg	x_A -	$G_{\text{H}_2\text{O}}^G$ kg/h	$G_{\text{H}_2\text{O}}^L$ kg/h	dy/dz kg/kgm	dP _d /dz Pa/m	dv/dz 1/s	T_p ($G_{\text{H}_2\text{O}}=0$) °C
0	22.69	0.9362	1.06	139.7	37.4	16.2	0.01237	0.000	3.058	8.153	0.102	2530.5	51.82	37.4
5	22.39	0.9471	1.28	138.8	37.4	16.6	0.01283	0.014	3.171	8.040	0.082	2254.8	37.65	37.7
10	22.21	0.9533	1.45	138.1	37.4	17.0	0.01321	0.025	3.265	7.946	0.071	2006.3	30.47	37.9
20	21.99	0.9605	1.71	136.8	37.3	17.6	0.01385	0.045	3.423	7.788	0.058	1668.8	22.86	38.3
30	21.84	0.9647	1.92	135.8	37.3	18.2	0.01439	0.061	3.556	7.655	0.050	1454.4	18.70	38.7
40	21.73	0.9676	2.09	134.8	37.3	18.6	0.01486	0.075	3.673	7.538	0.045	1304.6	16.00	39.0
50	21.64	0.9698	2.24	134.0	37.3	19.0	0.01529	0.088	3.779	7.432	0.041	1192.9	14.07	39.3
60	21.57	0.9715	2.38	133.2	37.3	19.4	0.01568	0.100	3.876	7.335	0.038	1105.7	12.60	39.5
80	21.44	0.9740	2.61	131.7	37.3	20.0	0.01639	0.122	4.051	7.160	0.033	976.9	10.49	40.0
100	21.34	0.9758	2.80	130.4	37.3	20.6	0.01702	0.141	4.206	7.005	0.030	885.2	9.02	40.4
150	21.14	0.9788	3.19	127.6	37.3	21.7	0.01836	0.182	4.538	6.673	0.024	738.2	6.70	41.3
200	20.99	0.9806	3.49	125.2	37.4	22.7	0.01949	0.216	4.817	6.394	0.021	649.1	5.30	42.1
250	20.86	0.9818	3.73	123.0	37.4	23.5	0.02048	0.246	5.061	6.150	0.019	588.4	4.35	42.8
300	20.75	0.9827	3.93	121.0	37.4	24.2	0.02136	0.272	5.279	5.932	0.017	544.0	3.66	43.4
350	20.65	0.9835	4.09	119.2	37.5	24.8	0.02216	0.297	5.478	5.733	0.015	509.9	3.12	44.0
450	20.47	0.9845	4.37	115.9	37.6	25.8	0.02360	0.340	5.832	5.380	0.013	461.0	2.35	45.0
550	20.31	0.9852	4.57	112.9	37.7	26.7	0.02485	0.378	6.142	5.069	0.012	427.5	1.82	45.9
600	20.24	0.9855	4.66	111.6	37.8	27.1	0.02543	0.396	6.285	4.926	0.011	414.3	1.62	46.3
650	20.17	0.9857	4.73	110.2	37.8	27.5	0.02598	0.412	6.421	4.790	0.011	403.1	1.44	46.7
700	20.11	0.9859	4.80	109.0	37.9	27.9	0.02651	0.428	6.551	4.660	0.010	393.3	1.28	47.1
750	20.05	0.9861	4.86	107.7	37.9	28.2	0.02701	0.444	6.675	4.536	0.010	384.5	1.15	47.5
800	19.99	0.9862	4.92	106.6	38.0	28.5	0.02749	0.458	6.795	4.416	0.009	377.1	1.03	47.8
900	19.87	0.9865	5.01	104.3	38.1	29.1	0.02841	0.486	7.020	4.191	0.009	364.3	0.83	48.5

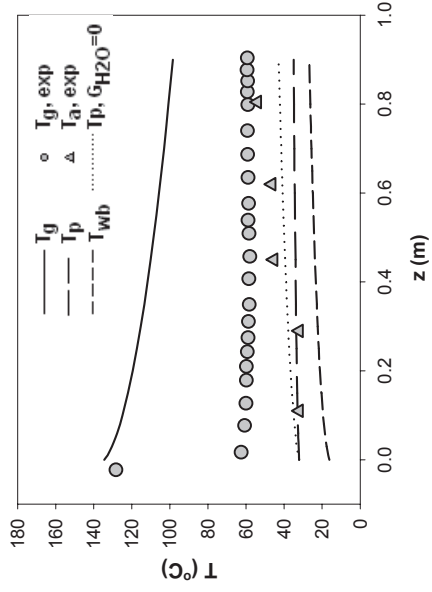
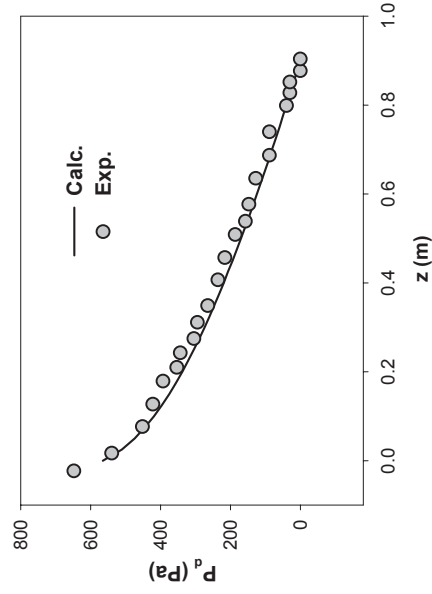
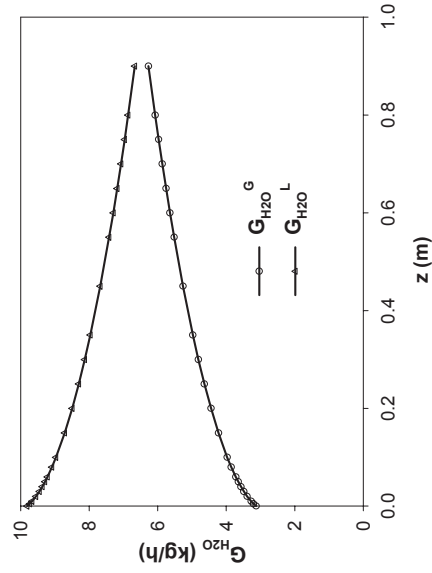
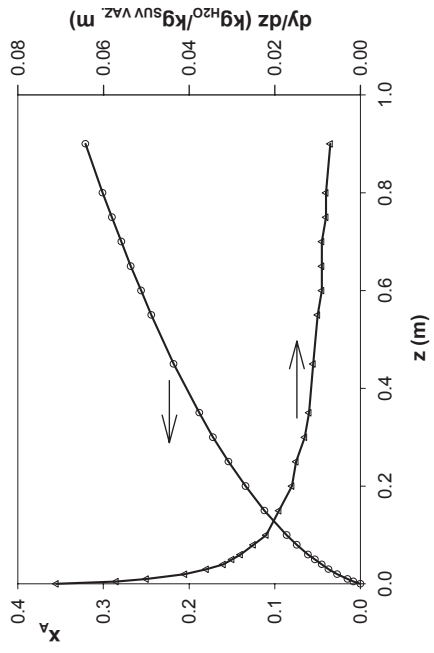
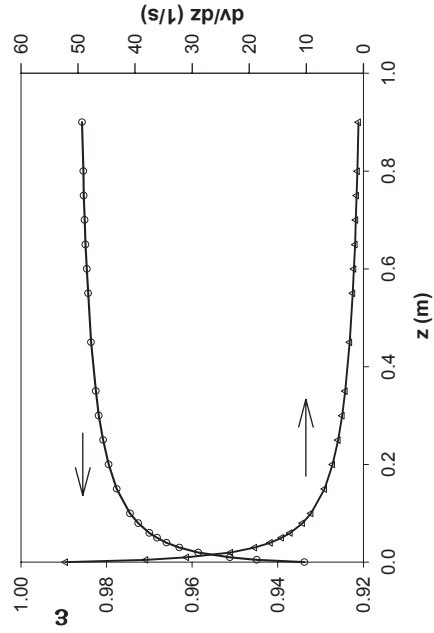
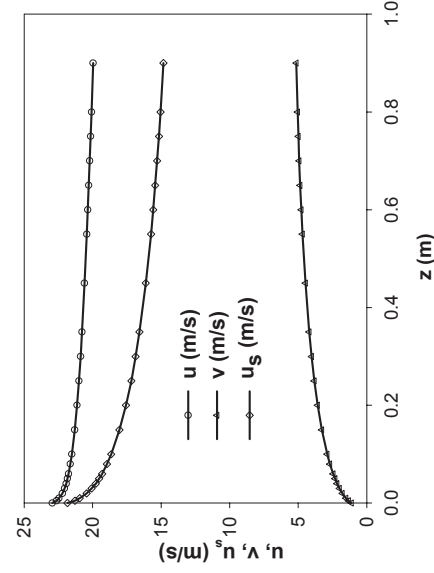
Ogled 2.



Ogled 3.Suspenzija _ Voda, $y_0 = 0.01237 \text{ kg}_{\text{H}_2\text{O}}/\text{kg}_{\text{SUV.VAZ}}$, $y_c = 0.05124 \text{ kg}_{\text{H}_2\text{O}}/\text{kg}_{\text{SUV.VAZ}}$.

z mm	u m/s	ϵ -	v m/s	T_g °C	T_p °C	T_{wb} °C	y kg/kg	x_A -	$G_{\text{H}_2\text{O}}^G$ kg/h	$G_{\text{H}_2\text{O}}^L$ kg/h	dy/dz kg/kgm	dP _a /dz Pa/m	dv/dz 1/s	T_p ($G_{\text{H}_2\text{O}}=0$) °C
0	22.95	0.9338	1.11	134.4	32.0	16.2	0.01237	0.000	3.125	9.814	0.071	2802.7	52.17	32.0
5	22.63	0.9449	1.33	133.5	32.1	16.5	0.01269	0.008	3.205	9.734	0.057	2474.3	38.14	32.3
10	22.45	0.9512	1.50	132.7	32.1	16.8	0.01296	0.015	3.272	9.667	0.050	2196.2	30.94	32.5
20	22.21	0.9586	1.77	131.5	32.2	17.2	0.01341	0.027	3.386	9.552	0.041	1822.9	23.26	32.9
30	22.05	0.9630	1.98	130.4	32.3	17.6	0.01380	0.037	3.484	9.455	0.036	1586.7	19.04	33.3
40	21.93	0.9660	2.16	129.4	32.4	17.9	0.01414	0.045	3.570	9.369	0.032	1421.9	16.30	33.6
50	21.84	0.9682	2.31	128.5	32.5	18.2	0.01445	0.053	3.648	9.291	0.030	1299.1	14.33	33.8
60	21.76	0.9700	2.45	127.7	32.5	18.5	0.01473	0.061	3.721	9.218	0.028	1203.2	12.84	34.1
80	21.63	0.9726	2.68	126.2	32.7	19.0	0.01525	0.074	3.852	9.087	0.025	1061.6	10.69	34.5
100	21.52	0.9745	2.88	124.9	32.8	19.4	0.01572	0.086	3.970	8.969	0.022	961.0	9.19	34.9
150	21.31	0.9776	3.27	122.0	33.0	20.3	0.01673	0.112	4.225	8.714	0.019	799.5	6.82	35.8
200	21.14	0.9795	3.58	119.5	33.2	21.1	0.01759	0.134	4.443	8.496	0.016	701.6	5.40	36.6
250	21.00	0.9808	3.82	117.3	33.4	21.7	0.01836	0.154	4.636	8.303	0.015	635.0	4.44	37.3
300	20.88	0.9818	4.02	115.3	33.6	22.3	0.01905	0.172	4.811	8.128	0.013	586.2	3.73	37.9
350	20.78	0.9825	4.20	113.4	33.7	22.8	0.01969	0.188	4.972	7.967	0.012	548.9	3.19	38.4
450	20.59	0.9836	4.47	110.1	34.0	23.8	0.02084	0.218	5.262	7.677	0.011	495.1	2.40	39.4
550	20.42	0.9843	4.69	107.1	34.3	24.5	0.02186	0.244	5.521	7.418	0.010	458.2	1.87	40.3
600	20.35	0.9846	4.77	105.7	34.4	24.9	0.02234	0.256	5.641	7.298	0.009	443.9	1.66	40.7
650	20.28	0.9849	4.85	104.4	34.5	25.2	0.02280	0.268	5.756	7.183	0.009	431.4	1.48	41.1
700	20.21	0.9851	4.92	103.1	34.6	25.6	0.02323	0.279	5.867	7.072	0.009	420.6	1.32	41.4
750	20.14	0.9853	4.98	101.9	34.7	25.9	0.02365	0.290	5.973	6.966	0.008	411.2	1.18	41.8
800	20.08	0.9854	5.04	100.7	34.8	26.2	0.02406	0.301	6.076	6.863	0.008	402.8	1.06	42.1
900	19.96	0.9857	5.13	98.4	35.0	26.7	0.02483	0.321	6.271	6.668	0.007	388.7	0.86	42.8

Ogled 3.

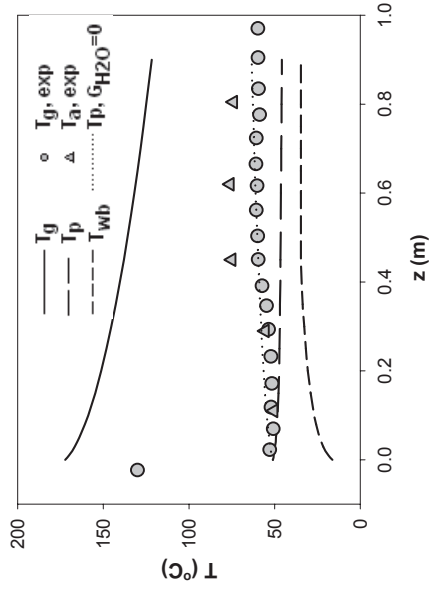
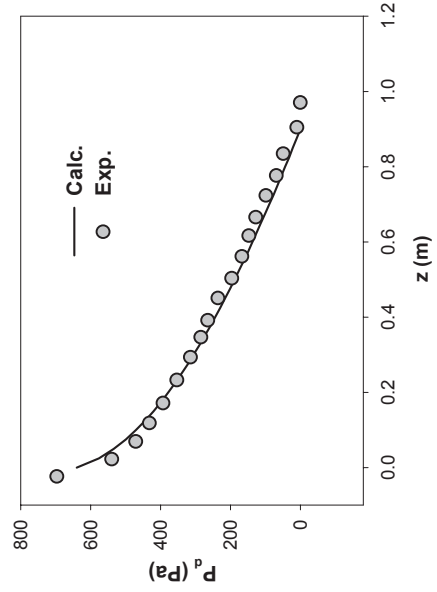
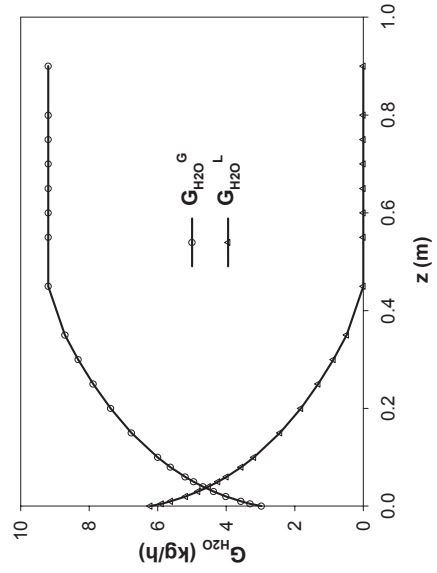
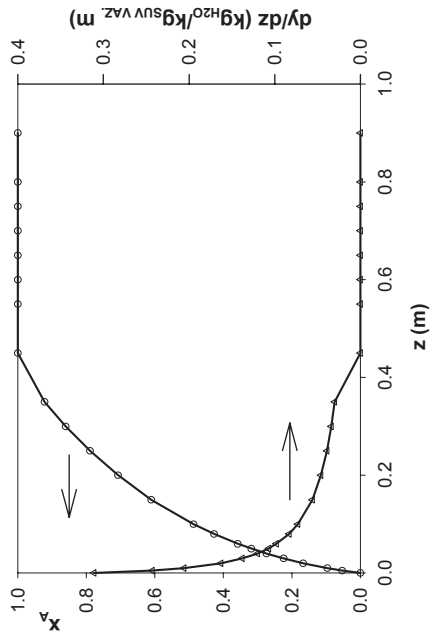
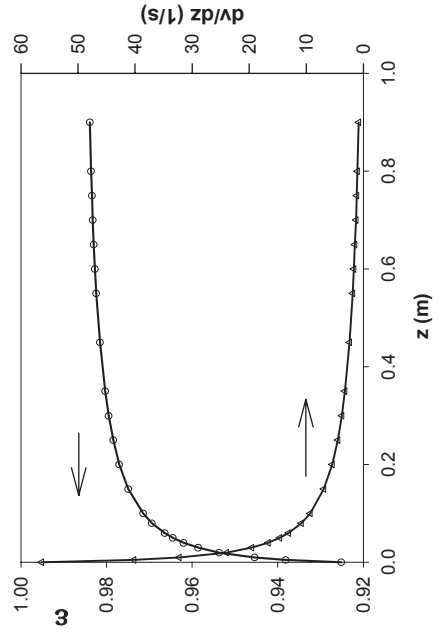
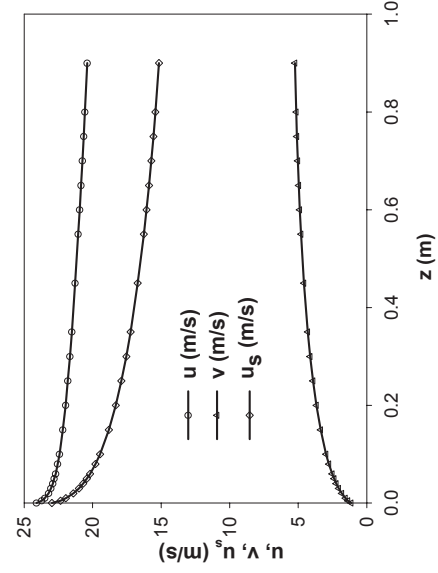


Ogled 4.

Suspenzija _ Voda, $y_0 = 0.01237 \text{ kg}_{\text{H}_2\text{O}}/\text{kg}_{\text{SUV.VAZ.}}$, $y_c = 0.03824 \text{ kg}_{\text{H}_2\text{O}}/\text{kg}_{\text{SUV.VAZ.}}$.

z mm	u m/s	ε -	v m/s	T_g °C	T_p °C	T_{wb} °C	y kg/kg	x_A -	$G_{\text{H}_2\text{O}^G}$ kg/h	$G_{\text{H}_2\text{O}^L}$ kg/h	dy/dz kg/kgm	dP _d /dz Pa/m	dv/dz 1/s	T_p ($G_{\text{H}_2\text{O}}=0$) °C
0	24.10	0.9252	1.13	172.3	51.0	16.2	0.01237	0.000	2.975	6.219	0.311	3442.1	56.40	51.0
5	23.72	0.9382	1.37	171.0	50.6	17.5	0.01374	0.053	3.304	5.890	0.243	2977.4	40.22	51.3
10	23.50	0.9454	1.55	170.0	50.4	18.6	0.01486	0.096	3.573	5.621	0.206	2610.9	32.27	51.6
20	23.22	0.9537	1.82	168.1	49.9	20.3	0.01669	0.167	4.011	5.183	0.163	2139.2	24.01	52.1
30	23.04	0.9586	2.04	166.6	49.6	21.6	0.01818	0.224	4.371	4.823	0.138	1849.0	19.55	52.5
40	22.91	0.9620	2.22	165.2	49.3	22.7	0.01947	0.274	4.680	4.515	0.120	1649.4	16.68	52.8
50	22.80	0.9645	2.38	164.0	49.0	23.6	0.02060	0.318	4.953	4.241	0.107	1501.9	14.64	53.1
60	22.70	0.9664	2.51	162.8	48.8	24.4	0.02162	0.358	5.199	3.995	0.098	1387.5	13.10	53.4
80	22.55	0.9694	2.75	160.7	48.5	25.7	0.02342	0.427	5.631	3.564	0.083	1219.6	10.88	54.0
100	22.42	0.9714	2.96	158.8	48.2	26.8	0.02497	0.487	6.003	3.191	0.073	1100.8	9.34	54.4
150	22.17	0.9749	3.36	154.7	47.6	28.9	0.02814	0.610	6.766	2.428	0.056	911.1	6.93	55.5
200	21.97	0.9770	3.66	151.2	47.3	30.5	0.03067	0.707	7.373	1.821	0.046	796.6	5.48	56.3
250	21.81	0.9784	3.91	148.1	47.0	31.7	0.03278	0.789	7.882	1.312	0.039	718.6	4.50	57.1
300	21.66	0.9795	4.12	145.3	46.8	32.7	0.03461	0.860	8.321	0.874	0.034	661.6	3.78	57.8
350	21.52	0.9803	4.29	142.7	46.7	33.6	0.03622	0.922	8.708	0.486	0.030	618.0	3.23	58.4
450	21.28	0.9815	4.57	138.0	46.5	34.6	0.03824	1.000	9.194	0.000	0.000	554.7	2.43	59.5
550	21.05	0.9824	4.79	133.8	46.3	34.6	0.03824	1.000	9.194	0.000	0.000	510.7	1.88	60.5
600	20.94	0.9827	4.88	131.9	46.2	34.6	0.03824	1.000	9.194	0.000	0.000	493.6	1.66	61.0
650	20.84	0.9830	4.95	130.0	46.1	34.6	0.03824	1.000	9.194	0.000	0.000	478.6	1.48	61.4
700	20.74	0.9832	5.02	128.2	46.0	34.6	0.03824	1.000	9.194	0.000	0.000	465.7	1.31	61.8
750	20.65	0.9834	5.09	126.5	45.9	34.6	0.03824	1.000	9.194	0.000	0.000	454.3	1.17	62.2
800	20.56	0.9836	5.14	124.9	45.8	34.6	0.03824	1.000	9.194	0.000	0.000	444.2	1.05	62.6
900	20.39	0.9839	5.23	121.7	45.6	34.6	0.03824	1.000	9.194	0.000	0.000	427.2	0.84	63.3

Ogled 4.

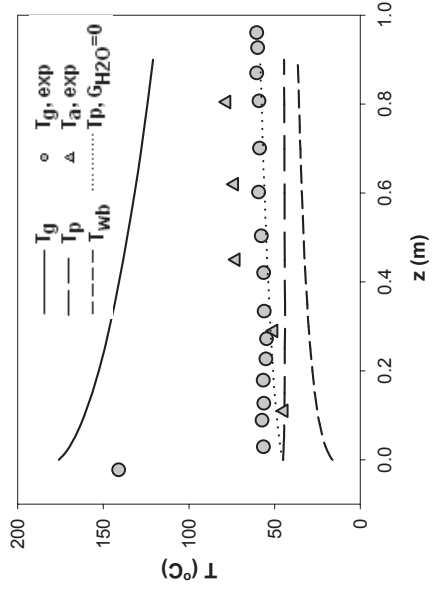
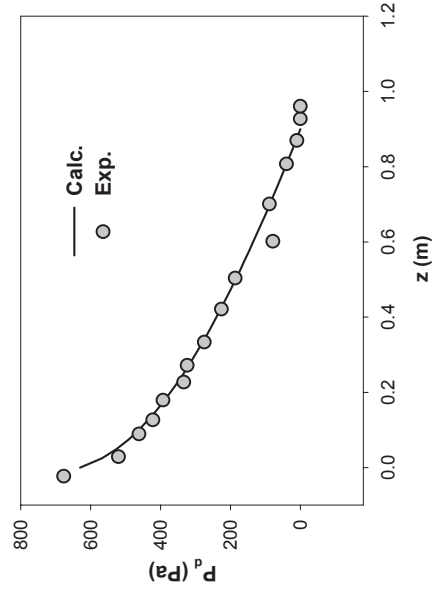
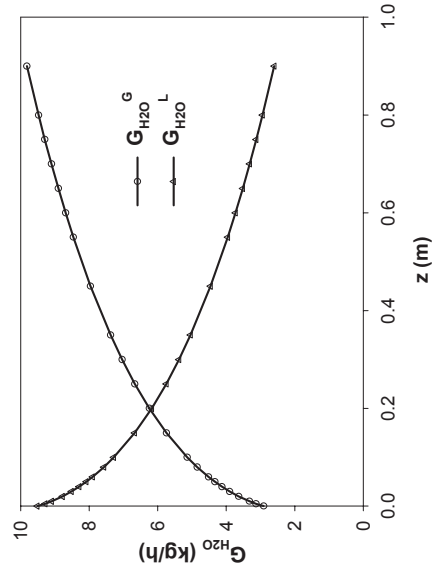
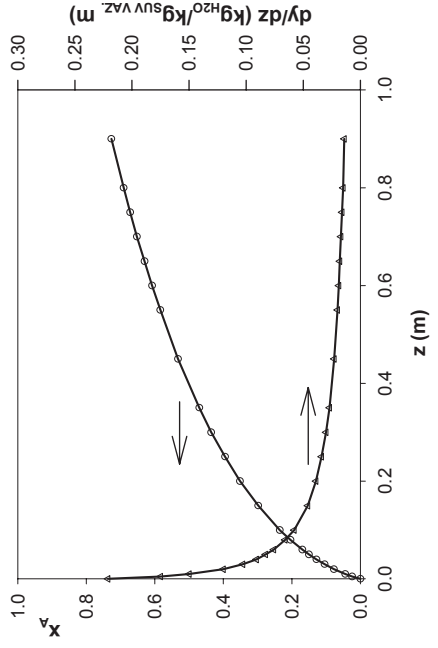
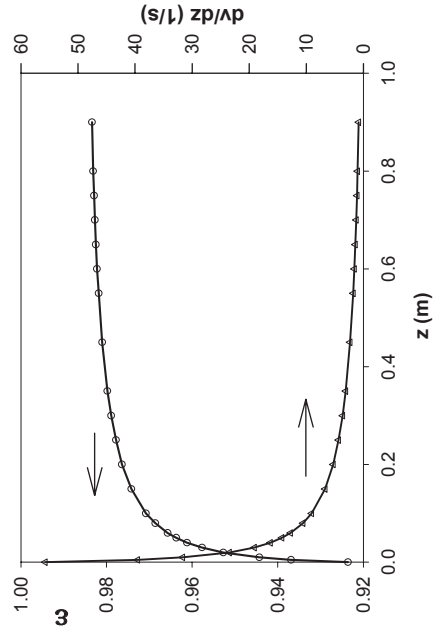
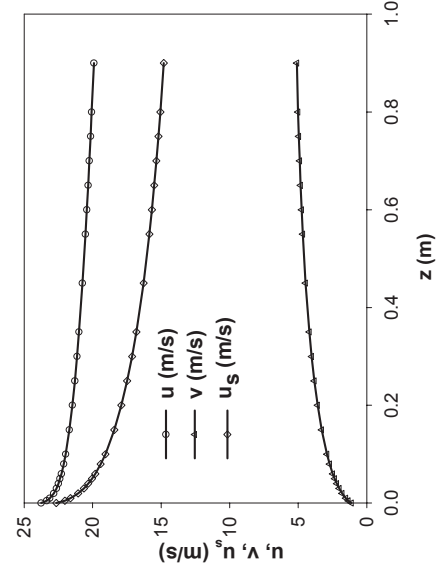


Ogled 5.

Suspenzija _ Voda, $y_0 = 0.01237 \text{ kg}_{\text{H}_2\text{O}}/\text{kg}_{\text{SUV.VAZ.}}$, $y_c = 0.05292 \text{ kg}_{\text{H}_2\text{O}}/\text{kg}_{\text{SUV.VAZ.}}$.

z mm	u m/s	ε -	v m/s	T_g °C	T_p °C	T_{wb} °C	y kg/kg	x_A -	$G_{\text{H}_2\text{O}}^G$ kg/h	$G_{\text{H}_2\text{O}}^L$ kg/h	dy/dz kg/kgm	dP _d /dz Pa/m	dv/dz 1/s	T_p ($G_{\text{H}_2\text{O}}=0$) °C
0	23.76	0.9236	1.11	176.0	45.0	16.2	0.01237	0.000	2.904	9.514	0.221	3434.7	55.75	45.0
5	23.36	0.9369	1.34	174.6	44.9	17.2	0.01335	0.024	3.133	9.284	0.175	2959.6	39.57	45.4
10	23.13	0.9443	1.52	173.4	44.8	17.9	0.01416	0.044	3.322	9.095	0.150	2589.9	31.68	45.7
20	22.84	0.9527	1.79	171.3	44.7	19.2	0.01550	0.077	3.636	8.781	0.120	2117.3	23.50	46.2
30	22.64	0.9577	2.00	169.6	44.6	20.2	0.01661	0.104	3.897	8.520	0.103	1827.7	19.11	46.6
40	22.50	0.9612	2.18	168.1	44.5	21.1	0.01758	0.128	4.125	8.292	0.091	1629.1	16.28	47.0
50	22.38	0.9637	2.33	166.7	44.4	21.8	0.01845	0.150	4.329	8.088	0.083	1482.5	14.28	47.3
60	22.28	0.9657	2.47	165.4	44.3	22.5	0.01924	0.169	4.515	7.903	0.076	1368.9	12.76	47.7
80	22.11	0.9686	2.70	163.1	44.2	23.6	0.02065	0.204	4.845	7.572	0.066	1202.4	10.58	48.2
100	21.97	0.9708	2.90	161.0	44.2	24.6	0.02189	0.235	5.135	7.282	0.058	1084.7	9.08	48.7
150	21.70	0.9742	3.28	156.5	44.0	26.5	0.02447	0.298	5.742	6.675	0.046	896.9	6.71	49.9
200	21.48	0.9764	3.58	152.6	44.0	27.9	0.02659	0.351	6.240	6.177	0.039	783.6	5.30	50.8
250	21.30	0.9778	3.82	149.2	43.9	29.1	0.02841	0.395	6.666	5.751	0.034	706.5	4.34	51.6
300	21.14	0.9789	4.02	146.2	43.9	30.1	0.03001	0.435	7.040	5.377	0.030	650.2	3.65	52.4
350	21.00	0.9798	4.19	143.3	43.9	30.9	0.03144	0.470	7.376	5.042	0.027	607.1	3.11	53.0
450	20.74	0.9810	4.46	138.3	44.0	32.4	0.03393	0.532	7.960	4.457	0.023	544.9	2.34	54.3
550	20.52	0.9818	4.66	133.8	44.1	33.5	0.03606	0.584	8.461	3.956	0.020	502.2	1.81	55.3
600	20.42	0.9822	4.75	131.7	44.1	34.0	0.03703	0.608	8.688	3.790	0.019	485.5	1.60	55.8
650	20.33	0.9825	4.83	129.7	44.1	34.5	0.03794	0.630	8.901	3.516	0.018	471.0	1.42	56.3
700	20.24	0.9827	4.89	127.8	44.2	34.9	0.03880	0.652	9.103	3.314	0.017	458.3	1.27	56.7
750	20.15	0.9829	4.95	126.0	44.2	35.3	0.03961	0.672	9.295	3.123	0.016	447.3	1.13	57.1
800	20.07	0.9831	5.01	124.2	44.3	35.7	0.04039	0.691	9.478	2.940	0.015	437.6	1.01	57.5
900	19.91	0.9834	5.10	120.9	44.4	36.4	0.04185	0.727	9.819	2.598	0.014	421.0	0.81	58.3

Ogled 5.

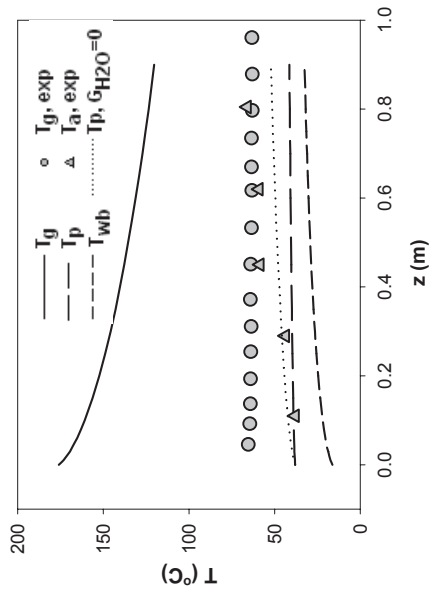
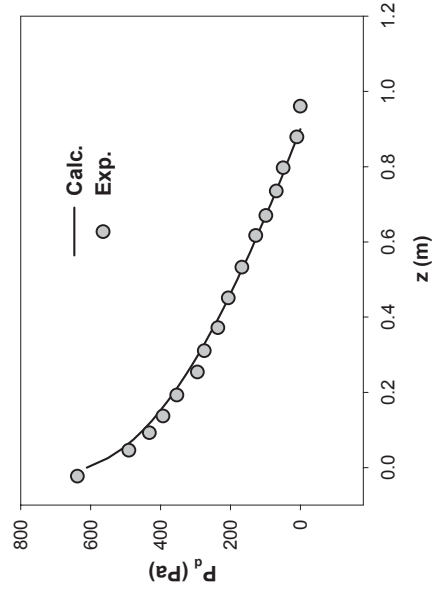
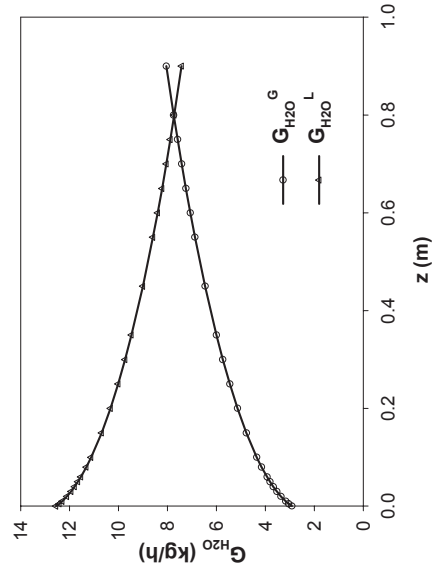
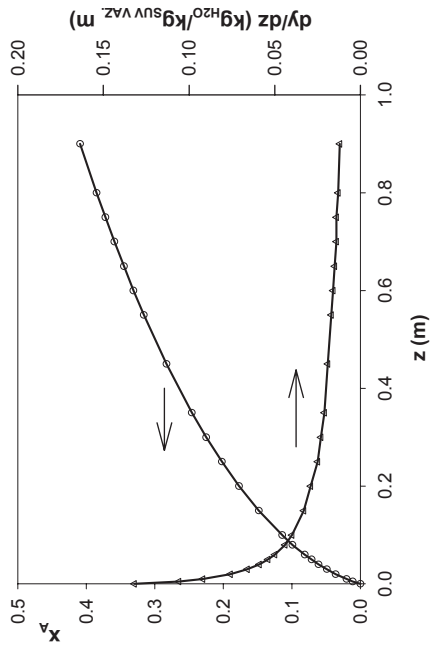
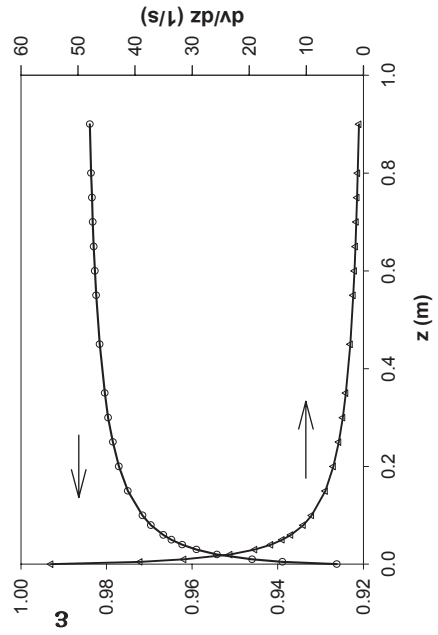
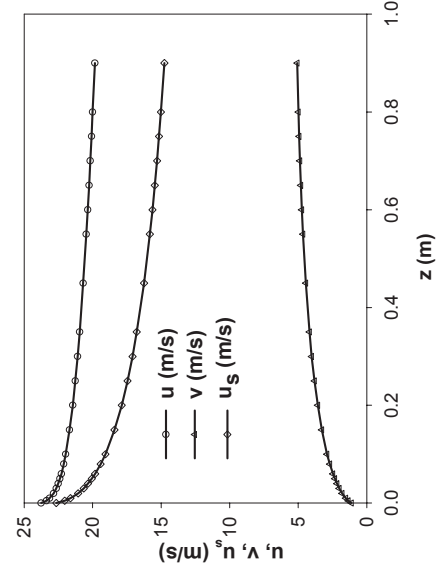


Ogled 6.

Suspenzija _ Voda, $y_0 = 0.01237 \text{ kg}_{\text{H}_2\text{O}}/\text{kg}_{\text{SUV.VAZ.}}$, $y_c = 0.06574 \text{ kg}_{\text{H}_2\text{O}}/\text{kg}_{\text{SUV.VAZ.}}$.

z mm	u m/s	ε -	v m/s	T_g °C	T_p °C	T_{wb} °C	y kg/kg	x_A -	$G_{\text{H}_2\text{O}}^G$ kg/h	$G_{\text{H}_2\text{O}}^L$ kg/h	dy/dz kg/kgm	dP _d /dz Pa/m	dv/dz 1/s	T_p ($G_{\text{H}_2\text{O}}=0$) °C
0	23.76	0.9262	1.11	176.0	38.0	16.2	0.01237	0.000	2.912	12.559	0.132	3278.5	54.74	38.0
5	23.37	0.9389	1.34	174.5	38.1	16.8	0.01296	0.011	3.051	12.421	0.106	2836.3	39.13	38.4
10	23.14	0.9460	1.52	173.3	38.1	17.3	0.01346	0.020	3.167	12.304	0.092	2488.6	31.42	38.7
20	22.85	0.9542	1.79	171.3	38.3	18.1	0.01429	0.036	3.363	12.109	0.076	2040.3	23.37	39.2
30	22.65	0.9590	2.00	169.5	38.4	18.7	0.01499	0.049	3.529	11.943	0.066	1764.0	19.03	39.7
40	22.51	0.9623	2.17	168.0	38.4	19.3	0.01562	0.061	3.675	11.796	0.059	1573.8	16.22	40.1
50	22.38	0.9648	2.32	166.6	38.5	19.8	0.01618	0.071	3.808	11.663	0.054	1433.1	14.23	40.5
60	22.28	0.9667	2.46	165.2	38.6	20.3	0.01670	0.081	3.931	11.541	0.050	1324.0	12.72	40.8
80	22.11	0.9696	2.69	162.9	38.7	21.1	0.01764	0.099	4.152	11.320	0.044	1163.7	10.55	41.4
100	21.96	0.9716	2.89	160.8	38.9	21.8	0.01848	0.114	4.350	11.122	0.040	1050.3	9.05	42.0
150	21.68	0.9750	3.27	156.2	39.1	23.3	0.02029	0.148	4.776	10.696	0.033	869.2	6.69	43.2
200	21.45	0.9771	3.57	152.3	39.3	24.5	0.02183	0.177	5.136	10.335	0.029	759.9	5.28	44.2
250	21.27	0.9785	3.81	148.8	39.5	25.5	0.02317	0.202	5.454	10.018	0.025	685.5	4.32	45.0
300	21.10	0.9796	4.01	145.7	39.7	26.4	0.02439	0.225	5.739	9.733	0.023	631.1	3.62	45.8
350	20.95	0.9804	4.17	142.8	39.9	27.2	0.02549	0.246	6.000	9.472	0.021	589.5	3.09	46.5
450	20.69	0.9816	4.44	137.7	40.2	28.5	0.02748	0.283	6.466	9.005	0.019	529.5	2.32	47.8
550	20.47	0.9824	4.64	133.2	40.5	29.6	0.02923	0.316	6.878	8.594	0.017	488.3	1.79	49.0
600	20.36	0.9827	4.73	131.1	40.6	30.1	0.03003	0.331	7.068	8.404	0.016	472.2	1.58	49.5
650	20.26	0.9830	4.80	129.1	40.7	30.6	0.03080	0.345	7.248	8.223	0.015	458.3	1.40	50.0
700	20.17	0.9832	4.87	127.1	40.8	31.0	0.03153	0.359	7.421	8.050	0.014	446.2	1.25	50.4
750	20.08	0.9834	4.93	125.3	41.0	31.4	0.03224	0.372	7.587	7.885	0.014	435.5	1.11	50.9
800	20.00	0.9836	4.98	123.5	41.1	31.8	0.03291	0.385	7.746	7.726	0.013	425.9	0.99	51.3
900	19.84	0.9839	5.07	120.2	41.3	32.5	0.03419	0.409	8.046	7.425	0.012	410.2	0.80	52.1

Ogled 6.

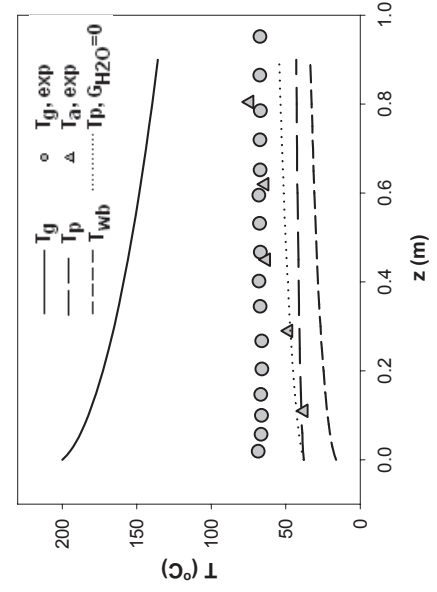
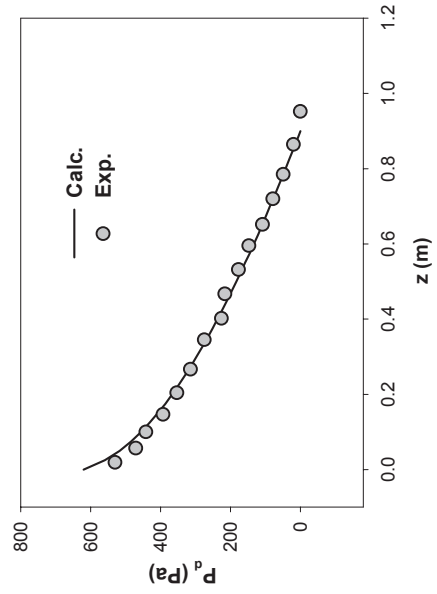
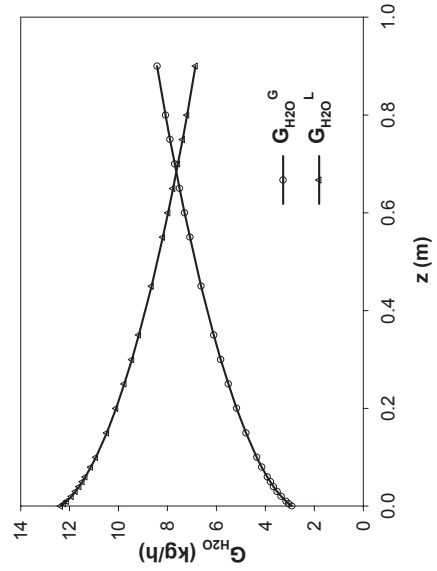
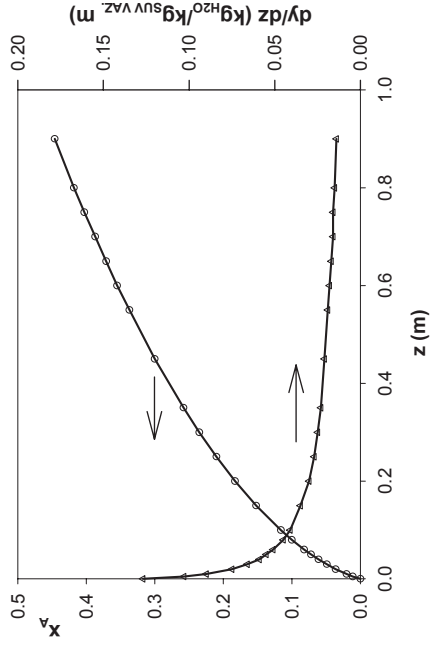
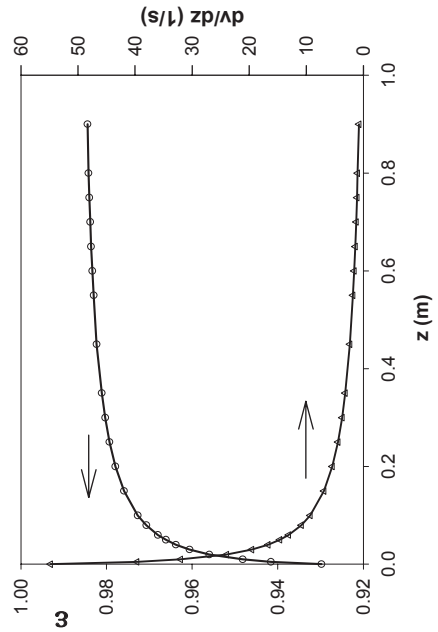
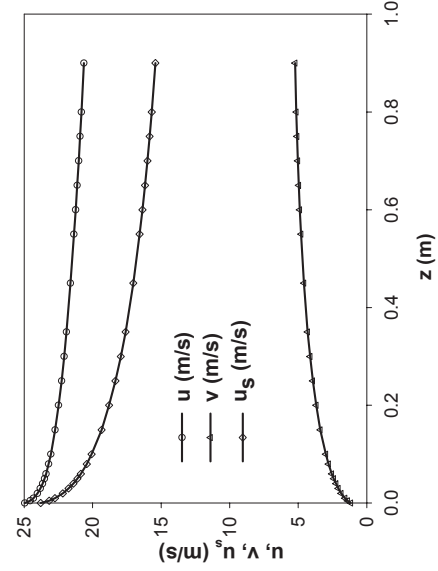


Ogled 7.

Suspenzija _ Voda, $y_0 = 0.01237 \text{ kg}_{\text{H}_2\text{O}}/\text{kg}_{\text{SUV.VAZ.}}$, $y_c = 0.06489 \text{ kg}_{\text{H}_2\text{O}}/\text{kg}_{\text{SUV.VAZ.}}$.

z mm	u m/s	ε -	v m/s	T_g °C	T_p °C	T_{wb} °C	y kg/kg	x_A -	$G_{\text{H}_2\text{O}^G}$ kg/h	$G_{\text{H}_2\text{O}^L}$ kg/h	dy/dz kg/kgm	dP _d /dz Pa/m	dv/dz 1/s	T_p ($G_{\text{H}_2\text{O}}=0$) °C
0	24.95	0.9298	1.16	200.0	37.8	16.2	0.01237	0.000	2.914	12.364	0.127	3299.5	54.79	37.8
5	24.56	0.9416	1.39	198.3	38.0	16.7	0.01294	0.011	3.048	12.230	0.103	2853.2	39.68	38.2
10	24.32	0.9482	1.57	196.9	38.1	17.2	0.01343	0.020	3.161	12.117	0.090	2508.2	32.04	38.6
20	24.02	0.9560	1.85	194.6	38.3	18.0	0.01424	0.036	3.354	11.924	0.075	2061.7	23.96	39.2
30	23.81	0.9606	2.06	192.6	38.5	18.7	0.01494	0.049	3.518	11.760	0.066	1784.9	19.55	39.8
40	23.65	0.9638	2.24	190.8	38.7	19.3	0.01556	0.061	3.665	11.613	0.059	1593.8	16.70	40.3
50	23.51	0.9661	2.40	189.1	38.8	19.8	0.01613	0.072	3.798	11.480	0.055	1452.1	14.66	40.7
60	23.40	0.9680	2.54	187.6	38.9	20.3	0.01666	0.082	3.922	11.356	0.051	1342.0	13.11	41.1
80	23.21	0.9707	2.78	184.9	39.2	21.1	0.01762	0.100	4.148	11.130	0.045	1180.2	10.89	41.8
100	23.05	0.9727	2.98	182.5	39.4	21.8	0.01848	0.116	4.351	10.927	0.041	1065.5	9.34	42.5
150	22.73	0.9759	3.38	177.2	39.8	23.4	0.02036	0.152	4.794	10.484	0.035	882.1	6.91	43.8
200	22.48	0.9779	3.68	172.7	40.2	24.6	0.02198	0.183	5.175	10.103	0.030	771.2	5.45	45.0
250	22.26	0.9793	3.93	168.7	40.5	25.7	0.02342	0.210	5.515	9.763	0.027	695.8	4.46	46.0
300	22.08	0.9803	4.13	165.1	40.8	26.6	0.02473	0.235	5.823	9.455	0.025	640.6	3.73	47.0
350	21.91	0.9811	4.31	161.8	41.1	27.5	0.02594	0.258	6.108	9.170	0.023	598.3	3.18	47.8
450	21.61	0.9823	4.58	155.9	41.5	28.9	0.02813	0.300	6.625	8.653	0.021	537.4	2.38	49.3
550	21.36	0.9830	4.79	150.7	41.9	30.1	0.03009	0.337	7.086	8.192	0.019	495.6	1.83	50.7
600	21.24	0.9833	4.88	148.3	42.1	30.7	0.03101	0.355	7.301	7.977	0.018	479.2	1.62	51.3
650	21.13	0.9836	4.95	146.0	42.2	31.2	0.03188	0.371	7.507	7.771	0.017	465.1	1.43	51.8
700	21.02	0.9838	5.02	143.8	42.4	31.7	0.03272	0.387	7.704	7.574	0.016	452.8	1.27	52.4
750	20.92	0.9840	5.08	141.7	42.5	32.1	0.03353	0.403	7.895	7.383	0.016	442.0	1.13	52.9
800	20.82	0.9842	5.13	139.6	42.6	32.6	0.03431	0.418	8.078	7.200	0.015	432.3	1.01	53.4
900	20.64	0.9844	5.22	135.8	42.9	33.4	0.03579	0.446	8.427	6.851	0.014	416.2	0.80	54.4

Ogled 7.



Ogled 8.

Suspenzija _ Voda, $y_0 = 0.01237 \text{ kg}_{\text{H}_2\text{O}}/\text{kg}_{\text{SUV.VAZ.}}$, $y_c = 0.05303 \text{ kg}_{\text{H}_2\text{O}}/\text{kg}_{\text{SUV.VAZ.}}$.

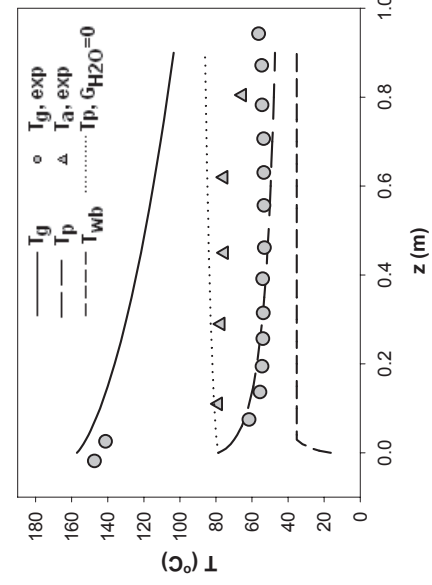
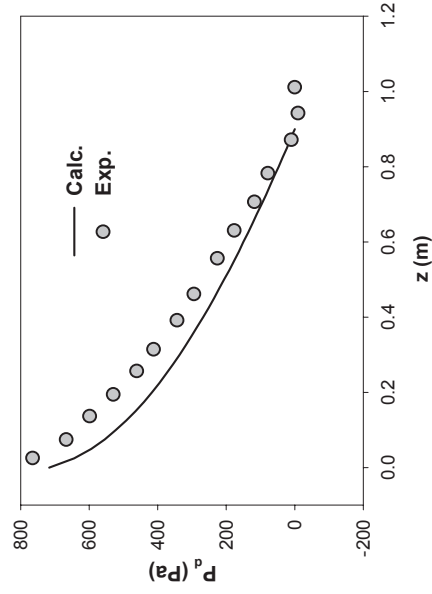
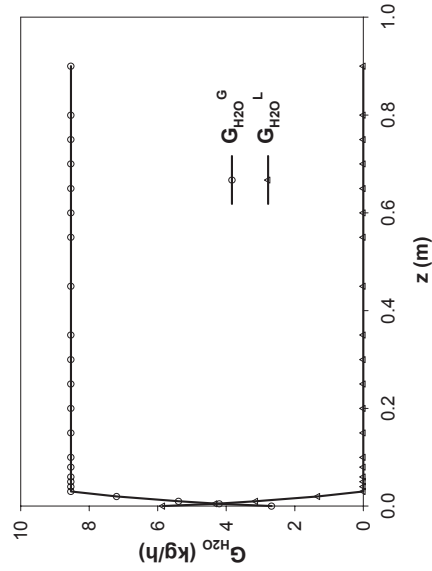
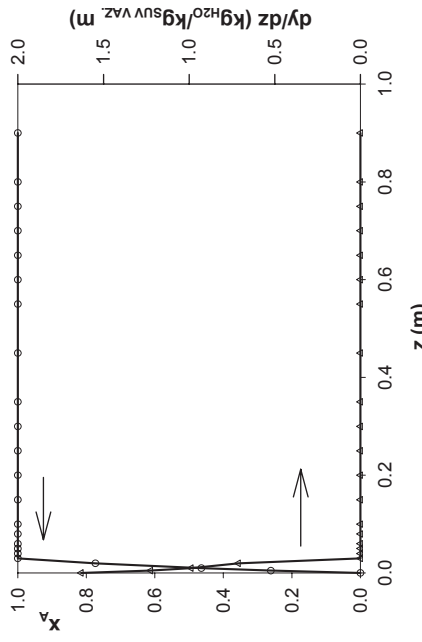
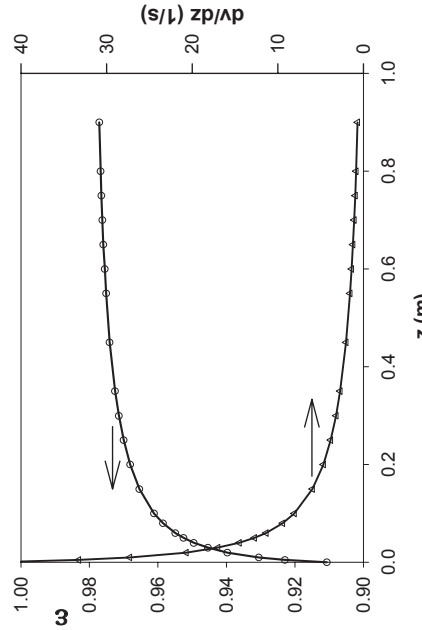
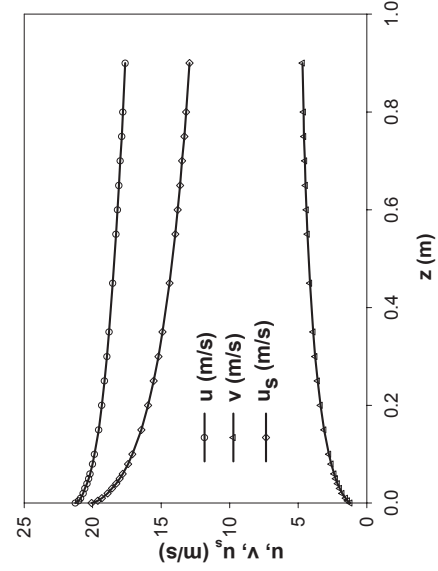
z mm	u m/s	ε -	v m/s	T_g °C	T_p °C	T_{wb} °C	y kg/kg	x_A -	$G_{\text{H}_2\text{O}}^G$ kg/h	$G_{\text{H}_2\text{O}}^L$ kg/h	dy/dz kg/kgm	dP _d /dz Pa/m	dv/dz 1/s	T_p ($G_{\text{H}_2\text{O}}=0$) °C
0	24.90	0.9329	1.15	200.0	70.0	16.2	0.01237	0.000	2.917	9.584	0.816	3087.4	53.71	70.0
5	24.59	0.9440	1.38	198.7	68.6	19.6	0.01591	0.087	3.750	8.751	0.617	2689.5	39.26	70.4
10	24.41	0.9504	1.56	197.6	67.5	22.0	0.01870	0.156	4.409	8.093	0.506	2375.8	31.86	70.7
20	24.18	0.9578	1.83	195.8	65.8	25.4	0.02307	0.263	5.438	7.064	0.379	1964.6	23.98	71.2
30	24.04	0.9623	2.05	194.2	64.5	27.8	0.02647	0.347	6.241	6.261	0.307	1707.4	19.65	71.6
40	23.92	0.9654	2.23	192.8	63.5	29.6	0.02929	0.416	6.904	5.598	0.258	1528.8	16.84	72.0
50	23.83	0.9676	2.39	191.5	62.7	31.1	0.03169	0.475	7.470	5.031	0.224	1396.0	14.82	72.3
60	23.76	0.9694	2.53	190.3	61.9	32.3	0.03379	0.527	7.966	4.536	0.197	1292.5	13.28	72.7
80	23.62	0.9721	2.77	188.1	60.7	34.2	0.03734	0.614	8.802	3.699	0.160	1140.0	11.07	73.2
100	23.51	0.9740	2.98	186.1	59.8	35.6	0.04027	0.686	9.493	3.008	0.134	1031.5	9.53	73.8
150	23.29	0.9772	3.39	181.8	58.1	38.2	0.04593	0.825	10.827	1.674	0.096	857.6	7.09	74.9
200	23.11	0.9791	3.70	178.1	57.0	39.9	0.05015	0.929	11.823	0.679	0.075	752.1	5.62	75.9
250	22.94	0.9805	3.96	174.8	56.2	41.0	0.05303	1.000	12.502	0.000	0.000	679.9	4.62	76.7
300	22.76	0.9815	4.17	171.7	55.6	41.0	0.05303	1.000	12.502	0.000	0.000	626.2	3.87	77.5
350	22.60	0.9822	4.35	168.9	55.0	41.0	0.05303	1.000	12.502	0.000	0.000	585.0	3.29	78.1
450	22.31	0.9833	4.63	163.8	54.1	41.0	0.05303	1.000	12.502	0.000	0.000	525.8	2.47	79.4
550	22.06	0.9841	4.85	159.2	53.4	41.0	0.05303	1.000	12.502	0.000	0.000	485.1	1.90	80.5
600	21.94	0.9843	4.94	157.0	53.1	41.0	0.05303	1.000	12.502	0.000	0.000	469.3	1.68	81.0
650	21.83	0.9846	5.02	154.9	52.9	41.0	0.05303	1.000	12.502	0.000	0.000	455.5	1.48	81.4
700	21.73	0.9848	5.09	152.9	52.6	41.0	0.05303	1.000	12.502	0.000	0.000	443.5	1.32	81.9
750	21.62	0.9850	5.15	151.0	52.4	41.0	0.05303	1.000	12.502	0.000	0.000	433.0	1.17	82.3
800	21.52	0.9851	5.20	149.1	52.1	41.0	0.05303	1.000	12.502	0.000	0.000	423.7	1.05	82.8
900	21.34	0.9854	5.30	145.6	51.7	41.0	0.05303	1.000	12.502	0.000	0.000	407.9	0.83	83.5

Ogled 9.

Suspenzija _ Voda, $y_0 = 0.01237 \text{ kg}_{\text{H}_2\text{O}}/\text{kg}_{\text{SUV.VAZ.}}$, $y_c = 0.03943 \text{ kg}_{\text{H}_2\text{O}}/\text{kg}_{\text{SUV.VAZ.}}$.

z mm	u m/s	ε -	v m/s	T_g °C	T_p °C	T_{wb} °C	y kg/kg	x_A -	$G_{\text{H}_2\text{O}}^G$ kg/h	$G_{\text{H}_2\text{O}}^L$ kg/h	dy/dz kg/kgm	dP _d /dz Pa/m	dv/dz 1/s	T_p ($G_{\text{H}_2\text{O}}=0$) °C
0	21.27	0.9107	1.20	157.1	78.7	16.2	0.01237	0.000	2.675	5.849	1.630	4054.8	44.17	78.7
5	21.02	0.9229	1.39	156.0	76.4	22.6	0.01943	0.261	4.200	4.325	1.225	3419.9	33.26	78.9
10	20.87	0.9305	1.54	155.1	74.5	26.8	0.02493	0.464	5.389	3.136	0.988	2993.4	27.30	79.1
20	20.69	0.9397	1.78	153.5	71.8	32.0	0.03330	0.773	7.199	1.326	0.713	2457.3	20.70	79.3
30	20.56	0.9454	1.97	152.0	69.8	35.2	0.03948	1.000	8.535	0.000	0.000	2127.2	17.00	79.6
40	20.41	0.9495	2.13	150.7	68.1	35.2	0.03948	1.000	8.535	0.000	0.000	1894.2	14.51	79.8
50	20.29	0.9525	2.26	149.5	66.8	35.2	0.03948	1.000	8.535	0.000	0.000	1722.0	12.72	80.0
60	20.18	0.9549	2.38	148.4	65.6	35.2	0.03948	1.000	8.535	0.000	0.000	1588.3	11.37	80.2
80	20.00	0.9585	2.59	146.3	63.6	35.2	0.03948	1.000	8.535	0.000	0.000	1392.1	9.42	80.5
100	19.86	0.9611	2.76	144.3	62.1	35.2	0.03948	1.000	8.535	0.000	0.000	1253.2	8.07	80.8
150	19.56	0.9654	3.11	140.0	59.2	35.2	0.03948	1.000	8.535	0.000	0.000	1031.2	5.94	81.4
200	19.33	0.9681	3.37	136.2	57.1	35.2	0.03948	1.000	8.535	0.000	0.000	896.9	4.68	82.0
250	19.13	0.9700	3.58	132.8	55.5	35.2	0.03948	1.000	8.535	0.000	0.000	805.5	3.82	82.4
300	18.96	0.9714	3.76	129.7	54.2	35.2	0.03948	1.000	8.535	0.000	0.000	738.6	3.20	82.9
350	18.80	0.9725	3.90	126.8	53.1	35.2	0.03948	1.000	8.535	0.000	0.000	687.2	2.72	83.2
450	18.53	0.9741	4.14	121.6	51.4	35.2	0.03948	1.000	8.535	0.000	0.000	613.1	2.03	83.9
550	18.29	0.9751	4.32	116.9	50.1	35.2	0.03948	1.000	8.535	0.000	0.000	562.1	1.56	84.4
600	18.18	0.9755	4.39	114.8	49.6	35.2	0.03948	1.000	8.535	0.000	0.000	542.2	1.38	84.7
650	18.08	0.9759	4.46	112.7	49.1	35.2	0.03948	1.000	8.535	0.000	0.000	524.9	1.22	84.9
700	17.98	0.9762	4.51	110.7	48.6	35.2	0.03948	1.000	8.535	0.000	0.000	509.7	1.08	85.2
750	17.88	0.9765	4.57	108.8	48.2	35.2	0.03948	1.000	8.535	0.000	0.000	496.5	0.96	85.4
800	17.79	0.9767	4.61	107.0	47.8	35.2	0.03948	1.000	8.535	0.000	0.000	484.8	0.86	85.6
900	17.62	0.9771	4.69	103.5	47.1	35.2	0.03948	1.000	8.535	0.000	0.000	464.9	0.68	86.0

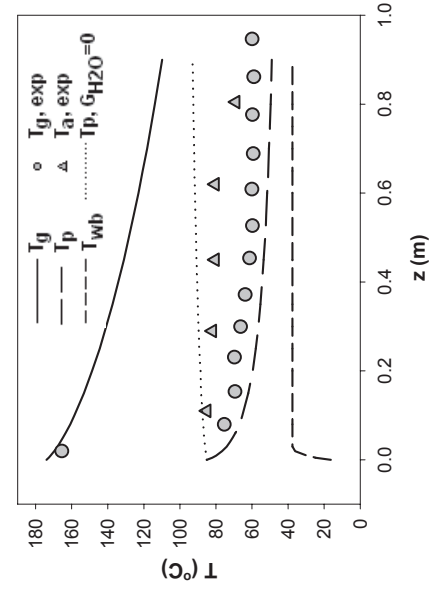
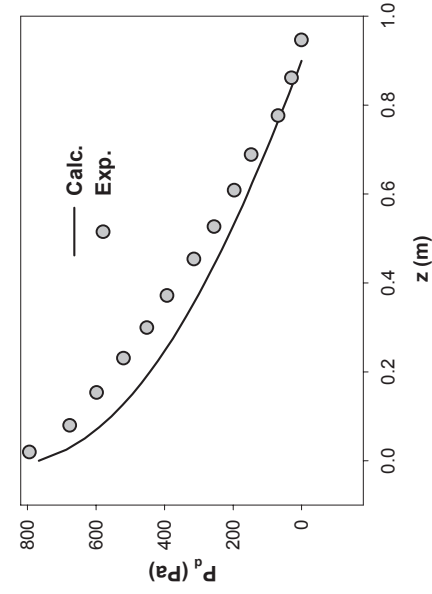
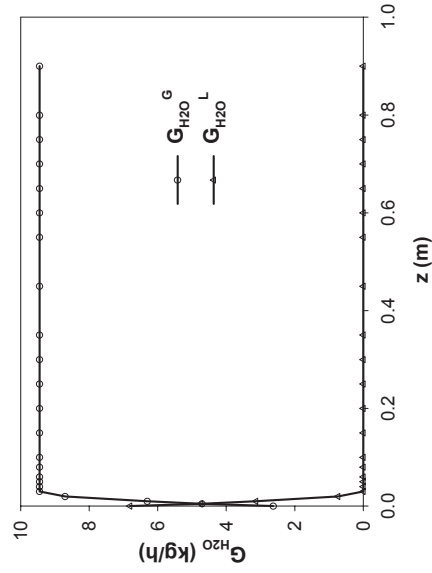
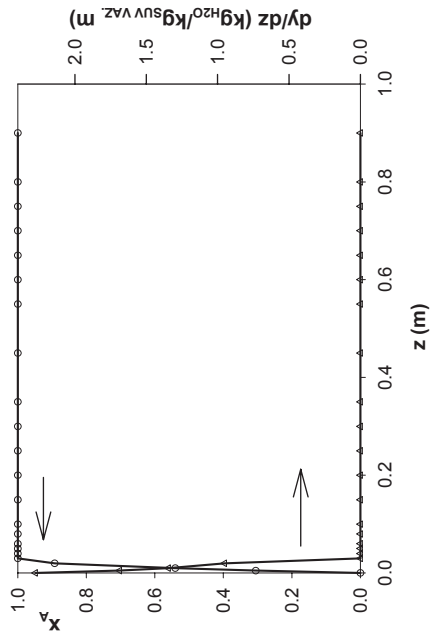
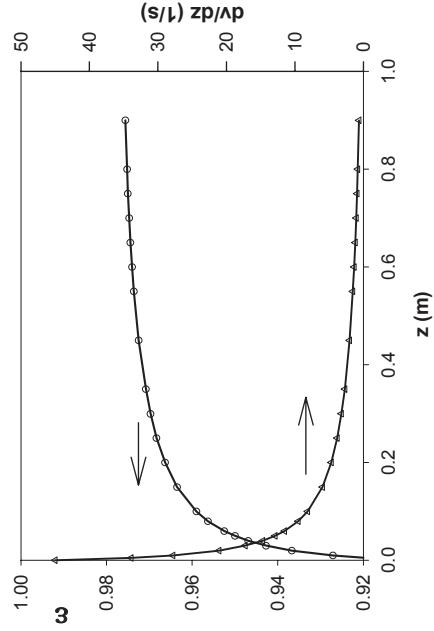
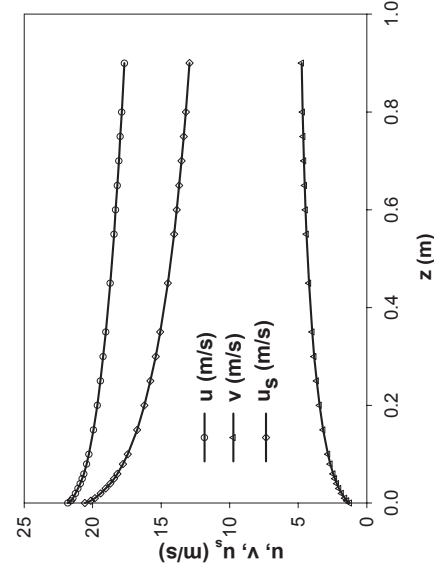
Ogled 9.



Ogled 10.Suspenzija _ Voda, $y_0 = 0.01237 \text{ kg}_{\text{H}_2\text{O}}/\text{kg}_{\text{SUV.VAZ.}}$, $y_c = 0.04444 \text{ kg}_{\text{H}_2\text{O}}/\text{kg}_{\text{SUV.VAZ.}}$.

z mm	u m/s	ε -	v m/s	T_g °C	T_p °C	T_{wb} °C	y kg/kg	x_A -	$G_{\text{H}_2\text{O}}^G$ kg/h	$G_{\text{H}_2\text{O}}^L$ kg/h	dy/dz kg/kgm	dP _d /dz Pa/m	dv/dz 1/s	T_p ($G_{\text{H}_2\text{O}}=0$) °C
0	21.81	0.9067	1.24	174.0	85.0	16.2	0.01237	0.000	2.628	6.810	2.277	4480.4	45.01	85.0
5	21.57	0.9193	1.44	172.7	82.1	24.8	0.02216	0.305	4.706	4.732	1.686	3755.8	33.90	85.2
10	21.43	0.9271	1.59	171.6	79.9	29.9	0.02968	0.540	6.305	3.133	1.344	3277.7	27.82	85.4
20	21.25	0.9367	1.83	169.6	76.6	36.0	0.04097	0.892	8.702	0.737	0.952	2682.1	21.10	85.7
30	21.07	0.9427	2.02	167.8	74.1	37.5	0.04448	1.000	9.449	0.000	0.000	2311.6	17.26	86.0
40	20.90	0.9469	2.18	166.3	72.2	37.5	0.04448	1.000	9.449	0.000	0.000	2054.5	14.71	86.2
50	20.76	0.9500	2.32	164.8	70.6	37.5	0.04448	1.000	9.449	0.000	0.000	1864.8	12.89	86.5
60	20.64	0.9525	2.44	163.4	69.2	37.5	0.04448	1.000	9.449	0.000	0.000	1717.9	11.51	86.7
80	20.44	0.9563	2.65	160.8	66.9	37.5	0.04448	1.000	9.449	0.000	0.000	1502.5	9.52	87.0
100	20.27	0.9590	2.83	158.5	65.2	37.5	0.04448	1.000	9.449	0.000	0.000	1350.2	8.15	87.4
150	19.93	0.9635	3.18	153.2	61.9	37.5	0.04448	1.000	9.449	0.000	0.000	1107.2	5.99	88.1
200	19.66	0.9663	3.44	148.7	59.5	37.5	0.04448	1.000	9.449	0.000	0.000	960.6	4.70	88.6
250	19.43	0.9683	3.65	144.5	57.8	37.5	0.04448	1.000	9.449	0.000	0.000	860.7	3.83	89.2
300	19.23	0.9697	3.83	140.8	56.4	37.5	0.04448	1.000	9.449	0.000	0.000	787.7	3.20	89.6
350	19.04	0.9708	3.97	137.3	55.2	37.5	0.04448	1.000	9.449	0.000	0.000	731.6	2.71	90.0
450	18.72	0.9725	4.21	131.1	53.4	37.5	0.04448	1.000	9.449	0.000	0.000	650.8	2.02	90.7
550	18.44	0.9736	4.39	125.6	52.0	37.5	0.04448	1.000	9.449	0.000	0.000	595.2	1.54	91.3
600	18.32	0.9740	4.46	123.0	51.5	37.5	0.04448	1.000	9.449	0.000	0.000	573.4	1.36	91.6
650	18.20	0.9744	4.52	120.6	50.9	37.5	0.04448	1.000	9.449	0.000	0.000	554.5	1.20	91.9
700	18.09	0.9747	4.58	118.2	50.5	37.5	0.04448	1.000	9.449	0.000	0.000	538.1	1.06	92.1
750	17.98	0.9750	4.63	116.0	50.0	37.5	0.04448	1.000	9.449	0.000	0.000	523.5	0.94	92.3
800	17.87	0.9752	4.67	113.9	49.6	37.5	0.04448	1.000	9.449	0.000	0.000	510.8	0.83	92.5
900	17.68	0.9756	4.75	109.9	48.9	37.5	0.04448	1.000	9.449	0.000	0.000	489.2	0.65	92.9

Ogled 10.

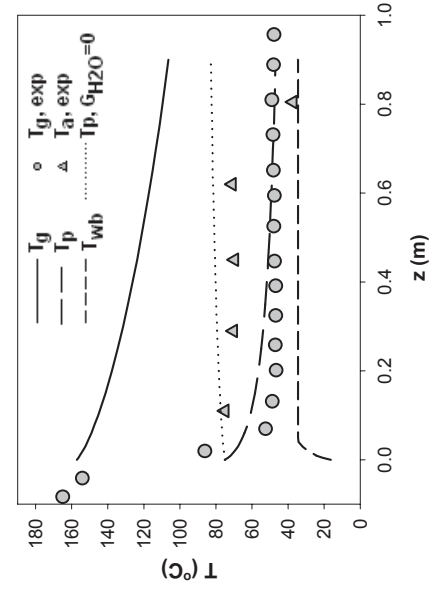
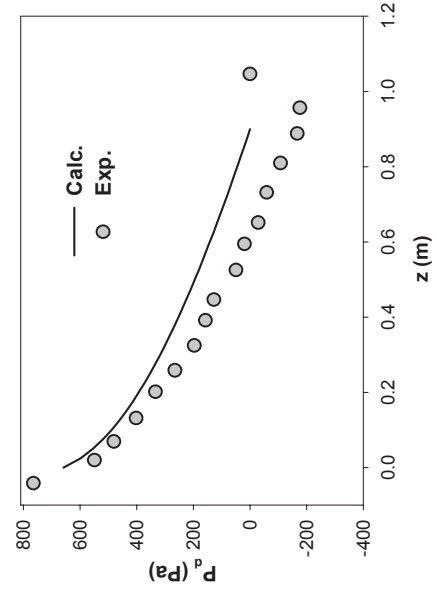
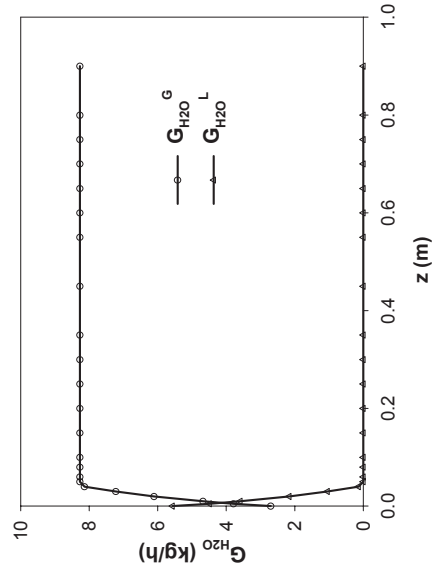
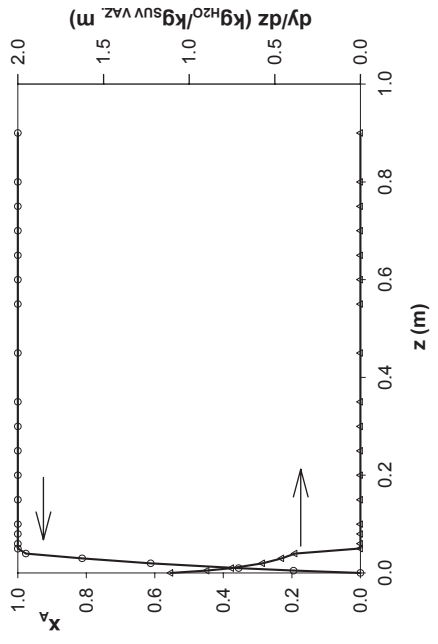
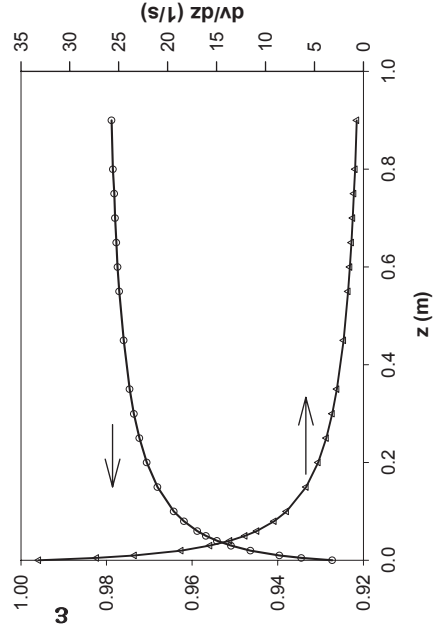
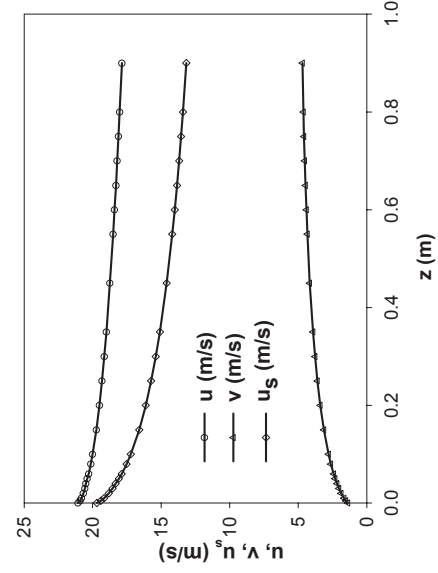


Ogled 11.

Suspenzija _ Voda, $y_0 = 0.01237 \text{ kg}_{\text{H}_2\text{O}}/\text{kg}_{\text{SUV.VAZ.}}$, $y_c = 0.03792 \text{ kg}_{\text{H}_2\text{O}}/\text{kg}_{\text{SUV.VAZ.}}$.

z mm	u m/s	ε -	v m/s	T_g °C	T_p °C	T_{wb} °C	y kg/kg	x_A -	$G_{\text{H}_2\text{O}}^G$ kg/h	$G_{\text{H}_2\text{O}}^L$ kg/h	dy/dz kg/kgm	dP _d /dz Pa/m	dv/dz 1/s	T_p ($G_{\text{H}_2\text{O}}=0$) °C
0	21.07	0.9273	1.37	157.1	75.0	16.2	0.01237	0.000	2.699	5.570	1.107	3151.6	33.19	75.0
5	20.92	0.9345	1.52	156.2	73.2	20.9	0.01735	0.195	3.784	4.485	0.895	2766.6	27.25	75.2
10	20.82	0.9396	1.65	155.4	71.8	24.2	0.02145	0.355	4.679	3.590	0.752	2489.0	23.42	75.3
20	20.68	0.9464	1.85	153.9	69.5	28.8	0.02800	0.612	6.106	2.163	0.571	2111.6	18.63	75.6
30	20.57	0.9509	2.03	152.5	67.7	31.9	0.03311	0.812	7.221	1.048	0.459	1862.6	15.68	75.9
40	20.49	0.9542	2.17	151.3	66.3	34.2	0.03729	0.976	8.134	0.135	0.382	1683.3	13.64	76.1
50	20.39	0.9568	2.30	150.2	65.1	34.5	0.03793	1.000	8.273	0.000	0.000	1544.0	12.09	76.3
60	20.29	0.9588	2.41	149.1	64.1	34.5	0.03793	1.000	8.273	0.000	0.000	1433.3	10.89	76.5
80	20.13	0.9619	2.61	147.2	62.3	34.5	0.03793	1.000	8.273	0.000	0.000	1267.5	9.11	76.8
100	20.00	0.9643	2.78	145.3	60.9	34.5	0.03793	1.000	8.273	0.000	0.000	1147.9	7.86	77.2
150	19.72	0.9681	3.12	141.3	58.2	34.5	0.03793	1.000	8.273	0.000	0.000	953.3	5.85	77.8
200	19.50	0.9706	3.38	137.7	56.3	34.5	0.03793	1.000	8.273	0.000	0.000	833.8	4.63	78.4
250	19.32	0.9723	3.59	134.5	54.8	34.5	0.03793	1.000	8.273	0.000	0.000	751.6	3.80	78.9
300	19.15	0.9736	3.76	131.5	53.6	34.5	0.03793	1.000	8.273	0.000	0.000	691.1	3.18	79.4
350	19.00	0.9746	3.91	128.8	52.6	34.5	0.03793	1.000	8.273	0.000	0.000	644.5	2.71	79.8
450	18.74	0.9760	4.15	123.7	51.0	34.5	0.03793	1.000	8.273	0.000	0.000	577.1	2.03	80.5
550	18.51	0.9770	4.32	119.3	49.7	34.5	0.03793	1.000	8.273	0.000	0.000	530.5	1.57	81.1
600	18.40	0.9774	4.40	117.2	49.2	34.5	0.03793	1.000	8.273	0.000	0.000	512.1	1.38	81.4
650	18.30	0.9777	4.46	115.2	48.7	34.5	0.03793	1.000	8.273	0.000	0.000	496.3	1.23	81.7
700	18.21	0.9780	4.52	113.3	48.3	34.5	0.03793	1.000	8.273	0.000	0.000	482.4	1.09	81.9
750	18.11	0.9782	4.57	111.4	47.8	34.5	0.03793	1.000	8.273	0.000	0.000	470.2	0.97	82.1
800	18.03	0.9785	4.62	109.6	47.5	34.5	0.03793	1.000	8.273	0.000	0.000	459.4	0.86	82.4
900	17.86	0.9788	4.69	106.3	46.8	34.5	0.03793	1.000	8.273	0.000	0.000	441.3	0.68	82.8

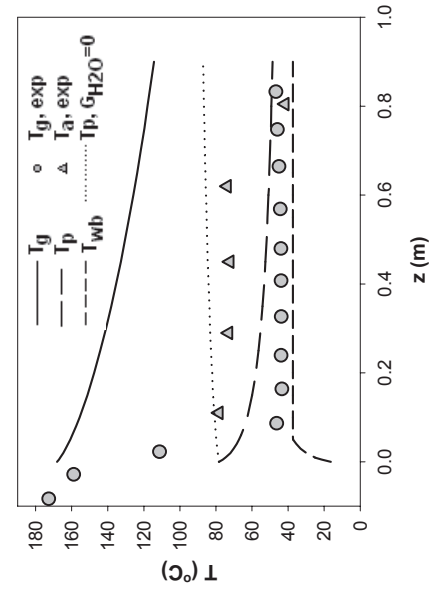
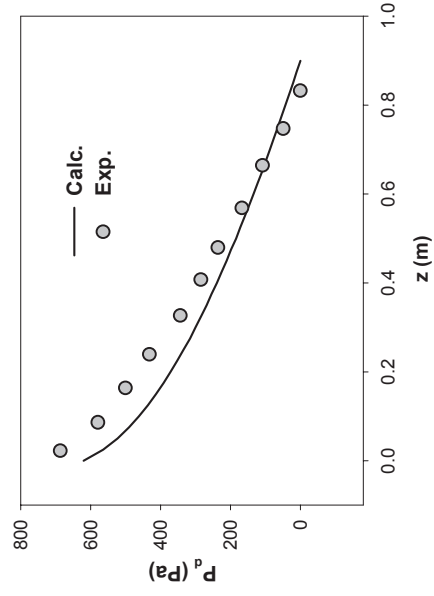
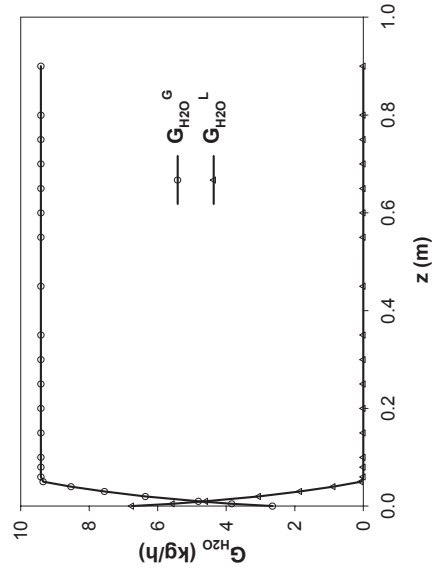
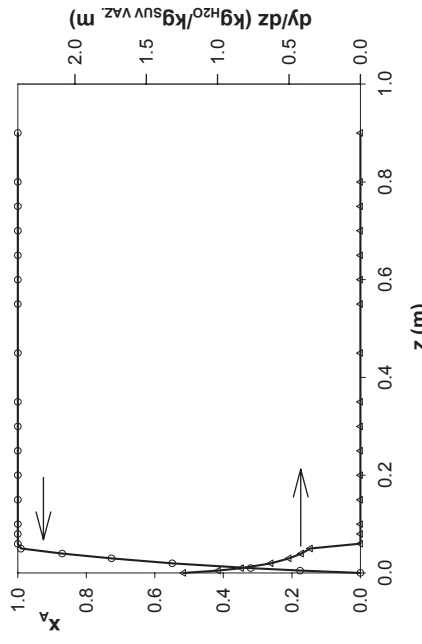
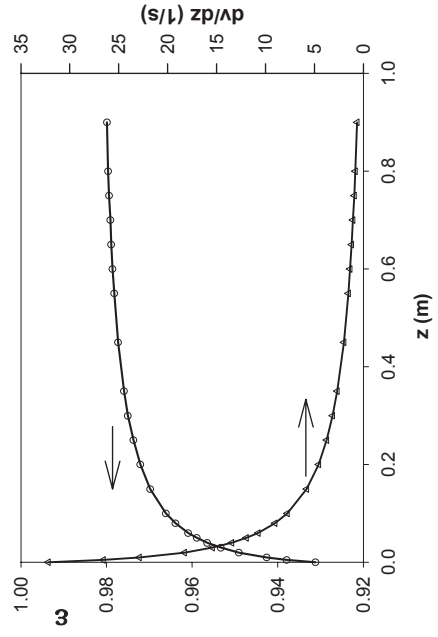
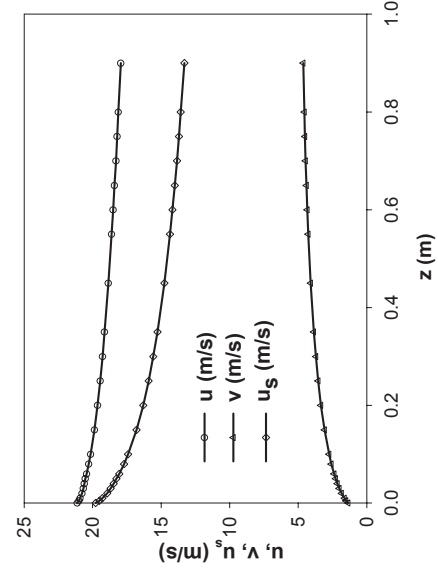
Ogled 11.



Ogled 12.Suspenzija _ Voda, $y_0 = 0.01237 \text{ kg}_{\text{H}_2\text{O}}/\text{kg}_{\text{SUV.VAZ.}}$, $y_c = 0.04394 \text{ kg}_{\text{H}_2\text{O}}/\text{kg}_{\text{SUV.VAZ.}}$

z mm	u m/s	ε -	v m/s	T_g °C	T_p °C	T_{wb} °C	y kg/kg	x_A -	$G_{\text{H}_2\text{O}}^G$ kg/h	$G_{\text{H}_2\text{O}}^L$ kg/h	dy/dz kg/kgm	dP _d /dz Pa/m	dv/dz 1/s	T_p ($G_{\text{H}_2\text{O}}=0$) °C
0	21.13	0.9312	1.35	168.1	78.3	16.2	0.01237	0.000	2.650	6.758	1.238	2889.3	32.20	78.3
5	21.00	0.9379	1.50	167.1	76.3	21.4	0.01792	0.176	3.838	5.570	0.995	2547.5	26.58	78.5
10	20.91	0.9426	1.62	166.3	74.6	25.0	0.02248	0.320	4.813	4.594	0.833	2298.8	22.91	78.7
20	20.77	0.9491	1.83	164.7	72.0	29.9	0.02969	0.549	6.357	3.050	0.626	1957.8	18.29	79.0
30	20.68	0.9533	1.99	163.3	70.0	33.1	0.03528	0.726	7.555	1.853	0.500	1731.2	15.43	79.3
40	20.60	0.9565	2.14	162.0	68.4	35.4	0.03983	0.870	8.528	0.880	0.414	1567.3	13.44	79.5
50	20.54	0.9589	2.27	160.8	67.1	37.2	0.04364	0.991	9.344	0.063	0.351	1441.9	11.96	79.8
60	20.44	0.9609	2.38	159.7	66.0	37.3	0.04395	1.000	9.411	0.000	0.000	1339.8	10.77	80.0
80	20.28	0.9639	2.58	157.6	64.1	37.3	0.04395	1.000	9.411	0.000	0.000	1186.3	9.03	80.4
100	20.15	0.9661	2.74	155.6	62.6	37.3	0.04395	1.000	9.411	0.000	0.000	1075.4	7.78	80.7
150	19.87	0.9698	3.08	151.3	59.8	37.3	0.04395	1.000	9.411	0.000	0.000	894.8	5.79	81.5
200	19.64	0.9721	3.34	147.6	57.9	37.3	0.04395	1.000	9.411	0.000	0.000	783.7	4.58	82.1
250	19.45	0.9737	3.54	144.1	56.3	37.3	0.04395	1.000	9.411	0.000	0.000	707.3	3.76	82.7
300	19.28	0.9750	3.71	141.0	55.1	37.3	0.04395	1.000	9.411	0.000	0.000	651.0	3.15	83.2
350	19.13	0.9759	3.86	138.1	54.1	37.3	0.04395	1.000	9.411	0.000	0.000	607.6	2.68	83.6
450	18.85	0.9773	4.09	132.8	52.5	37.3	0.04395	1.000	9.411	0.000	0.000	544.8	2.00	84.5
550	18.62	0.9782	4.27	128.1	51.3	37.3	0.04395	1.000	9.411	0.000	0.000	501.4	1.54	85.2
600	18.51	0.9786	4.34	125.8	50.8	37.3	0.04395	1.000	9.411	0.000	0.000	484.4	1.36	85.5
650	18.40	0.9789	4.40	123.7	50.3	37.3	0.04395	1.000	9.411	0.000	0.000	469.6	1.20	85.8
700	18.30	0.9791	4.46	121.7	49.9	37.3	0.04395	1.000	9.411	0.000	0.000	456.7	1.06	86.1
750	18.21	0.9794	4.51	119.7	49.5	37.3	0.04395	1.000	9.411	0.000	0.000	445.4	0.94	86.3
800	18.12	0.9796	4.55	117.9	49.2	37.3	0.04395	1.000	9.411	0.000	0.000	435.3	0.84	86.6
900	17.94	0.9799	4.63	114.3	48.5	37.3	0.04395	1.000	9.411	0.000	0.000	418.4	0.66	87.1

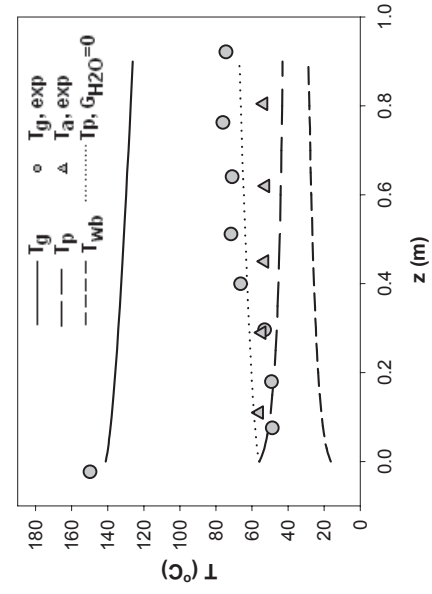
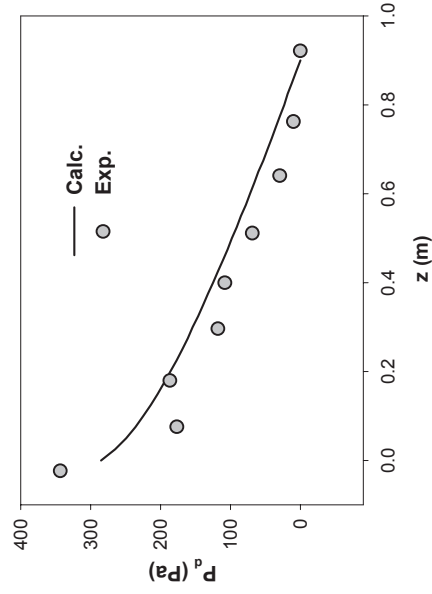
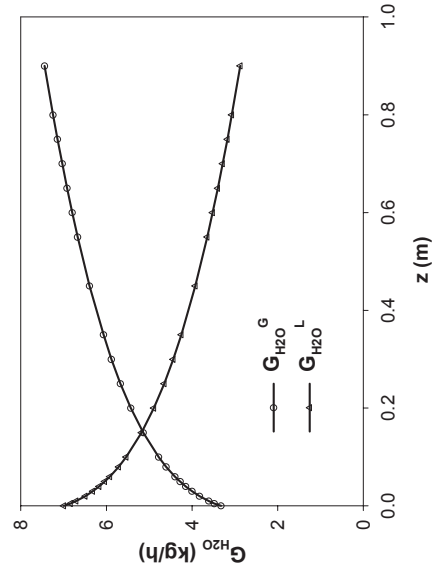
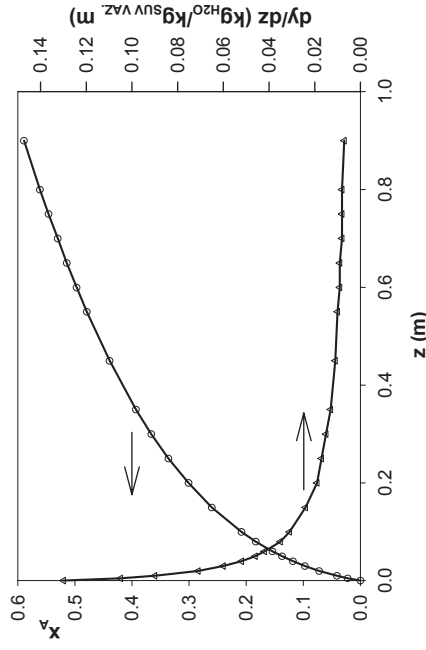
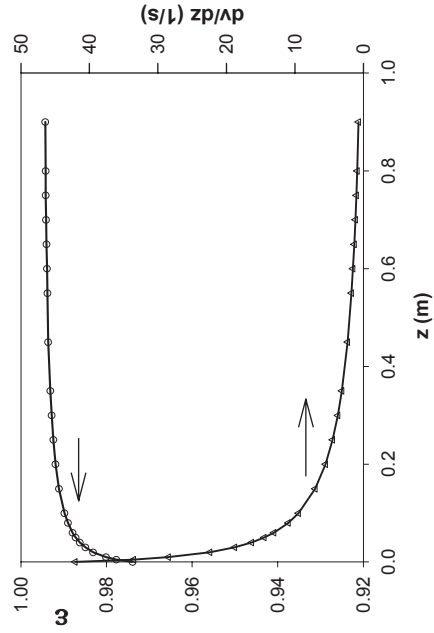
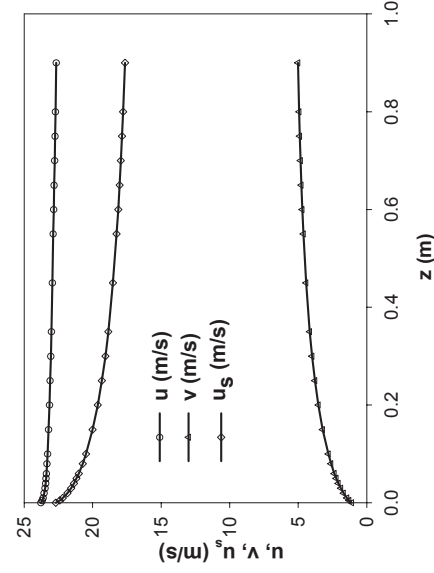
Ogled 12.



Ogled 13.Suspenzija CaCO_3 , $y_0 = 0.01237 \text{ kg}_{\text{H}_2\text{O}}/\text{kg}_{\text{SUV.VAZ.}}$, $y_c = 0.03842 \text{ kg}_{\text{H}_2\text{O}}/\text{kg}_{\text{SUV.VAZ.}}$

z mm	u m/s	ε -	v m/s	T_g °C	T_p °C	T_{wb} °C	y kg/kg	x_A -	$G_{\text{H}_2\text{O}}^G$ kg/h	$G_{\text{H}_2\text{O}}^L$ kg/h	dy/dz kg/kgm	dP _d /dz Pa/m	dv/dz 1/s	T_p ($G_{\text{H}_2\text{O}}=0$) °C
0	23.78	0.9739	1.09	141.2	56.0	16.2	0.01237	0.000	3.322	6.992	0.130	945.6	42.07	56.0
5	23.68	0.9777	1.28	140.9	55.3	16.8	0.01296	0.022	3.479	6.836	0.105	895.1	33.56	56.2
10	23.61	0.9801	1.44	140.7	54.7	17.2	0.01345	0.041	3.609	6.705	0.090	833.4	28.46	56.5
20	23.53	0.9831	1.69	140.2	53.8	18.0	0.01424	0.072	3.823	6.491	0.071	733.0	22.41	56.8
30	23.47	0.9849	1.89	139.8	53.0	18.6	0.01489	0.097	3.998	6.317	0.060	660.9	18.79	57.1
40	23.43	0.9862	2.07	139.5	52.4	19.2	0.01545	0.118	4.147	6.167	0.052	607.2	16.33	57.4
50	23.40	0.9872	2.22	139.2	51.8	19.6	0.01594	0.137	4.278	6.036	0.046	565.5	14.50	57.7
60	23.37	0.9879	2.36	138.9	51.4	20.0	0.01638	0.154	4.396	5.918	0.042	532.0	13.08	57.9
80	23.32	0.9890	2.60	138.4	50.6	20.7	0.01714	0.183	4.602	5.713	0.035	481.3	10.98	58.3
100	23.28	0.9898	2.80	137.9	49.9	21.3	0.01780	0.208	4.779	5.536	0.031	444.4	9.48	58.7
150	23.21	0.9911	3.21	136.8	48.6	22.4	0.01914	0.260	5.139	5.176	0.024	384.0	7.04	59.6
200	23.15	0.9919	3.52	135.8	47.6	23.3	0.02021	0.301	5.427	4.888	0.019	346.9	5.54	60.3
250	23.10	0.9924	3.77	134.9	46.8	24.0	0.02112	0.336	5.669	4.646	0.017	321.6	4.51	60.9
300	23.05	0.9928	3.98	134.1	46.2	24.6	0.02190	0.366	5.879	4.435	0.015	303.2	3.74	61.5
350	23.01	0.9931	4.15	133.3	45.7	25.1	0.02260	0.393	6.067	4.248	0.013	289.2	3.16	62.1
450	22.94	0.9936	4.42	131.8	44.9	26.0	0.02381	0.439	6.392	3.922	0.011	269.2	2.31	63.1
550	22.87	0.9938	4.62	130.5	44.2	26.7	0.02485	0.479	6.671	3.644	0.010	256.0	1.74	64.1
600	22.83	0.9939	4.70	129.8	44.0	27.1	0.02532	0.497	6.798	3.517	0.009	250.8	1.52	64.5
650	22.80	0.9940	4.77	129.2	43.8	27.4	0.02577	0.514	6.917	3.397	0.009	246.5	1.33	65.0
700	22.77	0.9941	4.83	128.5	43.6	27.6	0.02619	0.530	7.031	3.283	0.008	242.7	1.16	65.4
750	22.74	0.9942	4.88	127.9	43.4	27.9	0.02660	0.546	7.140	3.174	0.008	239.7	1.03	65.8
800	22.71	0.9942	4.93	127.3	43.2	28.2	0.02699	0.561	7.244	3.070	0.008	236.7	0.90	66.2
900	22.65	0.9943	5.01	126.2	43.0	28.7	0.02772	0.589	7.441	2.874	0.007	232.2	0.71	66.9

Ogled 13.

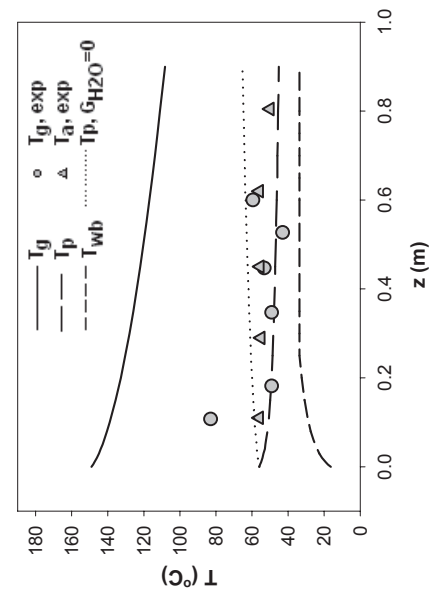
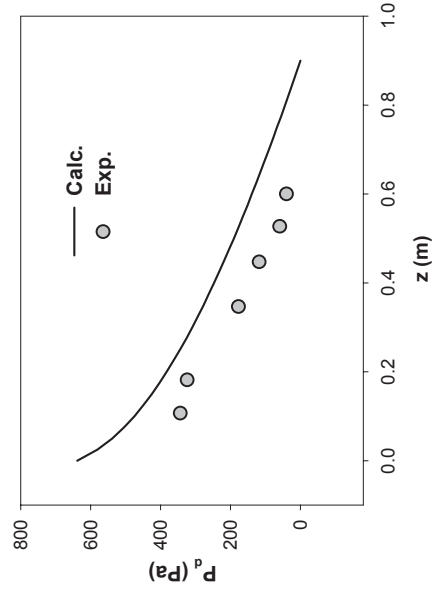
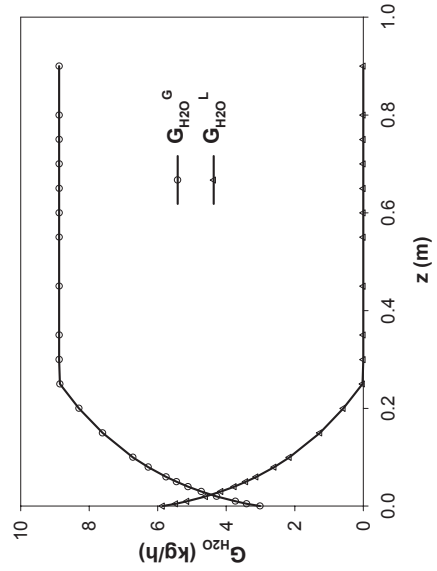
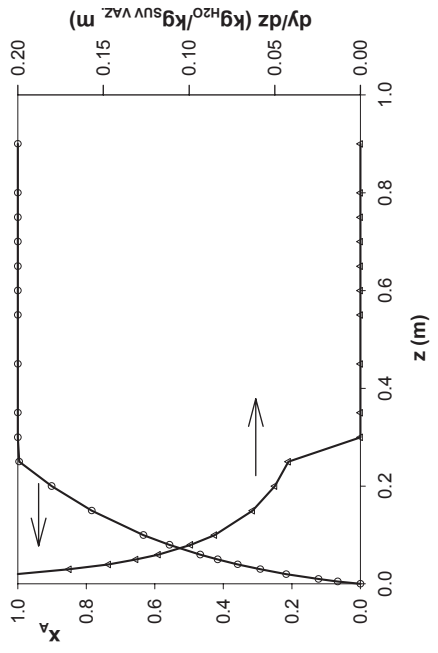
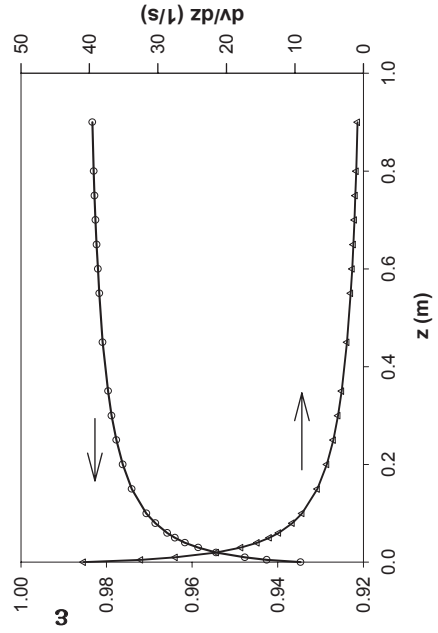
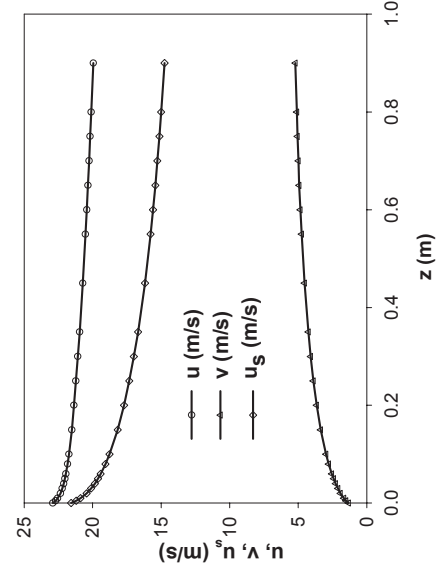


Ogled 14.

Suspenzija CaCO_3 , $y_0 = 0.01237 \text{ kg}_{\text{H}_2\text{O}}/\text{kg}_{\text{SUV.VAZ.}}$, $y_e = 0.03643 \text{ kg}_{\text{H}_2\text{O}}/\text{kg}_{\text{SUV.VAZ.}}$

z mm	u m/s	ε -	v m/s	T_g °C	T_p °C	T_{wb} °C	y kg/kg	x_A -	$G_{\text{H}_2\text{O}}^G$ kg/h	$G_{\text{H}_2\text{O}}^L$ kg/h	dy/dz kg/kgm	dP _d /dz Pa/m	dv/dz 1/s	T_p ($G_{\text{H}_2\text{O}}=0$) °C
0	22.91	0.9347	1.33	149.0	56.0	16.2	0.01237	0.000	3.015	5.861	0.351	3086.7	40.88	56.0
5	22.70	0.9426	1.51	148.1	55.4	17.8	0.01397	0.066	3.404	5.473	0.291	2697.7	32.51	56.2
10	22.55	0.9477	1.66	147.4	54.9	19.0	0.01532	0.122	3.733	5.144	0.251	2414.4	27.46	56.4
20	22.35	0.9544	1.91	146.1	54.1	21.1	0.01756	0.216	4.279	4.598	0.201	2033.0	21.46	56.7
30	22.22	0.9586	2.10	144.9	53.5	22.6	0.01941	0.292	4.728	4.148	0.170	1785.2	17.90	57.0
40	22.11	0.9617	2.27	143.9	52.9	23.9	0.02099	0.358	5.113	3.763	0.147	1608.7	15.50	57.3
50	22.02	0.9640	2.41	142.9	52.5	24.9	0.02237	0.416	5.452	3.425	0.131	1475.2	13.73	57.5
60	21.95	0.9658	2.54	142.0	52.1	25.8	0.02361	0.467	5.754	3.123	0.118	1369.7	12.37	57.7
80	21.83	0.9686	2.77	140.4	51.4	27.4	0.02577	0.557	6.278	2.598	0.099	1212.4	10.37	58.1
100	21.73	0.9707	2.96	138.9	50.8	28.6	0.02759	0.633	6.723	2.153	0.085	1099.3	8.96	58.5
150	21.52	0.9741	3.35	135.6	49.8	30.8	0.03124	0.784	7.612	1.264	0.063	915.7	6.71	59.3
200	21.36	0.9762	3.65	132.8	49.0	32.4	0.03405	0.901	8.298	0.579	0.050	803.3	5.34	59.9
250	21.22	0.9777	3.89	130.3	48.5	33.7	0.03634	0.996	8.855	0.021	0.042	726.2	4.40	60.5
300	21.08	0.9788	4.09	128.0	48.1	33.7	0.03643	1.000	8.877	0.000	0.000	668.8	3.70	61.0
350	20.95	0.9796	4.26	125.8	47.7	33.7	0.03643	1.000	8.877	0.000	0.000	624.5	3.17	61.5
450	20.72	0.9809	4.54	122.0	47.0	33.7	0.03643	1.000	8.877	0.000	0.000	560.8	2.39	62.4
550	20.52	0.9817	4.75	118.5	46.5	33.7	0.03643	1.000	8.877	0.000	0.000	516.9	1.86	63.1
600	20.43	0.9820	4.84	116.9	46.2	33.7	0.03643	1.000	8.877	0.000	0.000	499.7	1.65	63.5
650	20.34	0.9823	4.92	115.3	46.0	33.7	0.03643	1.000	8.877	0.000	0.000	484.8	1.47	63.8
700	20.26	0.9826	4.98	113.8	45.8	33.7	0.03643	1.000	8.877	0.000	0.000	471.7	1.31	64.1
750	20.18	0.9828	5.05	112.4	45.6	33.7	0.03643	1.000	8.877	0.000	0.000	460.3	1.18	64.4
800	20.10	0.9830	5.10	111.0	45.4	33.7	0.03643	1.000	8.877	0.000	0.000	450.2	1.05	64.7
900	19.95	0.9833	5.20	108.3	45.0	33.7	0.03643	1.000	8.877	0.000	0.000	433.0	0.85	65.2

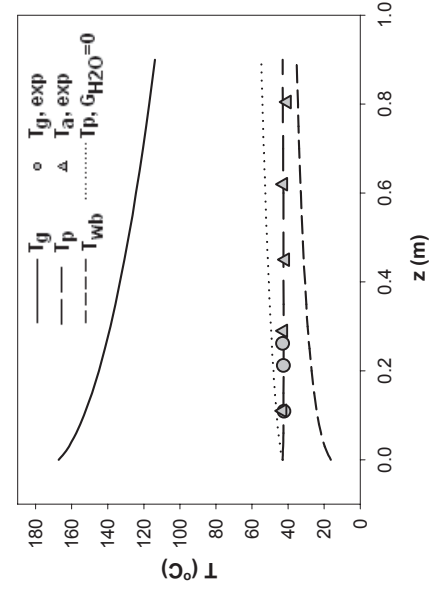
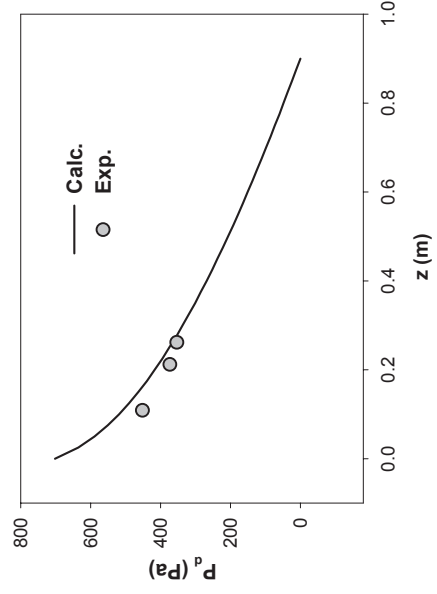
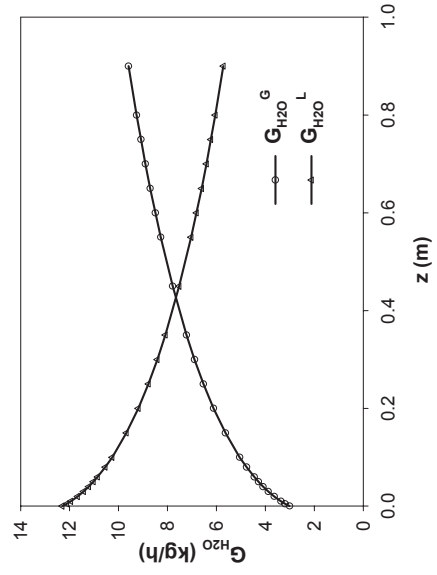
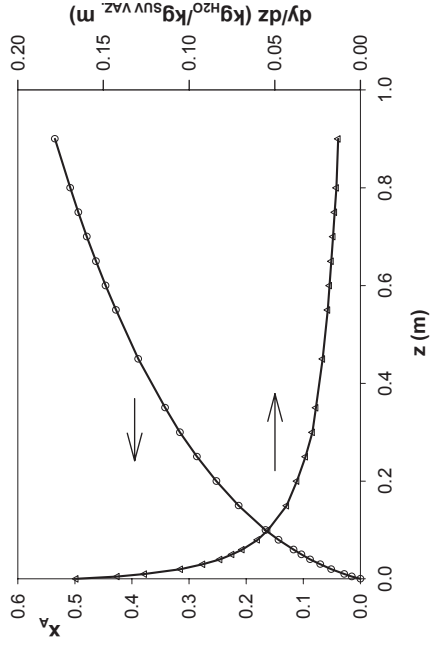
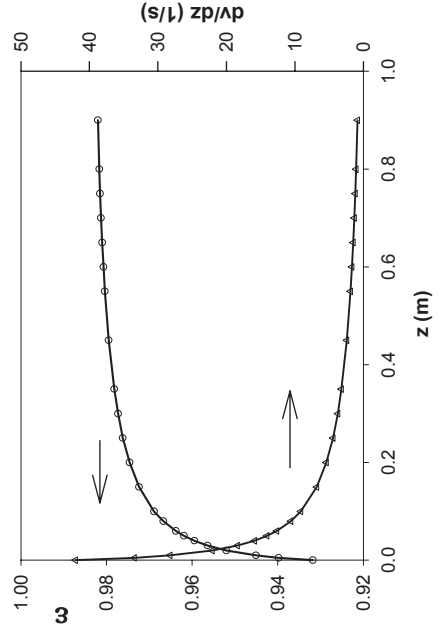
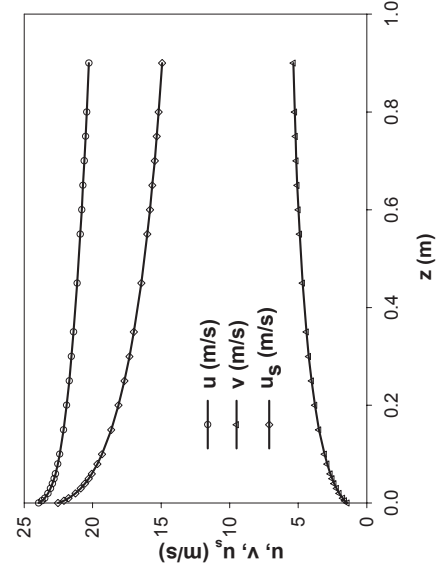
Ogled 14.



Ogled 15.Suspenzija CaCO_3 , $y_0 = 0.01237 \text{ kg}_{\text{H}_2\text{O}}/\text{kg}_{\text{SUV.VAZ.}}$, $y_c = 0.06293 \text{ kg}_{\text{H}_2\text{O}}/\text{kg}_{\text{SUV.VAZ.}}$

z mm	u m/s	ε -	v m/s	T_g °C	T_p °C	T_{wb} °C	y kg/kg	x_A -	$G_{\text{H}_2\text{O}}^G$ kg/h	$G_{\text{H}_2\text{O}}^L$ kg/h	dy/dz kg/kgm	dP _d /dz Pa/m	dv/dz 1/s	T_p ($G_{\text{H}_2\text{O}}=0$) °C
0	23.94	0.9318	1.41	167.3	43.0	16.2	0.01237	0.000	3.010	12.300	0.166	3507.3	42.02	43.0
5	23.69	0.9398	1.60	166.1	42.9	16.9	0.01314	0.015	3.197	12.114	0.142	3048.3	33.45	43.3
10	23.50	0.9451	1.75	165.0	42.9	17.6	0.01381	0.028	3.359	11.951	0.126	2719.5	28.25	43.5
20	23.25	0.9520	2.00	163.1	42.8	18.7	0.01496	0.051	3.639	11.672	0.105	2280.8	22.06	44.0
30	23.07	0.9564	2.20	161.5	42.7	19.6	0.01594	0.070	3.878	11.433	0.092	1997.3	18.39	44.3
40	22.93	0.9595	2.37	160.1	42.7	20.4	0.01681	0.088	4.089	11.221	0.082	1795.9	15.90	44.7
50	22.81	0.9619	2.52	158.7	42.6	21.1	0.01759	0.103	4.280	11.030	0.075	1643.8	14.07	45.0
60	22.71	0.9638	2.65	157.5	42.6	21.7	0.01832	0.117	4.456	10.855	0.069	1524.0	12.66	45.3
80	22.54	0.9667	2.88	155.2	42.5	22.8	0.01961	0.143	4.770	10.541	0.060	1345.4	10.60	45.8
100	22.40	0.9689	3.08	153.2	42.5	23.7	0.02075	0.166	5.048	10.263	0.054	1217.2	9.14	46.2
150	22.12	0.9724	3.48	148.7	42.4	25.5	0.02316	0.213	5.633	9.677	0.043	1009.7	6.82	47.2
200	21.89	0.9746	3.78	144.9	42.4	26.9	0.02514	0.252	6.116	9.195	0.037	882.8	5.41	48.1
250	21.70	0.9762	4.02	141.6	42.4	28.1	0.02684	0.286	6.530	8.781	0.032	795.8	4.45	48.8
300	21.54	0.9773	4.23	138.5	42.4	29.1	0.02834	0.316	6.894	8.416	0.028	732.0	3.74	49.5
350	21.39	0.9782	4.40	135.7	42.4	29.9	0.02968	0.342	7.221	8.089	0.026	682.8	3.20	50.1
450	21.12	0.9795	4.68	130.7	42.5	31.3	0.03202	0.389	7.790	7.520	0.022	611.9	2.42	51.2
550	20.90	0.9804	4.89	126.3	42.6	32.4	0.03402	0.428	8.277	7.033	0.019	562.9	1.88	52.2
600	20.79	0.9807	4.98	124.3	42.6	32.9	0.03493	0.446	8.497	6.813	0.018	543.7	1.67	52.6
650	20.70	0.9810	5.06	122.3	42.7	33.4	0.03578	0.463	8.704	6.606	0.017	527.0	1.49	53.0
700	20.60	0.9813	5.13	120.5	42.8	33.8	0.03658	0.479	8.900	6.410	0.016	512.6	1.33	53.4
750	20.51	0.9815	5.19	118.7	42.8	34.2	0.03735	0.494	9.086	6.225	0.015	499.8	1.19	53.8
800	20.43	0.9817	5.25	117.0	42.9	34.5	0.03807	0.508	9.262	6.048	0.014	488.4	1.07	54.2
900	20.27	0.9820	5.34	113.8	43.0	35.2	0.03943	0.535	9.592	5.719	0.013	469.3	0.86	54.8

Ogled 15.

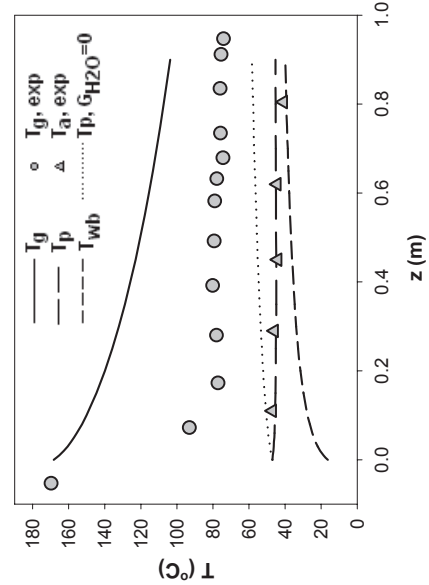
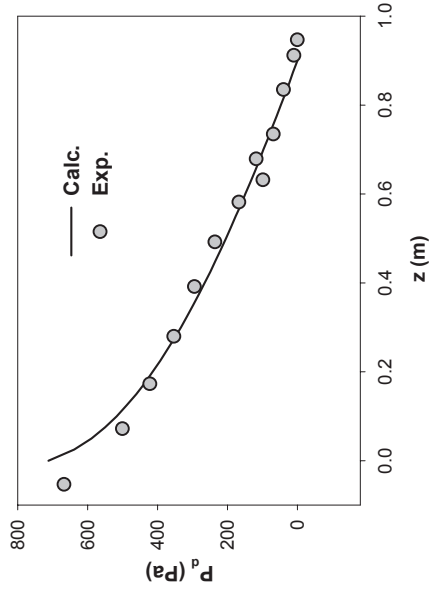
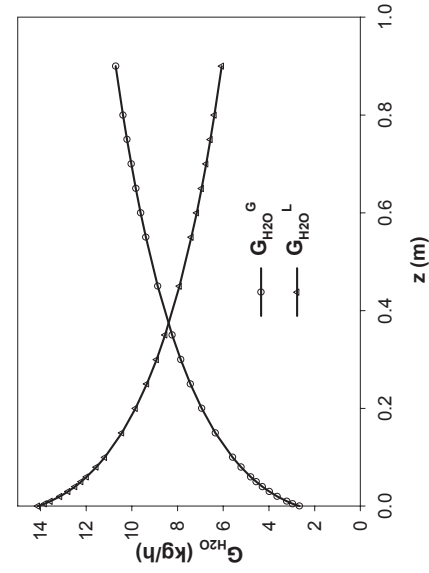
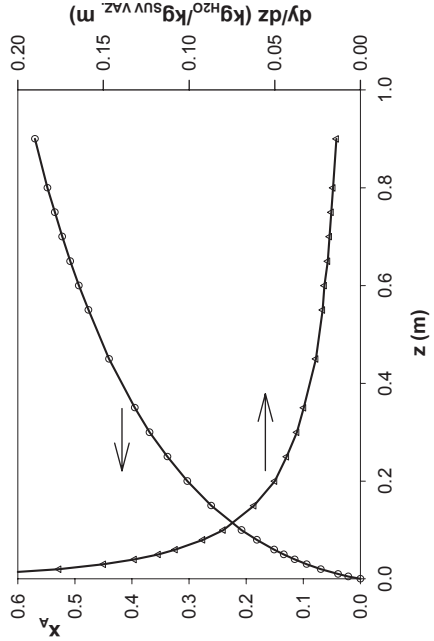
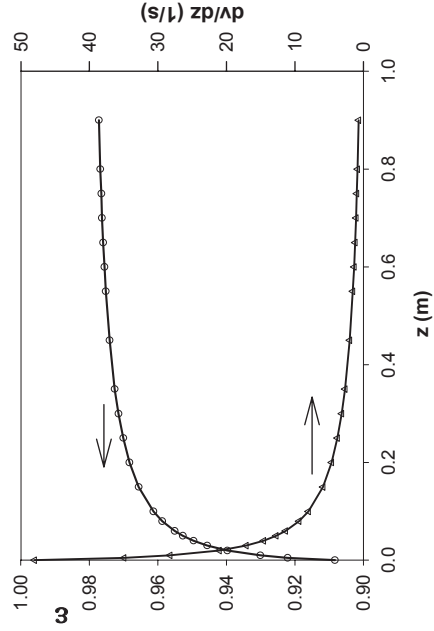
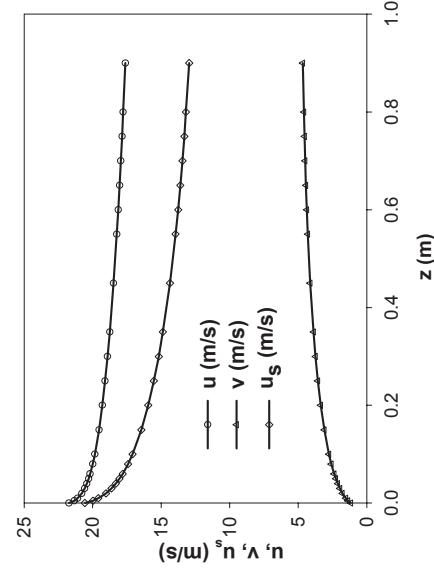


Ogled 16.

Suspenzija _ Stearat, $y_0 = 0.01237 \text{ kg}_{\text{H}_2\text{O}}/\text{kg}_{\text{SUV.VAZ.}}$, $y_c = 0.07815 \text{ kg}_{\text{H}_2\text{O}}/\text{kg}_{\text{SUV.VAZ.}}$

z mm	u m/s	ε -	v m/s	T_g °C	T_p °C	T_{wb} °C	y kg/kg	x_A -	$G_{\text{H}_2\text{O}}^G$ kg/h	$G_{\text{H}_2\text{O}}^L$ kg/h	dy/dz kg/kgm	dP _d /dz Pa/m	dv/dz 1/s	T_p ($G_{\text{H}_2\text{O}}=0$) °C
0	21.73	0.9083	1.16	168.3	47.0	16.2	0.01237	0.000	2.657	14.120	0.316	4199.5	48.02	47.0
5	21.34	0.9221	1.37	166.6	46.8	17.6	0.01379	0.021	2.960	13.817	0.255	3501.4	34.97	47.3
10	21.10	0.9301	1.52	165.2	46.7	18.7	0.01497	0.039	3.213	13.563	0.219	3036.9	28.23	47.6
20	20.79	0.9397	1.77	162.7	46.4	20.5	0.01692	0.069	3.633	13.143	0.176	2465.0	21.04	48.0
30	20.58	0.9456	1.95	160.6	46.2	21.9	0.01855	0.094	3.981	12.795	0.150	2119.7	17.11	48.4
40	20.42	0.9496	2.11	158.7	46.1	23.1	0.01995	0.115	4.283	12.493	0.132	1884.0	14.56	48.7
50	20.29	0.9527	2.25	157.0	45.9	24.0	0.02120	0.134	4.551	12.225	0.118	1710.5	12.74	49.1
60	20.18	0.9551	2.37	155.5	45.8	24.9	0.02233	0.151	4.793	11.983	0.108	1576.3	11.37	49.3
80	19.99	0.9587	2.58	152.6	45.6	26.3	0.02431	0.181	5.219	11.557	0.092	1379.9	9.40	49.9
100	19.84	0.9613	2.75	150.1	45.5	27.5	0.02603	0.208	5.587	11.189	0.080	1241.2	8.04	50.3
150	19.53	0.9656	3.09	144.6	45.2	29.8	0.02953	0.261	6.340	10.437	0.062	1020.4	5.91	51.3
200	19.29	0.9683	3.35	139.9	45.1	31.5	0.03232	0.303	6.937	9.839	0.050	887.3	4.64	52.1
250	19.09	0.9701	3.56	135.8	45.0	32.7	0.03463	0.338	7.434	9.342	0.043	796.9	3.79	52.8
300	18.91	0.9715	3.74	132.2	44.9	33.8	0.03661	0.369	7.860	8.916	0.037	730.8	3.17	53.5
350	18.75	0.9726	3.88	128.8	44.9	34.7	0.03835	0.395	8.233	8.543	0.033	680.2	2.69	54.1
450	18.48	0.9741	4.12	122.9	44.9	36.1	0.04129	0.440	8.863	7.913	0.026	607.3	2.01	55.1
550	18.24	0.9752	4.29	117.8	45.0	37.2	0.04371	0.476	9.384	7.393	0.022	557.2	1.55	55.9
600	18.13	0.9756	4.37	115.5	45.0	37.7	0.04478	0.493	9.613	7.163	0.021	537.7	1.37	56.3
650	18.03	0.9760	4.43	113.3	45.1	38.1	0.04577	0.508	9.827	6.950	0.019	520.8	1.21	56.7
700	17.94	0.9763	4.49	111.2	45.1	38.5	0.04670	0.522	10.026	6.751	0.018	506.0	1.07	57.1
750	17.85	0.9765	4.54	109.2	45.2	38.9	0.04757	0.535	10.212	6.565	0.017	493.1	0.96	57.4
800	17.77	0.9768	4.58	107.3	45.2	39.2	0.04839	0.548	10.387	6.389	0.016	481.7	0.85	57.7
900	17.61	0.9772	4.66	103.7	45.3	39.8	0.04989	0.570	10.709	6.067	0.014	462.4	0.68	58.3

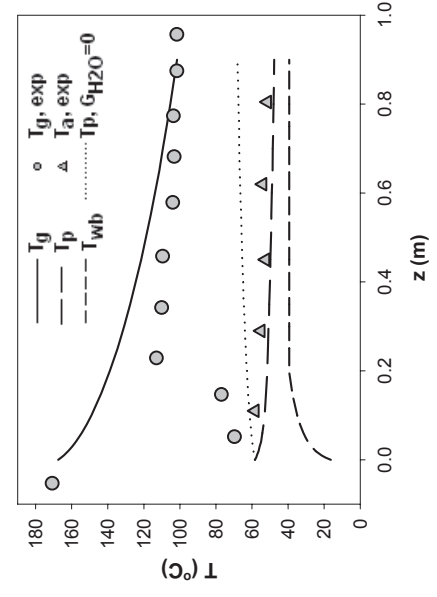
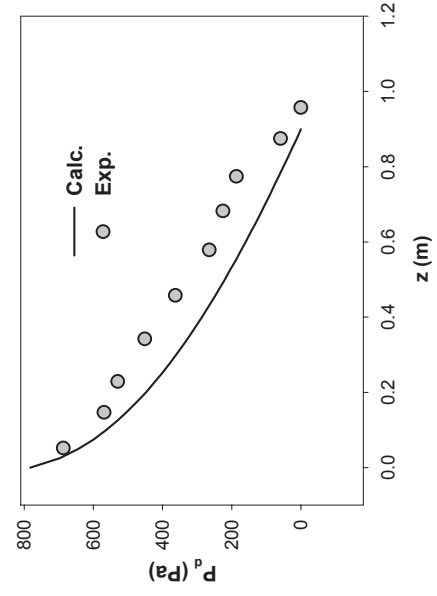
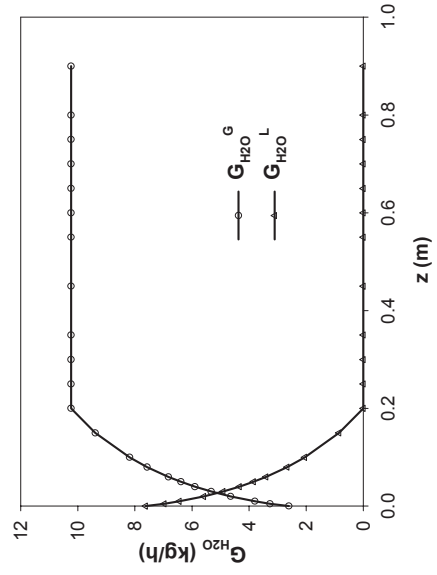
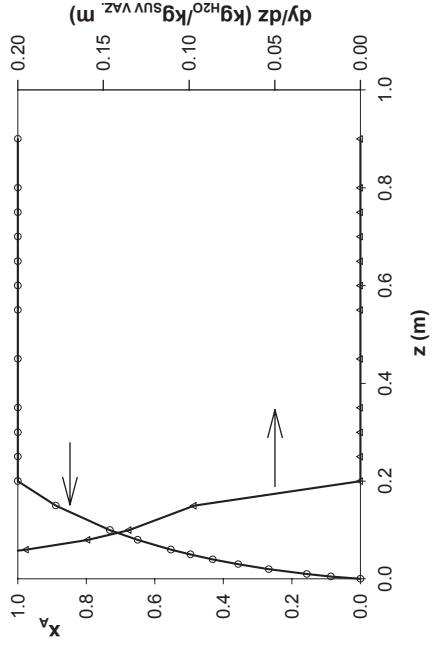
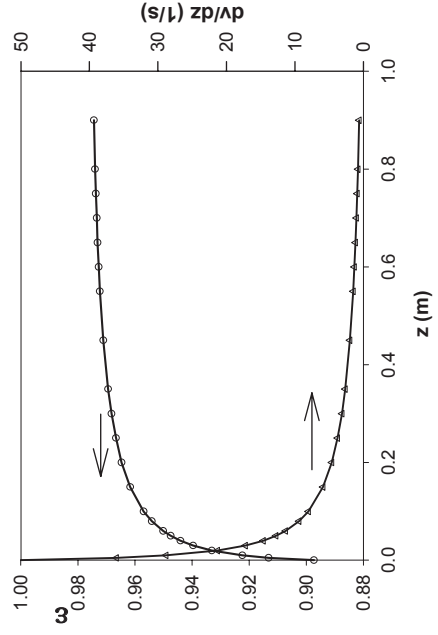
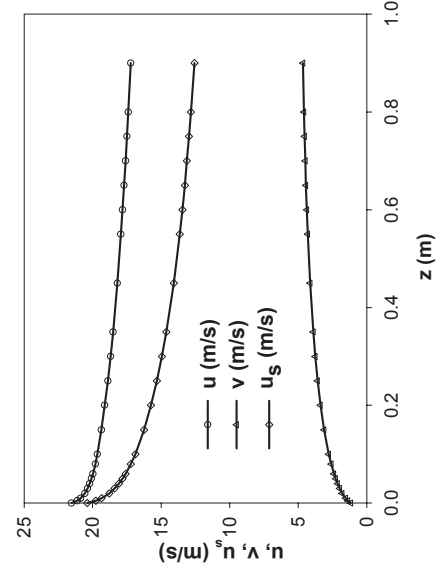
Ogled 16.



Ogled 17.Suspenzija _ Stearat, $y_0 = 0.01237 \text{ kg}_{\text{H}_2\text{O}}/\text{kg}_{\text{SUV.VAZ.}}$, $y_c = 0.04856 \text{ kg}_{\text{H}_2\text{O}}/\text{kg}_{\text{SUV.VAZ.}}$

z mm	u m/s	ε -	v m/s	T_g °C	T_p °C	T_{wb} °C	y kg/kg	x_A -	$G_{\text{H}_2\text{O}}^G$ kg/h	$G_{\text{H}_2\text{O}}^L$ kg/h	dy/dz kg/kgm	dP _d /dz Pa/m	dv/dz 1/s	T_p ($G_{\text{H}_2\text{O}}=0$) °C
0	21.55	0.8973	1.16	167.5	58.3	16.2	0.01237	0.000	2.608	7.626	0.710	4911.7	50.61	58.3
5	21.13	0.9132	1.37	165.8	57.6	19.2	0.01549	0.086	3.265	6.969	0.552	4024.5	36.06	58.6
10	20.88	0.9224	1.53	164.3	57.1	21.4	0.01801	0.156	3.796	6.438	0.461	3457.3	28.83	58.8
20	20.57	0.9331	1.78	161.8	56.2	24.7	0.02205	0.267	4.647	5.587	0.356	2778.0	21.28	59.2
30	20.37	0.9396	1.97	159.7	55.6	27.0	0.02527	0.356	5.327	4.908	0.293	2376.2	17.22	59.6
40	20.21	0.9441	2.13	157.8	55.0	28.8	0.02798	0.431	5.897	4.337	0.250	2104.8	14.61	59.9
50	20.09	0.9475	2.27	156.1	54.5	30.3	0.03032	0.496	6.390	3.844	0.219	1906.5	12.77	60.1
60	19.98	0.9501	2.39	154.5	54.2	31.5	0.03239	0.553	6.826	3.409	0.195	1753.7	11.37	60.4
80	19.80	0.9541	2.59	151.6	53.5	33.4	0.03591	0.650	7.568	2.667	0.159	1531.0	9.39	60.8
100	19.65	0.9570	2.77	149.0	53.0	34.9	0.03884	0.731	8.186	2.049	0.135	1374.5	8.02	61.2
150	19.36	0.9617	3.11	143.5	52.1	37.6	0.04453	0.889	9.385	0.850	0.097	1126.1	5.89	62.1
200	19.12	0.9647	3.37	138.8	51.5	39.3	0.04857	1.000	10.235	0.000	0.000	976.8	4.62	62.8
250	18.89	0.9667	3.58	134.6	51.1	39.3	0.04857	1.000	10.235	0.000	0.000	873.6	3.76	63.4
300	18.69	0.9682	3.75	130.9	50.7	39.3	0.04857	1.000	10.235	0.000	0.000	798.6	3.13	64.0
350	18.51	0.9694	3.89	127.5	50.3	39.3	0.04857	1.000	10.235	0.000	0.000	741.2	2.65	64.5
450	18.20	0.9711	4.12	121.5	49.7	39.3	0.04857	1.000	10.235	0.000	0.000	658.9	1.97	65.3
550	17.94	0.9723	4.30	116.2	49.1	39.3	0.04857	1.000	10.235	0.000	0.000	602.5	1.51	66.0
600	17.82	0.9727	4.37	113.8	48.9	39.3	0.04857	1.000	10.235	0.000	0.000	580.4	1.32	66.4
650	17.70	0.9731	4.43	111.5	48.6	39.3	0.04857	1.000	10.235	0.000	0.000	561.4	1.17	66.7
700	17.60	0.9734	4.48	109.4	48.4	39.3	0.04857	1.000	10.235	0.000	0.000	544.8	1.03	67.0
750	17.50	0.9737	4.53	107.3	48.2	39.3	0.04857	1.000	10.235	0.000	0.000	530.3	0.92	67.2
800	17.40	0.9740	4.57	105.3	48.0	39.3	0.04857	1.000	10.235	0.000	0.000	517.4	0.81	67.5
900	17.22	0.9744	4.65	101.6	47.6	39.3	0.04857	1.000	10.235	0.000	0.000	495.9	0.64	68.0

Ogled 17.

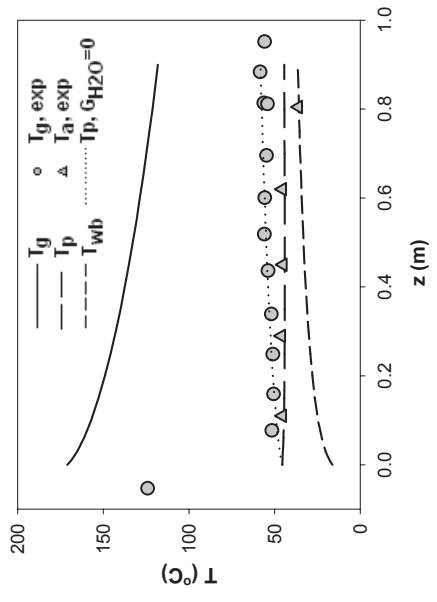
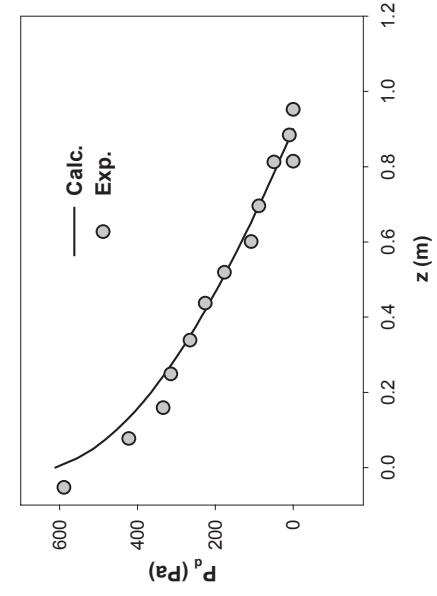
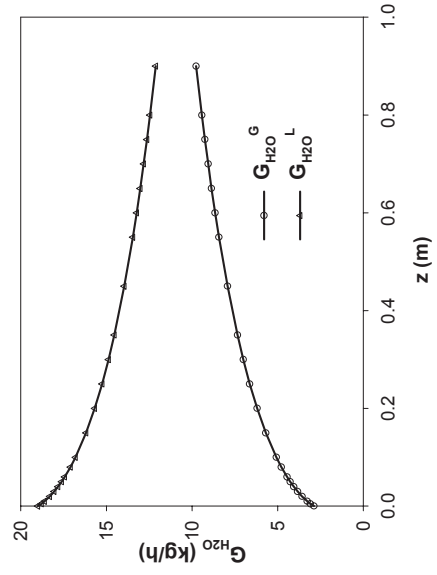
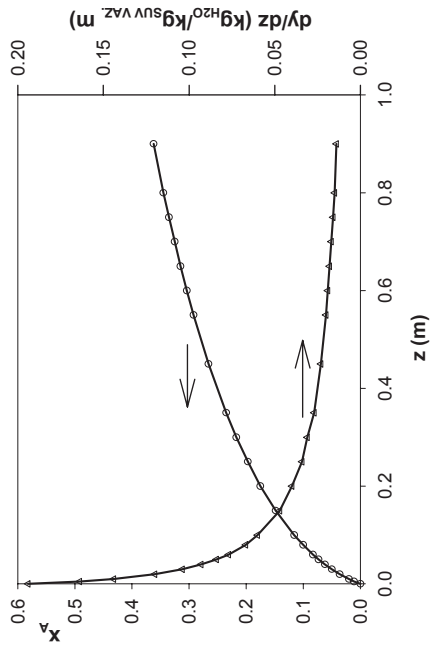
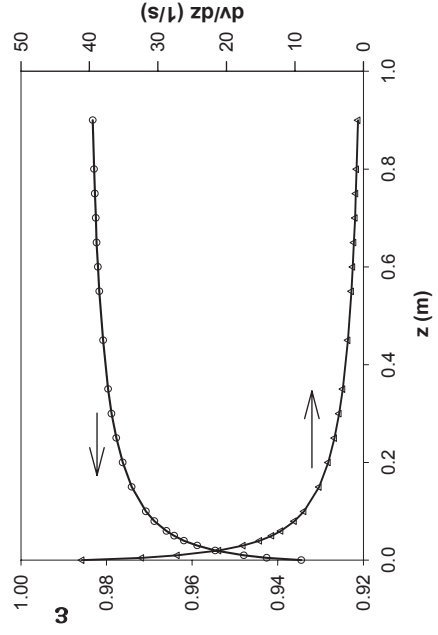
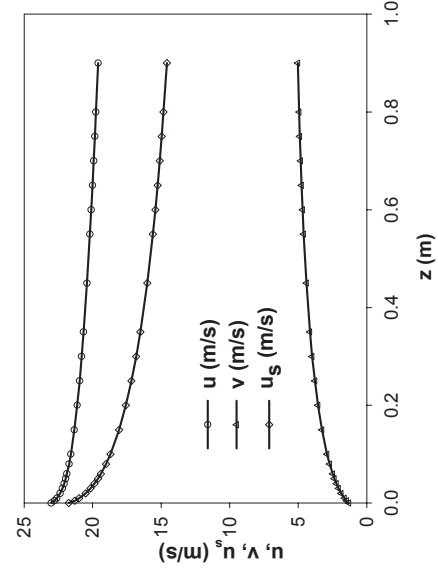


Ogled 18.

Suspenzija _ Cineb, $y_0 = 0.01237 \text{ kg}_{\text{H}_2\text{O}}/\text{kg}_{\text{SUV.VAZ.}}$, $y_e = 0.09401 \text{ kg}_{\text{H}_2\text{O}}/\text{kg}_{\text{SUV.VAZ.}}$.

z mm	u m/s	ε -	v m/s	T_g °C	T_p °C	T_{wb} °C	y kg/kg	x_A -	$G_{\text{H}_2\text{O}}^G$ kg/h	$G_{\text{H}_2\text{O}}^L$ kg/h	dy/dz kg/kgm	dP _d /dz Pa/m	dv/dz 1/s	T_p ($G_{\text{H}_2\text{O}}=0$) °C
0	23.03	0.9345	1.29	171.0	45.5	16.2	0.01237	0.000	2.879	18.994	0.194	3003.2	41.06	45.5
5	22.78	0.9426	1.47	169.8	45.4	17.1	0.01326	0.011	3.086	18.787	0.164	2614.7	32.35	45.8
10	22.61	0.9479	1.62	168.7	45.3	17.8	0.01403	0.020	3.265	18.609	0.144	2333.6	27.18	46.1
20	22.37	0.9546	1.86	166.9	45.1	19.1	0.01534	0.036	3.570	18.304	0.120	1958.0	21.11	46.5
30	22.21	0.9588	2.05	165.3	45.0	20.1	0.01645	0.050	3.828	18.045	0.104	1715.6	17.55	46.9
40	22.08	0.9619	2.21	163.9	44.9	20.9	0.01743	0.062	4.056	17.817	0.093	1543.7	15.15	47.3
50	21.97	0.9642	2.36	162.6	44.8	21.7	0.01831	0.073	4.262	17.612	0.084	1414.1	13.39	47.6
60	21.88	0.9660	2.48	161.3	44.7	22.4	0.01912	0.083	4.449	17.425	0.077	1311.9	12.04	47.9
80	21.72	0.9688	2.70	159.1	44.6	23.5	0.02056	0.100	4.784	17.090	0.067	1159.9	10.07	48.5
100	21.59	0.9708	2.89	157.1	44.4	24.5	0.02182	0.116	5.078	16.796	0.060	1050.8	8.68	48.9
150	21.33	0.9741	3.26	152.7	44.2	26.5	0.02447	0.148	5.694	16.180	0.047	874.2	6.47	50.0
200	21.13	0.9762	3.55	149.0	44.1	27.9	0.02664	0.175	6.198	15.676	0.040	766.3	5.13	50.9
250	20.95	0.9777	3.78	145.7	44.0	29.1	0.02848	0.197	6.628	15.246	0.034	692.4	4.21	51.7
300	20.80	0.9788	3.98	142.7	44.0	30.1	0.03010	0.217	7.005	14.869	0.031	638.1	3.54	52.4
350	20.66	0.9796	4.14	139.9	44.0	31.0	0.03155	0.235	7.341	14.532	0.027	596.4	3.02	53.1
450	20.41	0.9808	4.40	135.0	44.0	32.4	0.03406	0.266	7.926	13.948	0.023	536.1	2.27	54.3
550	20.20	0.9817	4.60	130.6	44.0	33.6	0.03620	0.292	8.423	13.451	0.020	494.6	1.76	55.3
600	20.10	0.9820	4.68	128.6	44.0	34.1	0.03716	0.304	8.647	13.226	0.019	478.3	1.56	55.7
650	20.01	0.9823	4.76	126.6	44.1	34.5	0.03807	0.315	8.858	13.016	0.018	464.2	1.39	56.2
700	19.92	0.9825	4.82	124.8	44.1	35.0	0.03892	0.325	9.057	12.817	0.017	451.8	1.23	56.6
750	19.84	0.9827	4.88	123.0	44.2	35.4	0.03974	0.335	9.246	12.628	0.016	441.0	1.10	57.0
800	19.76	0.9829	4.93	121.3	44.2	35.7	0.04051	0.345	9.425	12.449	0.015	431.5	0.99	57.4
900	19.60	0.9832	5.02	118.1	44.3	36.4	0.04194	0.362	9.759	12.115	0.014	415.3	0.79	58.1

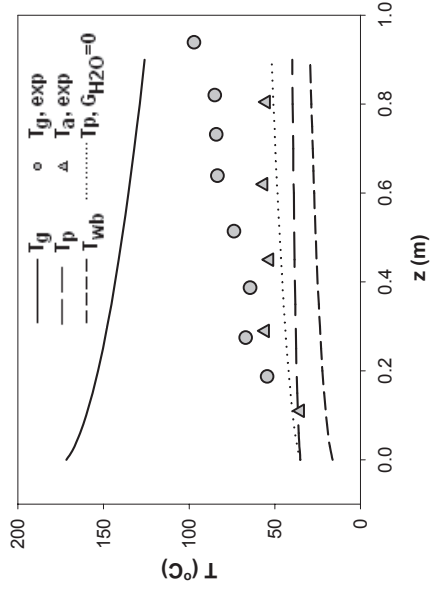
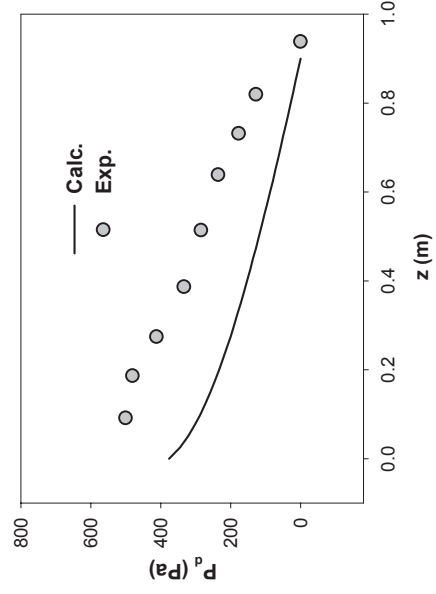
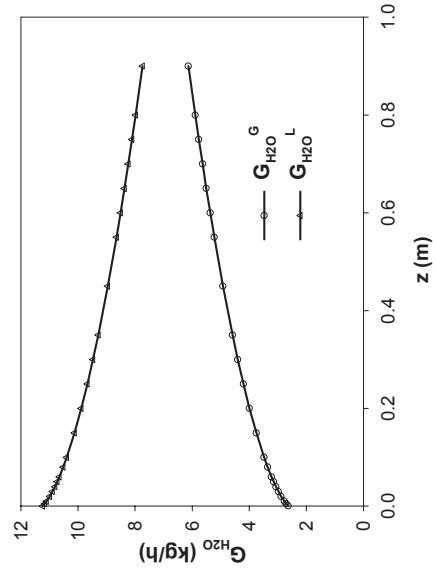
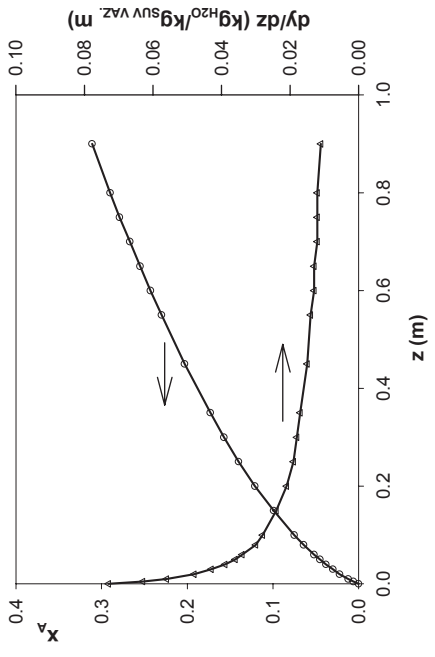
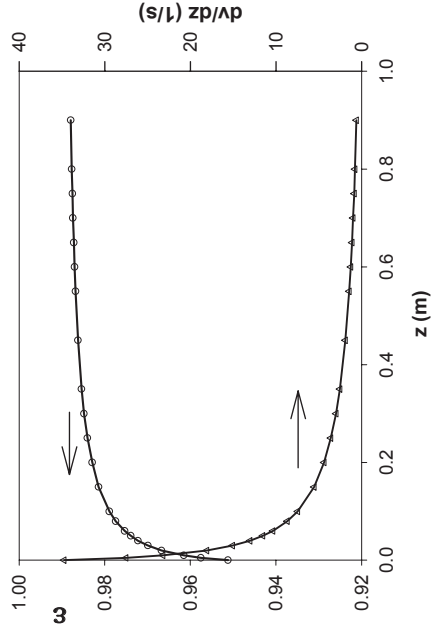
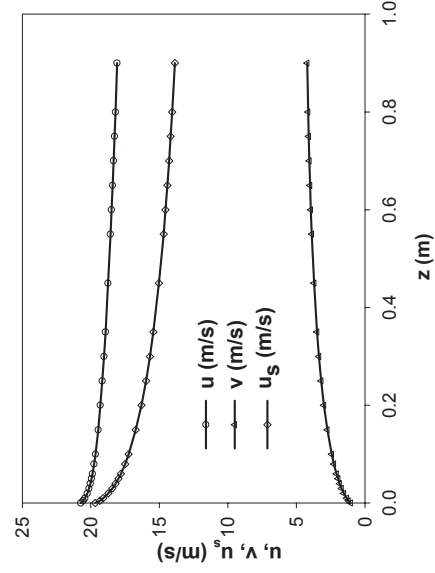
Ogled 18.



Ogled 19.Suspenzija _ Cineb, $y_0 = 0.01237 \text{ kg}_{\text{H}_2\text{O}}/\text{kg}_{\text{SUV.VAZ.}}$, $y_e = 0.06516 \text{ kg}_{\text{H}_2\text{O}}/\text{kg}_{\text{SUV.VAZ.}}$

z mm	u m/s	ε -	v m/s	T_g °C	T_p °C	T_{wb} °C	y kg/kg	x_A -	$G_{\text{H}_2\text{O}}^G$ kg/h	$G_{\text{H}_2\text{O}}^L$ kg/h	dy/dz kg/kgm	dP _d /dz Pa/m	dv/dz 1/s	T_p ($G_{\text{H}_2\text{O}}=0$) °C
0	20.73	0.9512	1.05	171.7	35.0	16.2	0.01237	0.000	2.635	11.237	0.073	1597.7	34.74	35.0
5	20.55	0.9575	1.20	170.7	35.1	16.5	0.01271	0.006	2.707	11.165	0.063	1428.3	27.52	35.4
10	20.43	0.9615	1.33	169.8	35.2	16.8	0.01301	0.012	2.770	11.102	0.056	1294.1	23.20	35.7
20	20.26	0.9667	1.53	168.2	35.4	17.3	0.01353	0.022	2.881	10.991	0.048	1105.7	18.09	36.3
30	20.13	0.9699	1.70	166.9	35.6	17.8	0.01398	0.030	2.977	10.895	0.043	980.1	15.08	36.8
40	20.03	0.9722	1.84	165.7	35.7	18.2	0.01439	0.038	3.064	10.808	0.039	889.4	13.03	37.3
50	19.95	0.9739	1.96	164.6	35.9	18.5	0.01476	0.045	3.143	10.728	0.036	820.3	11.54	37.7
60	19.88	0.9753	2.07	163.6	36.0	18.9	0.01511	0.052	3.218	10.654	0.034	765.5	10.38	38.1
80	19.76	0.9774	2.26	161.7	36.2	19.4	0.01575	0.064	3.354	10.518	0.030	683.2	8.68	38.8
100	19.66	0.9789	2.42	160.0	36.4	20.0	0.01634	0.075	3.478	10.394	0.028	623.7	7.48	39.4
150	19.46	0.9814	2.74	156.3	36.8	21.1	0.01762	0.099	3.751	10.121	0.024	526.9	5.56	40.8
200	19.30	0.9829	2.99	153.2	37.2	22.1	0.01874	0.121	3.989	9.883	0.021	467.4	4.39	41.9
250	19.16	0.9840	3.19	150.3	37.5	22.9	0.01974	0.140	4.203	9.669	0.019	426.6	3.59	43.0
300	19.04	0.9848	3.35	147.8	37.7	23.6	0.02066	0.157	4.400	9.472	0.018	396.6	3.00	43.9
350	18.93	0.9854	3.49	145.4	38.0	24.3	0.02152	0.173	4.583	9.289	0.017	373.6	2.55	44.8
450	18.74	0.9862	3.71	141.1	38.4	25.5	0.02310	0.203	4.918	8.954	0.015	340.5	1.89	46.3
550	18.56	0.9868	3.88	137.2	38.7	26.5	0.02453	0.230	5.222	8.650	0.014	317.8	1.44	47.7
600	18.49	0.9870	3.94	135.4	38.9	27.0	0.02520	0.243	5.365	8.507	0.013	308.9	1.27	48.4
650	18.41	0.9872	4.00	133.7	39.1	27.4	0.02585	0.255	5.503	8.369	0.013	301.3	1.12	49.0
700	18.34	0.9874	4.05	132.0	39.2	27.8	0.02647	0.267	5.636	8.236	0.012	294.7	0.99	49.6
750	18.27	0.9875	4.10	130.4	39.3	28.2	0.02708	0.279	5.765	8.107	0.012	288.8	0.87	50.1
800	18.20	0.9877	4.14	128.8	39.5	28.6	0.02767	0.290	5.890	7.982	0.012	283.8	0.77	50.7
900	18.08	0.9879	4.21	125.9	39.7	29.3	0.02879	0.311	6.130	7.742	0.011	275.3	0.61	51.7

Ogled 19.





PRILOG 4

**Numerički program za sušenje suspenzija u sušnici sa fontanskim slojem
inertnih čestica i cevnim umetkom**

```

'SUSENJE SUSPENZIJA U DTSB
datum$ = "13.05.2005."
CLS
GOSUB STRINGOVI
CLS : PRINT : COLOR 9, 0: PRINT TAB(12); "PROGRAM ZA IZRACUNAVANJE v, e, -dP / dz i parametara
susenja"
PRINT TAB(22); "U PNEUMATSKOM TRANSPORTU ...." + datum$: COLOR 2, 0
DIM GRDIN(9000), Z(9000), D(9000), dekop(9000), PRES(9000), grd(9000)
'
'===== K O N S T A N T E =====
G = 9.81: pi = 3.141593: ps = .873: Cps = .9: Csum = .837: MrH2O = 18: MrSV = 29: R = .082057: PATM = 1
Tok = 27: fiokol = .5: roH2OL = 1000.1549# - .0113 * Tok - .00487 * Tok ^ 2 + 7.7027E-06 * Tok ^ 3
'
'===== G E O M E T R I J A I I N E R T N E C E S T I C E =====
LTUB = .9: dp = .0033: ROP = 920.7: epsa = .3573: EMF = .4: Dt = .07: DCOL = .215: At = Dt ^ 2 * pi / 4:
DCOLGORE = .32
HANUL = .85: delhanul = .225: Aanul = (DCOL ^ 2 - Dt ^ 2) * pi / 4: Dn = .07
'
zu$ = "Old Run L xH2O0 V0 Gsus GH200 Tgci Tpi Tgce Gd/Gv Gp xA film0 TgceCAL
GRADan et0ZG et0ME vt0ZG vt0ME dpdz0ZG dpdz0ME pH GRESKA Uch Ud/Uch Ech"
zb$ = "## ## ##### #.### ###.## ##.## ##.## ###.# ##.# ###.# ##### #.### ##.## ###.# #####
##### #.### #.## #.## ##### ##### ##### ##.## ##.## #.### #.####"
'ispis zbirnih rezultata
imzbir$ = "c:\zgzlorana\1\21ZDTSB.txt"
OPEN "o", #2, imzbir$
PRINT #2, "SUSENJE DTSB " + datum$: PRINT #2, fik$: PRINT #2, napomena$: PRINT #2,
napomena1$: PRINT #2, fik$
PRINT #2, zu$: PRINT #2, fik$
'
FOR ogledko = 1 TO 19
IF ogledko = 1 THEN staraoznaka = 1: GOTO 10: ' run zz1
IF ogledko = 2 THEN staraoznaka = 2: GOTO 20: ' run zz2
IF ogledko = 3 THEN staraoznaka = 3: GOTO 30: ' run zz3
IF ogledko = 4 THEN staraoznaka = 4: GOTO 40: ' run zz4
IF ogledko = 5 THEN staraoznaka = 5: GOTO 50: ' run zz5
IF ogledko = 6 THEN staraoznaka = 6: GOTO 60: ' run zz6
IF ogledko = 7 THEN staraoznaka = 7: GOTO 70: ' run zz7
IF ogledko = 8 THEN staraoznaka = 8: GOTO 80: ' run zz8
IF ogledko = 9 THEN staraoznaka = 16: GOTO 90: ' run zz16
IF ogledko = 10 THEN staraoznaka = 17: GOTO 100: ' run zz17
IF ogledko = 11 THEN staraoznaka = 18: GOTO 110: ' run zz18
IF ogledko = 12 THEN staraoznaka = 19: GOTO 120: ' run zz19
IF ogledko = 13 THEN staraoznaka = 9: GOTO 130: ' run zz9
IF ogledko = 14 THEN staraoznaka = 10: GOTO 140: ' run zz10
IF ogledko = 15 THEN staraoznaka = 11: GOTO 150: ' run zz11
IF ogledko = 16 THEN staraoznaka = 12: GOTO 160: ' run zz12
IF ogledko = 17 THEN staraoznaka = 13: GOTO 170: ' run zz13
IF ogledko = 18 THEN staraoznaka = 14: GOTO 180: ' run zz14
IF ogledko = 19 THEN staraoznaka = 15: GOTO 190: ' run zz15
'
'===== ULAZNI PODACI =====
10 ogled$ = "zz1": susp$ = "Voda": L = .05: rosusp = roH2OL / 1000: VvazOK = 255.1: prtop = -256: Tf0 =
141.1: Tgeexp = 100.1: Gsus0 = 4.8: xH2O0 = 1: Gp = .241: gradan = 25: Ta1 = 70.7: Ta2 = 70.7: Ta3 = 70:
Ta4 = 71: Ta5 = 73
GOTO 300: '
'=====
20 ogled$ = "zz2": susp$ = "Voda": L = .05: rosusp = roH2OL / 1000: VvazOK = 251.5: prtop = -256: Tf0 =
139.7: Tgeexp = 82.5
Gsus0 = 8.35: xH2O0 = 1: Gp = .24: gradan = 23: Ta1 = 56: Ta2 = 55.3: Ta3 = 55: Ta4 = 42: Ta5 = 37.4
GOTO 300: '
'=====
30 ogled$ = "zz3": susp$ = "Voda": L = .05: rosusp = roH2OL / 1000: VvazOK = 253.6: prtop = -257: Tf0 =
134.4: Tgeexp = 71.6
Gsus0 = 9.88: xH2O0 = 1: Gp = .26: gradan = 20: Ta1 = 54: Ta2 = 46.5: Ta3 = 46.5: Ta4 = 32: Ta5 = 32
GOTO 300: '
'=====

```

```

40 ogled$ = "zz4": susp$ = "Voda": L = .05: rosusp = roH2OL / 1000: VvazOK = 245.7: prtop = -270: Tf0 =
172.3: Tgeexp = 107.6: Gsus0 = 6.25: xH2O0 = 1: Gp = .299: gradan = 25: Ta1 = 74: Ta2 = 76: Ta3 = 75: Ta4
= 55.5: Ta5 = 51
GOTO 300: '
=====
50 ogled$ = "zz5": susp$ = "Voda": L = .05: rosusp = roH2OL / 1000: VvazOK = 239.8: prtop = -267: Tf0 =
176!: Tgeexp = 97.3: Gsus0 = 9.63: xH2O0 = 1: Gp = .3: gradan = 23: Ta1 = 78: Ta2 = 73.5: Ta3 = 73: Ta4 =
51: Ta5 = 45
GOTO 300: '
=====
60 ogled$ = "zz6": susp$ = "Voda": L = .05: rosusp = roH2OL / 1000: VvazOK = 239.2: prtop = -267: Tf0 =
176: Tgeexp = 79
Gsus0 = 12.68: xH2O0 = 1: Gp = .29: gradan = 21: Ta1 = 66: Ta2 = 59: Ta3 = 58.5: Ta4 = 43.7: Ta5 = 38
GOTO 300: '
=====
70 ogled$ = "zz7": susp$ = "Voda": L = .05: rosusp = roH2OL / 1000: VvazOK = 236.5: prtop = -267: Tf0 =
200!: Tgeexp = 95.2: Gsus0 = 12.45: xH2O0 = 1: Gp = .288: gradan = 20: Ta1 = 74.3: Ta2 = 64: Ta3 = 63: Ta4
= 68: Ta5 = 37.8
GOTO 300: '
=====
80 ogled$ = "zz8": susp$ = "Voda": L = .05: rosusp = roH2OL / 1000: VvazOK = 235.9: prtop = -250: Tf0 =
200: Tgeexp = 112.6: Gsus0 = 9.65: xH2O0 = 1: Gp = .274: gradan = 21: Ta1 = 77: Ta2 = 67.5: Ta3 = 66: Ta4
= 67: Ta5 = 70
GOTO 300
=====
90 ogled$ = "zz16": susp$ = "Voda": L = .08: rosusp = roH2OL / 1000: VvazOK = 228: prtop = -276: Tf0 =
157.1: Tgeexp = 94.1: Gsus0 = 5.98: xH2O0 = 1: Gp = .3806: gradan = 32: Ta1 = 65.3: Ta2 = 75.7: Ta3 =
75.3: Ta4 = 77.3: Ta5 = 78.7
GOTO 300: '
=====
100 ogled$ = "zz17": susp$ = "Voda": L = .08: rosusp = roH2OL / 1000: VvazOK = 222.9: prtop = -273: Tf0 =
174: Tgeexp = 103.5: Gsus0 = 7: xH2O0 = 1: Gp = .4108: gradan = 32: Ta1 = 69: Ta2 = 80.5: Ta3 = 80.5: Ta4
= 82: Ta5 = 85
GOTO 300: '
=====
110 ogled$ = "zz18": susp$ = "Voda": L = .11: rosusp = roH2OL / 1000: VvazOK = 224.1: prtop = -259: Tf0 =
157.1: Tgeexp = 91.1: Gsus0 = 5.75: xH2O0 = 1: Gp = .3524: gradan = 25: Ta1 = 37.3: Ta2 = 71: Ta3 = 69.7:
Ta4 = 70.4: Ta5 = 75
GOTO 300: '
=====
120 ogled$ = "zz19": susp$ = "Voda": L = .11: rosusp = roH2OL / 1000: VvazOK = 219: prtop = -252: Tf0 =
168.1: Tgeexp = 99.4: Gsus0 = 6.93: xH2O0 = 1: Gp = .3297: gradan = 24: Ta1 = 41.7: Ta2 = 73.7: Ta3 =
72.3: Ta4 = 73: Ta5 = 78.3
GOTO 300
=====
130 ogled$ = "zz9": susp$ = "CaCO3": L = .05: rosusp = 1.13: VvazOK = 256.7: prtop = -238: Tf0 = 141.2:
Tgeexp = 100!
Gsus0 = 8.84: xH2O0 = .7: Gp = .101: gradan = 13: Ta1 = 53.5: Ta2 = 52.5: Ta3 = 53: Ta4 = 54.5: Ta5 = 56
GOTO 300: '
=====
140 ' u l a z n i p o d a c i
ogled$ = "zz10": susp$ = "CaCO3": L = .08: rosusp = 1.13: VvazOK = 247.3: prtop = -245: Tf0 = 149: Tgeexp =
86.78
Gsus0 = 7.41: xH2O0 = .7: Gp = .308: gradan = 24: Ta1 = 50: Ta2 = 56: Ta3 = 55.5: Ta4 = 55: Ta5 = 56
GOTO 300: '
=====
150 ogled$ = "zz11": susp$ = "CaCO3": L = .08: rosusp = 1.13: VvazOK = 244.6: prtop = -248: Tf0 = 167.3:
Tgeexp = 103.3
Gsus0 = 15.55: xH2O0 = .7: Gp = .34: gradan = 20: Ta1 = 40.5: Ta2 = 42.5: Ta3 = 41.5: Ta4 = 42.5: Ta5 = 43
GOTO 300: '
=====
160 ogled$ = "zz12": susp$ = "Stearat": L = .08: rosusp = .88: VvazOK = 234.2: prtop = -260: Tf0 = 168.3:
Tgeexp = 88
Gsus0 = 19.57: xH2O0 = .8199: Gp = .377: gradan = 35: Ta1 = 41: Ta2 = 44.5: Ta3 = 44: Ta4 = 46: Ta5 = 47
GOTO 300: '
=====

```

```

170 ogled$ = "zz13": susp$ = "Stearat": L = .08: rosusp = .88: VvazOK = 232.2: prtop = -295: Tf0 = 167.5:
Tgeexp = 96.6
Gsus0 = 10.57: xH2O0 = .8199: Gp = .422: gradan = 38: Ta1 = 51.5: Ta2 = 54: Ta3 = 52.5: Ta4 = 55: Ta5 =
58.33
GOTO 300: '
'=====
180 ogled$ = "zz14": susp$ = "Cineb": L = .08: rosusp = 1.07: VvazOK = 238.7: prtop = -248: Tf0 = 171:
Tgeexp = 86.4
Gsus0 = 23.65: xH2O0 = .7506: Gp = .299: gradan = 23: Ta1 = 36: Ta2 = 45.5: Ta3 = 45: Ta4 = 46: Ta5 = 45.5
GOTO 300: '
'=====
190 ogled$ = "zz15": susp$ = "Cineb": L = .08: rosusp = 1.07: VvazOK = 220.4: prtop = -216: Tf0 = 171.7:
Tgeexp = 107.9
Gsus0 = 13.96: xH2O0 = .7523: Gp = .181: gradan = 22: Ta1 = 55: Ta2 = 56.5: Ta3 = 53: Ta4 = 55.5: Ta5 = 35
GOTO 300
'
'===== U S L O V I O K O L I N E =====
300 ppzas = -.0032986 + .0027284 * Tok - 8.6027E-05 * Tok ^ 2 + 1.5932E-06 * Tok ^ 3: ppPARE = fiokol *
ppzas
pvaz = PATM - ppPARE: HH = .622 * fiokol * ppzas / (PATM - fiokol * ppzas)
y0 = HH: rofOK = (1 + y0) * pvaz * MrSV / (R * (Tok + 273))
'
'===== B R Z I N A V A Z D U H A U A N U L U S U =====
gradanmmVS = gradan: gradan = gradan * 9.81 / delhanul: Tag = (Ta4 + Ta5) / 2
GOSUB UANUL
'
'===== P R E R A C U N A V A N J E =====
VvazOK = VvazOK / 3600: Gsus0 = Gsus0 / 3600: Gsus0 = Gsus0 * rosusp: Gvaz = VvazOK * rofOK: Gtube =
Gvaz - Ganul
GH2O0 = xH2O0 * Gsus0: Gsm0 = Gsus0 - GH2O0: Wps = Gp / At: WH2OL0 = GH2O0 / At: cs = Gp / (ROP *
At)
Wsvmat = Gsm0 / At: Gtubesv = Gtube / (1 + y0): Wsv = Gtubesv / At: ye = y0 + GH2O0 / Gtubesv: prtop =
9.81 * prtop
Tp0 = Ta5
'
'===== D E B L J I N A F I L M A na z=0 =====
roH2OL = 1000.1549# - .0113 * Tp0 - .00487 * Tp0 ^ 2 + 7.7027E-06 * Tp0 ^ 3
film0 = (1 / 6) * (WH2OL0 / Wps) * (ROP * dp / roH2OL): film0m = film0 * 1000000!: filmgrupa = 1 + GH2O0 *
ROP / (Gp * roH2OL)
nfilm0 = .5 * dp * (filmgrupa ^ .33333 - 1): nfilm0 = 1000000! * nfilm0
'=====
im$ = "d:\zorana" + "Ogled-" + ogled$ + ".txt"
OPEN "o", #1, im$
PRINT #1, "SUSENJE DTSB      " + datum$: PRINT #1, fik$
'
'===== U S L O V I N A U L A Z U U C E V =====
Tf = Tf0: y = y0
ppzas = -.0032986 + .0027284 * Tf - 8.6027E-05 * Tf ^ 2 + 1.5932E-06 * Tf ^ 3
roH2OG = -.1095 + .0127 * Tf - 2.5625E-04 * Tf ^ 2 + 1.9443E-06 * Tf ^ 3: pbulk = y * PATM / (.622 + y)
roSV = 1.271 - .004303 * Tf + 1.029E-05 * Tf ^ 2 - 1.096E-08 * Tf ^ 3
visSV = (17.0387 + .0474188 * Tf - 2.26249E-05 * Tf ^ 2 + 1.49735E-10 * Tf ^ 3) / 1000000!
visH2OG = (77.4065 + .596955 * Tf - .00201726# * Tf ^ 2 + 4.71756E-06 * Tf ^ 3) / 1E+07
ROF = (1 + y) * pvaz * MrSV / (R * (Tf + 273)): Yprim = y / (1 + y)
vis = (visSV * MrSV ^ (-1 / 2) * (1 - Yprim) + visH2OG * MrH2O ^ (-1 / 2) * Yprim) / (MrSV ^ (-1 / 2) * (1 - Yprim)
+ MrH2O ^ (-1 / 2) * Yprim)
GOSUB UMFUT
Utcevu = Ut: VVAZ0 = Gtube / ROF: Upz0 = VVAZ0 / At: 'Upz0 - povrs. brzina na temp. Tf0
'
COLOR 6, 0
LOCATE 5, 2: PRINT "Ogled _"; ogled$; "  Suspenzija _"; susp$
LOCATE 6, 2: PRINT USING "Sadrazaj vode u suspenziji  x0=#.###"; xH2O0
LOCATE 8, 2: PRINT USING "Dcd=#.### m  Dcg=#.### m  Dt=#.### m  Lt=#.### m  L=#.### mm  Ha=#.###
m"; DCOL; DCOLGORE; Dt; LTUB; L; HANUL
LOCATE 9, 2: PRINT USING "dp=#.###  rop=#.###.#  epsA=#.###  epsmF=#.###"; dp * 1000; ROP; epsa;
EMF
COLOR 9, 0

```

```

LOCATE 11, 2: PRINT USING "V(Tok)=###.# m3/h (Tok) Tgi=###.# oC Tge=###.# oC Gsus=##.## kg/h";
VvazOK * 3600; Tf0; Tgeexp; Gsus0 * 3600
LOCATE 12, 2: PRINT USING "Gp=#.### kg/s ###.# kg/h GRADan=### mmVS"; Gp; Gp * 3600;
gradanmmVS
COLOR 6, 0
LOCATE 13, 2: PRINT USING "Temperature u anulusu T1=###.# T2=###.# T3=###.# T4=###.#
T5=###.#"; Ta1; Ta2; Ta3; Ta4; Ta5
LOCATE 15, 2: PRINT USING "Ua=#.### m/s Ua/Umf=#.### na temperaturi Tag=###.#"; Ua; Ua / UmFTag;
Tag
LOCATE 16, 2: PRINT USING "Gvaz=#.### kg/s Gtube=#.### kg/s Ganul=#.### kg/s Gtube/Gvaz=#.###";
Gvaz; Gtube; Ganul; Gtube / Gvaz
LOCATE 17, 2: PRINT USING "Upz0=#.## m/s Upz0/Ut=#.## Ut=#.## na temperaturi Tgi=###.#"; Upz0;
Upz0 / Utcevul; Tf0
LOCATE 18, 2: PRINT USING "Temp. na ulazu u cev ... gas Tgt0=###.# oC ... cestice Tpc0=###.#"; Tf0; Tp0
LOCATE 19, 2: PRINT USING "y0 = #.##### kgH2O/kgSV"; y0
LOCATE 20, 2: PRINT USING "ye = #.##### kgH2O/kgSV"; ye
LOCATE 21, 2: PRINT USING "Yprim0 = #.##### kgH2OG/kgVV"; Yprim
LOCATE 22, 2: PRINT USING "film0 = ##.## ##.## mikrona"; film0 * 1000000!; nfilm0
COLOR 12, 1: LOCATE 23, 1: PRINT "Izlazni fajl "; im$: COLOR 2, 0
'
GOSUB PSPICA: PRINT #1, fik$: PRINT #1, n4$: PRINT #1, n3$: PRINT #1, n5$
CLS : COLOR 9, 0: PRINT n1$ + " " + drg$: COLOR 2, 0
'
' ===== NAPOJNA TACKA z=0 =====
e = .9999
V = .001: Z = 0: D = .00001
FOR j = 1 TO 100000
Up = (4 / (ROF * pi)) * (Gtube / Dn ^ 2 - (Ganul / Dt ^ 2) * (Z / L)): e = 1 - (cs / V) * (Z / L): IF e > .9999 THEN e
= .9999
ui = Up / e: usl = Up / e - V: DEL = (e - EMF) / (1 - EMF): BEFUN = C2 - (1 / LA) * SQR(1 - (LA * DEL + C1) ^
2)
beta = BMF * (1 - BEFUN): betili = beta * usl ^ 2: aCLAN = betili / ((1 - e) * ROP): bCLAN = (ROP - ROF) * G /
ROP
IF Z = 0 THEN fvelo = (1 / V) * (aCLAN - bCLAN) - V / (Z + D): GOTO 429
fvelo = (1 / V) * (aCLAN - bCLAN) - V / Z
429 feps = (1 / V) * (fvelo * (1 - e) - cs / L)
IF Z + D > L THEN GOTO 430
V = V + fvelo * D
Z = Z + D
NEXT j
430 dpdz1 = (betili + ROF * G * e + FFVEL - ROF * ui ^ 2 * feps) / e
et0ME = e: vt0ME = V: dpdz0ME = dpdz1
COLOR 4, 0: PRINT USING "Pocet. tacka : Et0=#.##### vt0=#.###.### -dp/dz0=#####"; et0ME; vt0ME;
dpdz0ME
COLOR 2, 0
et0 = et0ME
'
' ===== PRORACUN P O D U Z I N I C E V I =====
D = .0001: e = et0: Tf = Tf0: Tp = Tp0: y = y0: Z = 0
FOR i = 1 TO 100000
br = br + 1: brojac
pbulk = y * PATM / (.622 + y): pzH2O = -.0032986 + .0027284 * Tp - 8.6027E-05 * Tp ^ 2 + 1.5932E-06 * Tp ^ 3
deltap = pzH2O - pbulk: FIBZ = 100 * pbulk / pzH2O
IF Z = 0 THEN fibz0 = FIBZ
roH2OG = -.1095 + .0127 * Tf - 2.5625E-04 * Tf ^ 2 + 1.9443E-06 * Tf ^ 3: pvaz = PATM - pbulk
roSV = 1.271 - .004303 * Tf + 1.029E-05 * Tf ^ 2 - 1.096E-08 * Tf ^ 3
visSV = (17.0387 + .0474188 * Tf - 2.26249E-05 * Tf ^ 2 + 1.49735E-10 * Tf ^ 3) / 1000000!
visH2OG = (77.4065 + .596955 * Tf - .00201726# * Tf ^ 2 + 4.71756E-06 * Tf ^ 3) / 1E+07
CpSV = 1.006 + 1.152E-05 * Tf + 5.077E-07 * Tf ^ 2 - 3.612E-10 * Tf ^ 3
CpH2OG = 1.79201 + .00591959# * Tf - 6.40567E-05 * Tf ^ 2 + 3.03481E-07 * Tf ^ 3
lamSV = (24.6424 + .0711216 * Tf) / 1000000!
lamH2OG = (.0169 + 1.1476E-04 * Tf - 6.308E-07 * Tf ^ 2 + 2.8228E-09 * Tf ^ 3) / 1000!
Yprim = y / (1 + y): ROF = (1 + y) * pvaz * MrSV / (R * (Tf + 273))
vis = (visSV * MrSV ^ (-1 / 2) * (1 - Yprim) + visH2OG * MrH2O ^ (-1 / 2) * Yprim) / (MrSV ^ (-1 / 2) * (1 - Yprim)
+ MrH2O ^ (-1 / 2) * Yprim)
CpG = CpSV + y * CpH2OG

```



```

lam = (lamSV * MrSV ^ (-2 / 3) * (1 - Yprim) + lamH2OG * MrH2O ^ (-2 / 3) * Yprim) / (MrSV ^ (-2 / 3) * (1 - Yprim) + MrH2O ^ (-2 / 3) * Yprim)
Di = 2.302E-05 * (PATM * 101325 / 98000!) * ((Tf + 273) / 256) ^ 1.81:Mr = MrSV * MrH2O / ((1 - Yprim) * MrH2O + Yprim * MrSV)
GOSUB UMFUT
Up = Gtube / (ROF * At): ' površinska brzina u cevi
V = cs / (1 - e): ui = Up / e: usl = ui - V: ap = 6 * (1 - e) / dp
Rep = dp * ROF * usl / vis: Pr = vis * CpG / lam: Sc = vis / (ROF * Di)
ATERM = 2 / (1 - (1 - e) ^ .3333): BTERM = .61 / e: RTERM = 4.65 * Rep ^ .28: NTERM = (1 / 3) * (2 + RTERM) / (1 + RTERM)
Shp = 1 + .752 * Rep ^ .472 * Sc ^ .3333 * (1 + 1 / (Rep * Sc)) ^ .3333: kc = Shp * Di / dp
Nup = 2 + .6 * Rep ^ .5 * Pr ^ .3333: hp = Nup * lam / dp
WH2Ogas = Wsv * y: GH2Ogas = WH2Ogas * At: WH2Oisp = Wsv * (y - y0): GH2Oisp = WH2Oisp * At
GH2OLFAZA = GH2O0 - GH2Oisp: WH2OL = GH2OLFAZA / At
pgr = y * PATM / (.622 + y): Trose = 30.2858 * pgr + 75.3953 * pgr / (.0749 + pgr): ' tacka rose
IF xA > 1 THEN FY = 0: GOTO 490
FY = (kc * Mr / (R * (Tf + 273))) * (ap / Wsv * (1 + y)) * deltap
'
490 gasniclan = Wsv * CpSV + WH2Ogas * CpH2OG
fff = hp * ap * (Tf - Tp) / gasniclan
CpL = 4.21 - .0010972 * Tp + 9.8893E-06 * Tp ^ 2 + 1.3403E-08 * Tp ^ 3
utros = Wps * Cps + WH2OL * CpL + Wsuvmat * Csuvm
lis = 2495.4125# - 2.0327 * Tf - .0035369 * Tf ^ 2
ftp = (gasniclan / utros) * fff - (Wsv * lis / utros) * FY
xA = (y - y0) / (ye - y0): ' bezdimenzioni stepen isparavanja
IF racva = 1 THEN 500
IF xA > 1 THEN LKRAJ = Z: racva = 1: ' ako sva voda ispari do nekog z, to z se oznacava sa LKRAJ (dovoljna duzina cevi)
500 IF xA > 1 THEN FY = 0
' izracunavanje hidrodinamickih parametara
DEL = (e - EMF) / (1 - EMF): BEFUN = C2 - (1 / LA) * SQR(1 - (LA * DEL + C1) ^ 2): beta = BMF * (1 - BEFUN): betili = beta * usl ^ 2
gru1 = (e ^ 3 / (1 - e)) * (Up / Ut): gru2 = (1 - e) / (usl / Ut): fpmal = (.0017 / gru2 ^ 1.5) / gru1
FPVEL = 2 * fpmal * ROP * (1 - e) * V ^ 2 / Dt
FEP = (ROP - ROF) * G * (1 - e): SIGF = FEP + FFVEL + FPVEL: FEP1 = ROP * G * (1 - e) + ROF * G * e
gama = ROP * V ^ 2 - ROF * ui ^ 2: gor = betili + FFVEL - e * SIGF: dol = gama * e + ROF * ui ^ 2
fa = gor / dol: ' dEPS/dz
dpdz1 = (betili + FFVEL + ROF * G * e - ROF * ui ^ 2 * fa) / e: dpdz2 = FEP1 + FPVEL + FFVEL + gama * fa
DPDZ = dpdz1: fb = V * fa / (1 - e): gamat = gama / Ut: usut = (Up / e - V) / Ut: grd(i) = DPDZ: Z(i) = Z
IF Z = 0 THEN WH2Ogas0 = Wsv * y: GH2Ogas = WH2Ogas0 * At: GH2Ogas0 = GH2Ogas: GH2OLFAZA = GH2O0: GOSUB 3680
IF ABS(Z - .005) < D / 4 THEN GOSUB 3680
IF ABS(Z - .01) < D / 4 THEN GOSUB 3680
IF ABS(Z - .02) < D / 4 THEN GOSUB 3680
IF ABS(Z - .03) < D / 4 THEN GOSUB 3680
IF ABS(Z - .04) < D / 4 THEN GOSUB 3680
IF ABS(Z - .05) < D / 4 THEN GOSUB 3680
IF ABS(Z - .06) < D / 4 THEN GOSUB 3680
IF ABS(Z - .08) < D / 4 THEN GOSUB 3680
IF ABS(Z - .1) < D / 4 THEN GOSUB 3680
IF ABS(Z - .15) < D / 4 THEN GOSUB 3680
IF ABS(Z - .2) < D / 4 THEN GOSUB 3680
IF ABS(Z - .25) < D / 4 THEN GOSUB 3680
IF ABS(Z - .3) < D / 4 THEN GOSUB 3680
IF ABS(Z - .35) < D / 4 THEN GOSUB 3680
IF ABS(Z - .45) < D / 4 THEN GOSUB 3680
IF ABS(Z - .5) < D / 4 THEN GOSUB 3680
IF ABS(Z - .55) < D / 4 THEN GOSUB 3680
IF ABS(Z - .6) < D / 4 THEN GOSUB 3680
IF ABS(Z - .65) < D / 4 THEN GOSUB 3680
IF ABS(Z - .7) < D / 4 THEN GOSUB 3680
IF ABS(Z - .75) < D / 4 THEN GOSUB 3680
IF ABS(Z - .8) < D / 4 THEN GOSUB 3680
IF ABS(Z - .85) < D / 4 THEN GOSUB 3680
IF Z + D > LTUB THEN ttubeEND = Tf: yend = y: GOSUB 3680: GOTO 2530
e = e + fa * D: y = y + FY * D: Tf = Tf - fff * D: Tp = Tp + ftp * D: timko = timko + D / V

```

```

Z = Z + D: NEXT i
'
2530 PRINT n4$: PRINT n3$: PRINT n5$
'
BILANSVODE = GH2Ogas + GH2OLFAZA - GH2O0: PRINT USING "GH2O ispareno = ##.###"; GH2Oisp *
3600
PRINT USING "GH2Ogas0=##.### GH2O0=##.### GH2Ogas iz=##.### GH2OLiq iz=##.###"; GH2Ogas0
* 3600; GH2O0 * 3600; GH2Ogas * 3600; GH2OLFAZA * 3600: PRINT USING "Bilans vode = ##.##";
BILANSVODE
'
' temperatura na kraju cevi i izlazu iz kolone iz bilansa
lis = 2495.4125# - 2.0327 * Tgeexp - .0035369 * Tgeexp ^ 2
ttubecal = (Gtube * CpG * Tf0 + GH2O0 * CpL * Ta5 - GH2Oisp * lis) / (Gtube * CpG + GH2O0 * CpL)
Tgecalc = (Ganul * Ta1 + Gtube * ttubeEND) / Gvaz
'
GOSUB CHOKING
PRINT USING "Gsus0 kg/h =##.##"; Gsus0 * 3600: PRINT USING "TtubeEND calc iz bilansa =###.##";
ttubecal
PRINT USING "izlaz iz sistema Tge CAL =###.##"; Tgecalc:PRINT USING "izlaz iz sistema Tge EXP
=###.##"; Tgeexp
PRINT USING "Vreme boravka u cevi =##.### sec"; timko: COLOR 4, 0: PRINT ogled$
PRINT USING "V0=###.# m3/h (Tok) Tgi=###.# oC Tge=###.# oC Gsus=##.## kg/h"; VvazOK * 3600; Tf0;
Tgeexp; Gsus0 * 3600
PRINT "broj="; br
' Izracunavanje ukupnih efekata
Tfend = Tf: Tpend = Tp: fiend = FIBZ
QEL = Gvaz * CpG * Tf0: Qg = Gvaz * CpG * (Tf0 - Tf): Qip = Wps * At * Cps * (Tp0 - Tp): Qg1 = Gvaz * CpG *
(Tf0 - Tok)
Qip0 = Wps * At * Cps * (Tp0 - Tok): SP = (Qg + Qip) / (WH2OL0 * At): SPa = SP / 4.1868
SP1 = (Qg1 + Qip0) / (WH2OL0 * At): SP1a = SP1 / 4.1868
'
' izracunavanje P0 (na z=0), pocev od kraja cevi ka ulazu u cev, a na bazi izracunatih gradijenata
BEEP: COLOR 4, 0: PRINT "Izracunava se P0"
FOR i = 1 TO br - 1
GRDIN(i) = (grd(i + 1) + grd(i)) / 2
D(i) = Z(i + 1) - Z(i): dekop = dekop + GRDIN(i) * D(i)
can = can + 1: IF can = 50 THEN 2532 ELSE 2533
2532 PRINT USING "Z=##### DEKOP=#####"; Z(i) * 1000; dekop: can = 0
2533 NEXT i: P0 = dekop: p0atm = P0 / 101325 + 1
PRINT USING "P0=##### Pa P0=#.##### atm"; P0; p0atm'
greskatge = 100 * (Tgecalc - Tgeexp) / Tgeexp
PRINT #1, USING "Gsus0 kg/h =##.##"; Gsus0 * 3600
PRINT #1, USING "GH2O ispareno = ##.###"; GH2Oisp * 3600
PRINT #1, USING "GH2Ogas0=##.### GH2O0=##.### GH2Ogas iz=##.### GH2OLiq iz=##.###";
GH2Ogas0 * 3600; GH2O0 * 3600; GH2Ogas * 3600; GH2OLFAZA * 3600
PRINT #1, USING "Kontrola ... bilans vode = ##.##"; BILANSVODE
PRINT #1, USING "TtubeEND calc iz bilansa =###.##"; ttubecal
PRINT #1, USING "izlaz iz sistema Tge CAL =###.##"; Tgecalc
PRINT #1, USING "izlaz iz sistema Tge EXP =###.##"; Tgeexp
PRINT #1, USING "Vreme boravka u cevi =##.### sec"; timko
'
PRINT #1, fik$
PRINT #1, "Izracunati profil pritiska u cevnom umetku"
PRINT #1, "z(mm) P(Pa)"
PRINT #1, "-----"
'
' izracunavanje P(z), na osnovu izracunatog P0 i gradijenata
FOR i = 1 TO br - 1
IF i = 1 THEN PRES(i) = P0: GOSUB 2535
PRES(i + 1) = PRES(i) - GRDIN(i) * D(i)
cnt = cnt + 1: IF cnt = 250 THEN GOSUB 2535
NEXT i
PRINT USING "z, P #####"; Z(br - 1) * 1000; PRES(br - 1): ca = ca + 1
PRINT USING "z, P #####"; Z(br) * 1000; PRES(br): ca = ca + 1
PRINT #1, USING "#####"; Z(br - 1) * 1000; PRES(br - 1)
PRINT #1, USING "#####"; Z(br) * 1000; PRES(br)

```

GOTO 2536

```

2535 PRINT USING "z, P #### #####"; Z(i) * 1000; PRES(i): ca = ca + 1
PRINT #1, USING "#### #####"; Z(i) * 1000; PRES(i)
cnt = 0
RETURN

```

```

2536 COLOR 9, 0: PRINT "Ukupno podataka p(z)"; ca: COLOR 2, 0
PRINT #1, fiks$

```

```

PRINT #1, fik$: br = 0: LKRAJ = 0: racva = 0: dekop = 0: p0atm = 0
CLOSE #1: PRINT : COLOR 4, 0: PRINT "... Izracunato": COLOR 2, 0
PRINT #2, USING zb$: staraoznaka; ogledko; L; xH2O0; VvazOK * 3600; Gsus0 * 3600; GH2O0 * 3600; Tf0;
Tp0; Tgeexp; Gtube / Gvaz; Gp * 3600; xA; nfilm0; Tgecalc; gradan; et0ZG; et0ME; vt0zg; vt0ME; dpdz0ZG;
dpdz0ME; prtop; greskatge; UchCAL; UCHODNOS; Echcal
CLS
timko = 0: xA = 0: NEXT ogledko
CLOSE #2: END

```

```

3680 ' ispis na ekran i u file
IF INT(dpdz1) = INT(dpdz2) THEN pro$ = "ok" ELSE pro$ = "no": ' ovo je
' bila neka provera, verovatno visak sada jer program radi
IF GH2OL<0 THEN GH2OL=0
PRINT USING z2$: Z * 1000; ui; e; V; Tf; Tp; Trose; y; 100 * xA; GH2Ogas * 3600; GH2OLFAZA * 3600; FY;
DPDZ
3682 PRINT #1, USING z2$: Z * 1000; ui; e; V; Tf; Tp; Trose; y; xA; GH2Ogas * 3600; GH2OLFAZA * 3600;
FY; DPDZ; fb
RETURN

```

STRINGOVI:

```

n1$ = "SUSENJE u PT - Integralni model"
n4$ = "z u e v Tf Tp Tros y xA GH2Og GH2OL dy/dz dP/dz dv/dz"
n3$ = "mm m/s - m/s oC oC kg/kg - kg/h kg/h kg/kgm Pa/m 1/s"
n5$ = "-----"
z2$ = "### ##.## #.#### ##.## ###.# ###.# ###.# #.##### #.### ##.### ##.### #.### #####.# ###.##"
RETURN

```

UMFUT:

```

ROF = (1 + y) * pvaz * MrSV / (R * (Tf + 273))
Yprim = y / (1 + y)
vis = (visSV * MrSV ^ (-1 / 2) * (1 - Yprim) + visH2OG * MrH2O ^ (-1 / 2) * Yprim) / (MrSV ^ (-1 / 2) * (1 - Yprim)
+ MrH2O ^ (-1 / 2) * Yprim)

```

```

QA = ((dp * ROF / vis) ^ 2) * 1.75 / (ps * (EMF ^ 3)); QB = 150 * (1 - EMF) * dp * ROF / ((ps ^ 2) * (EMF ^ 3) *
vis)
QC = (-1) * ((dp ^ 3) * ROF * (ROP - ROF) * G / (vis ^ 2)); UMF = (-QB + SQR(QB ^ 2 - 4 * QA * QC)) / (2 * QA)

```

```

Ut = G * (ROP - ROF) * (dp ^ 2) / (18 * vis); RT = dp * ROF * Ut / vis: IF RT < .4 THEN 5050
Ut = ((4 * ((ROP - ROF) ^ 2) * (G ^ 2) / (225 * ROF * vis)) ^ (1 / 3)) * dp: RT = dp * ROF * Ut / vis: IF RT < 500
THEN 5050
Ut = (3.1 * G * (ROP - ROF) * dp / ROF) ^ .5: RT = dp * ROF * Ut / vis
5050 '

```

```

GRADMF = (ROP - ROF) * G * (1 - EMF); BMF = EMF ^ 3 * GRADMF / UMF ^ 2: BMFR = BMF * dp / ROF
BZE = UMF ^ 2 / (EMF ^ 3 * Ut ^ 2); C1 = SQR(1 / (1 + BZE ^ 2)); LA = SQR(1 - C1 ^ 2) - C1: C2 = SQR(1 - C1
^ 2) / LA
RETURN

```

UANUL:

```

Tf = Tag
ppzas = -.0032986 + .0027284 * Tf - 8.6027E-05 * Tf ^ 2 + 1.5932E-06 * Tf ^ 3
roH2OG = -.1095 + .0127 * Tf - 2.5625E-04 * Tf ^ 2 + 1.9443E-06 * Tf ^ 3
pH2OG = roH2OG * R * Tf / MrH2O: FIA = pH2OG / ppzas: HHA = .622 * FIA * ppzas / (PATM - FIA *
ppzas); pvaz = PATM - pH2OG
roSV = 1.271 - .004303 * Tf + 1.029E-05 * Tf ^ 2 - 1.096E-08 * Tf ^ 3
visSV = (17.0387 + .0474188 * Tf - 2.26249E-05 * Tf ^ 2 + 1.49735E-10 * Tf ^ 3) / 1000000!
visH2OG = (77.4065 + .596955 * Tf - .00201726 * Tf ^ 2 + 4.71756E-06 * Tf ^ 3) / 1E+07: HHA = y

```

```

GOSUB UMFUT
rofanul = ROF: UmFtag = UMF
FOR Ua = .1 TO 1.5 STEP .001
repanul = dp * ROF * Ua / (vis * (1 - epsa)): fppak = 94.7 / repanul + .979: desnapak = fppak * (ROF * Ua ^ 2 /
dp) * (1 - epsa) / epsa ^ 3
ankont = 100 * (desnapak - gradan) / gradan: ankNT = ABS(ankont)
IF ankNT < 1 THEN 6000
NEXT Ua
6000 Vanul = Ua * Aanul: Ganul = Vanul * rofanul
RETURN
'

PSPICA:
PRINT #1, "Novi broj ogleđa.": ogledko
PRINT #1, "Ogled _ ": ogled$
PRINT #1, "Suspenzija _ ": susp$
PRINT #1, USING "Sadržaj vode u suspenziji x0=#.###": xH2O0
PRINT #1, USING "Dcd=#.### m Dcg=#.### m Dt=#.### m Lt=#.## m L=#.### mm Ha=#.## m": DCOL;
DCOLGORE; Dt; LTUB; L; HANUL
PRINT #1, USING "dp=#.## rop=###.## epsA=#.### epsmF=#.###": dp * 1000; ROP; epsa; EMF
PRINT #1, USING "V(Tok)=###.## m3/h (Tok) Tgi=###.## oC Tge=###.## oC Gsus=###.## kg/h": VvazOK *
3600; Tf0; Tgeexp; Gsus0 * 3600
PRINT #1, USING "Gp=#.### kg/s ###.## kg/h GRADan=### mmVS": Gp; Gp * 3600; gradanmmVS
PRINT #1, USING "Temperature u anulusu T1=###.## T2=###.## T3=###.## T4=###.## T5=###.##": Ta1;
Ta2; Ta3; Ta4; Ta5
PRINT #1, USING "Ua=#.### m/s Ua/UmF=#.### na temperaturi Tag=###.##": Ua; Ua / UmFtag; Tag
PRINT #1, USING "Gvaz=#.### kg/s Gtube=#.### kg/s Ganul=#.### kg/s Gtube/Gvaz=#.###": Gvaz;
Gtube; Ganul; Gtube / Gvaz
PRINT #1, USING "Upz0=#.## m/s Upz0/Ut=#.## Ut=#.## na temperaturi Tgi=###.##": Upz0; Upz0 /
Utcevu; Utcevu; Tf0
PRINT #1, USING "Temp. na ulazu u cev ... gas Tgt0=###.## oC ... cestice Tpc0=###.##": Tf0; Tp0
PRINT #1, USING "y0 = #.##### kgH20/kgSV": y0
PRINT #1, USING "ye = #.##### kgH20/kgSV": ye
PRINT #1, USING "nfilm0 = ##.## mikrona": nfilm0
RETURN
'

CHOKING:
AW = 1.652: BW = .6986
GOSUB UMFUT
GRADMF = (ROP - ROF) * G * (1 - EMF): RETAL = dp * ROF * Ut / vis: BMF = EMF ^ 3 * GRADMF / UMF ^ 2
BMFR = BMF * dp / ROF: BZE = (1 - EMF) * (ROP - ROF) * G / (BMF * Ut ^ 2)
C1 = SQR(1 / (1 + BZE ^ 2)): LA = SQR(1 - C1 ^ 2) - C1: C2 = SQR(1 - C1 ^ 2) / LA
'

EA = .9999
8000 DELE = (EA - EMF) / (1 - EMF)
BF = C2 - (1 / LA) * SQR(1 - (LA * DELE + C1) ^ 2): FEP = (ROP - ROF) * G * (1 - EA): BETCAL = BMF * (1 -
BF): 'NAS DRAG
BETRAT1 = BETCAL / FEP: ZATERM = AW * Ut: ZBTERM = 4 * BW / BETRAT1: PODKORENOM = ZATERM
^ 2 - ZBTERM
IF ZATERM ^ 2 < ZBTERM THEN EA = EA - .00001: GOTO 8000
USLIP1 = (ZATERM + (ZATERM ^ 2 - ZBTERM) ^ .5) / 2
' izracunavanje us po var modelu
va = cs / (1 - EA): upc = EA * (va + USLIP1)
rey = Dt * ROF * upc / vis: fmal = .0797 / rey ^ .25: FFVEL = 2 * fmal * ROF * upc ^ 2 / Dt
term1 = (1 - EA) / (USLIP1 / Ut): term2 = upc / Ut: term3 = EA ^ 3 / (1 - EA)
FPMALNASE = .0017 / (term1 ^ 1.5 * term2 * term3): FPA = FPMALNASE
FPVEL = 2 * FPA * ROF * (1 - EA) * va ^ 2 / Dt: FEP = (ROP - ROF) * G * (1 - EA)
FPSTAR = FPVEL / FEP: FFSTAR = FFVEL / FEP
fakt = 1 + FPSTAR - (1 - EA) * FFSTAR / EA
DELE = (EA - EMF) / (1 - EMF)
BF = C2 - (1 / LA) * SQR(1 - (LA * DELE + C1) ^ 2)
USLIPF = (UMF / EA) * SQR(EA ^ 3 * (1 - EA) / (EMF ^ 3 * (1 - EMF) * (1 - BF))): USLIP2 = USLIPF *
SQR(fakt)
kontr3 = 100 * (USLIP1 - USLIP2) / USLIP1: KONTR4 = ABS(kontr3)
IF KONTR4 > .1 THEN EA = EA - .00001: GOTO 8000
UchCAL = upc: Echcal = EA: UCHODNOS = Up / UchCAL
RETURN

```

SPISAK SLIKA

Slika 1.1.	Prikaz sušenja pastastih materijala na pokretnim valjcima.....	8
Slika 1.2.	Prikaz sušnice sa raspršavanjem suspenzije u suprotnostrujnom A i istostrujnom B toku sa vazduhom	8
Slika 1.3.	Prikaz koničnog dna sušnice sa raspršavanjem na koji se nastavlja sekundarna sušnica sa vibro-fluidizovanim slojem.....	9
Slika 1.4.	Kinetika sušenja R-soli 1-sušnica sa inertnim česticama, 2-rotaciona cilindrična sušnica, 3-vakuum sušnica sa lopaticama /Leontieva i dr., 2002/	11
Slika 1.5.	Šematski prikaz osnovnih konfiguracija sušnica sa inertnim česticama a-fluidizovani sloj, b-fontansko-fluidizovani sloj, c-fluidizovani sloj sa centralno postavljenim pužnim transporterom (ili sloj sa mehaničkim fontanovanjem), d-fontanski sloj, e-rotirajući (“vortex”) sloj, f-spiralni, vrtložni (“swirling”) sloj, g-vibrofluidizovani sloj, h-rotaciona sušnica, i-pneumatska sušnica, j-sušnica sa dve suprotno orijentisane struje gasa velikih brzina (“impinging stream”) /Kudra i Mujumdar, 2002, Fig. 4.1/.....	13
Slika 1.6.	Šematski prikaz standardne konfiguracije “spin-flash” sušnice	14
Slika 2.1.	Tipični sistemi za kontakt fluid-čestice u pokretnom sloju a) fluidizovani sloj, b) fontanski sloj, c) fontansko-fluidizovani sloj, d) fontanski sloj sa cevnom umetkom, e) fontansko-fluidizovani sloj sa cevnom umetkom, f) transportni sistem.....	31
Slika 2.2.	Tipične zavisnosti gradijenta pritiska u sloju od površinske brzine fluida za fluidizovani, klasični fontanski i fontanski sloj sa cevnom umetkom /Ishikura i dr., 2003/.....	35
Slika 2.3.	Mogući režimi fluidizacije.....	37
Slika 2.4.	Geldart-ova /1973/ mapa mogućih režima fluidizacije u sistemu gas-čestice.....	38
Slika 2.5.	Dijagrami zavisnosti pada pritiska od brzine fluida	39
Slika 2.6.	Strujanje gasa kroz mehur prema Davidson-ovom modelu	47
Slika 2.7.	Model agregativno fluidizovanog sloja Kunii-a i Levenspiel-a.....	48
Slika 2.8.	Struktura mehura u sloju.....	48
Slika 2.9.	Sistem sa vertikalnim transportom čestica	52
Slika 2.10.	Šematski prikaz promene v , p i ϵ duž transportne cevi.....	52
Slika 2.11.	Mogući režimi pri vertikalnom toku smeše gas-čestice /iz Grbavčić, 1989; adaptirano prema Leung-u, 1980 b/	53
Slika 2.12.	Gradijent pritiska u zavisnosti od brzine gasa u vertikalnom toku gas-čestice /iz Grbavčić, 1989/	54
Slika 2.13.	Mapa prelaza između gustog dvofaznog toka gas-čestice, brze fluidizacije i retkog pneumatskog transporta sa smanjenjem brzine gasa pri konstantnoj brzini cirkulacije čestica /Bi i Grace, 1999/	56

Slika 2.14.	Šematski prikaz fontanskog i fontansko-fluidizovanog sloja sa kontrolisanom cirkulacijom čestica i karakterističnim zonama.....	67
Slika 2.15.	Pad pritiska kroz sloj u funkciji protoka vazduha na ulazu u kolonu za sistem vazduh-CaCO ₃ sfere /iz Grbavčić i dr., 1982/	68
Slika 2.16.	Šema padova pritiska u fontanskom sloju sa cevnom umetkom.....	72
Slika 3.1.	Šematski prikaz sušenja u fluidizovanom sloju inertnih čestica	79
Slika 3.2.	Mehanizam sušenja u fluidizovanom sloju inertnih čestica a) tečljiva suspenzija, b) pasta.....	80
Slika 3.3.	Šematski prikaz laboratorijskog postrojenja za sušenje suspenzija 1 - fluidizaciona kolona, 2 - inertne čestice, 3 - distributivna ploča (i nosač sloja), 4 - mešalica, 5 - ciklon, 6 - filter vreće, 7 - prihvatna posuda za suv prah, 8 - električni grejač, 9 - rezervoar suspenzije sa mešalicom, 10 - dozir pumpa, FI - merač protoka vazduha, TI - indikacija temperature, TIC - indikacija i kontrola temperature	83
Slika 3.4.	Šematski prikaz uvećanog laboratorijskog (poluindustrijskog) sistema za sušenje sa fluidizovanim slojem inertnih čestica 1 - rezervoar, 2 - mešalica, 3 - pumpa, 4 - grejač vazduha, 5 - fluidizaciona kolona, 5a - distributor, 5b - inertne čestice, 5c - deflektor, 6 - ciklon, 6a - rotacioni ventil, 7 - vrećasti filter, 7a - programator vrećastog filtera, 8 - prihvatni sudovi za produkt, 9 - skruber, 9a - mlaznica, 9b - punjenje, 10 - ventilator, FI - merač protoka, PI - indikator pritiska, TI - pokretni termopar, TIC - indikacija i kontrola temperature	85
Slika 3.5.	Mobilno poluindustrijsko demonstraciono postrojenje za sušenje suspenzija i pasta u fluidizovanom sloju inertnog materijala	86
Slika 3.6.	Skica površina za razmenu toplote prirodnom konvekcijom i zračenjem.....	90
Slika 3.7.	Šema doziranja suspenzije vakuum pumpom.....	92
Slika 3.8.	Šema doziranja suspenzije peristaltičkom pumpom	92
Slika 3.9.	Šema doziranja paste klipnom pumpom.....	93
Slika 3.10.	Šema doziranja paste pužnim transporterom	93
Slika 3.11.	Specifični kapacitet isparavanja vode u funkciji razlike temperatura (A) i temperature sušenja (B) pri doziranju tečne faze vode.....	95
Slika 3.12.	Specifična potrošnja toplote pri doziranju tečne faze vode u funkciji razlike temperatura	96
Slika 3.13.	Specifična potrošnja vazduha doziranju tečne faze vode u funkciji razlike temperatura	96
Slika 3.14.	Specifični kapacitet isparavanja vode pri sušenju tehničkog Cineba u funkciji razlike temperatura i temperature sušenja za $U_0 \sim \text{const.}$ (A, B) i za $T_{\text{gr}} \sim \text{const.}$ (C, D)	97
Slika 3.15.	Specifična potrošnja toplote pri sušenju tehničkog Cineba u funkciji razlike temperatura (A- $U_0 \sim \text{const.}$, B- $T_{\text{gr}} \sim \text{const.}$)	98

Slika 3.16.	Specifična potrošnja vazduha pri sušenju tehničkog Cineba u funkciji razlike temperatura.....	98
Slika 3.17.	Poređenje eksperimentalnih i izračunatih vrednosti specifične brzine isparavanja vode	98
Slika 3.18.	Šematski prikaz fluidizovanog sloja stabilnih i nestabilnih hidrodinamičkih karakteristika	102
Slika 3.19-A.	Aksijalni profili temperatura suspenzija CaCO_3 , $G_{\text{sus}}=35 \text{ kg/h}$, $x_0=0.7$, $T_{\text{gi}}=308^\circ\text{C}$, $T_{\text{ge}}=96^\circ\text{C}$	103
Slika 3.19-B.	Aksijalni profil temperatura i promena temperature ulaznog i izlaznog vazduha iz sloja suspenzija Cineb, $G_{\text{sus}}=27 \text{ kg/h}$, $x_0=0.64$, $T_{\text{gi}}=230^\circ\text{C}$, $T_{\text{ge}}=89^\circ\text{C}$	103
Slika 3.20.	Specifična brzina isparavanja vode (doziranje tečne faze vode) za $U_0=1.77 \text{ m/s}$, inertne čestice $d_p=1.94 \text{ mm}$	105
Slika 3.21.	Specifična brzina isparavanja vode (doziranje tečne faze vode) za $T_{\text{gi}}=308^\circ\text{C}$ inertne čestice $d_p=0.93 \text{ mm}$ za set ogleda sa $U_0=1.94 \text{ m/s}$ inertne čestice $d_p=1.94 \text{ mm}$ za set ogleda sa $U_0=1.69 \text{ m/s}$	106
Slika 3.22.	Toplotni gubici u funkciji fluidizacionog broja (doziranje tečne faze vode), inertne čestice $d_p=1.94 \text{ mm}$	106
Slika 3.23.	Specifična potrošnja toplote (doziranje tečne faze vode)	107
Slika 3.24.	Specifična potrošnja vazduha.....	107
Slika 3.25.	Zavisnost efikasnosti sušenja (A) i energetske efikasnost (B) od razlike temperatura	109
Slika 3.26.	Sadržaj vlage u produktu u zavisnosti od temperature sušenja.....	110
Slika 3.27.	Raspodela veličine čestica pri sušenju tehničkog Cineb fungicida u sloju staklenih sfera.....	111
Slika 3.28.	Raspodela veličine čestica pri sušenju suspenzije formulisanog Cineba u sloju Al_2O_3 i Y-ZrO ₂ sfera.....	113
Slika 3.29.	Uticaj protoka suspenzije, temperature ulaznog i izlaznog vazduha na “hold-up” materijala (suspenzija Cineb fungicida).....	115
Slika 3.30.	Šematski prikaz eksperimentalnog postupka za određivanje nominalnog vremena zadržavanja produkta u sloju 1-rezervoar suspenzije Cineb fungicida, 2-rezervoar suspenzije $\text{Cu}(\text{OH})_2$, 3-trokraki ventil, 4-peristaltička pumpa, 5-fluidizaciona kolona, 6-ciklon, 7-rotacioni ventil, 8- komora za uzorkovanje praha	117
Slika 3.31.	Odziv sistema na stepenastu promenu boje suspenzije	118
Slika 3.32.	Poređenje eksperimentalnih i izračunatih vrednosti specifične brzine isparavanja vode	119
Slika 3.33.	Pad pritiska u sloju inertnih čestica pri doziranju vode i sušenju suspenzije Cineba u zavisnosti od temperature sušenja	121

- Slika 3.34.** Uvećano laboratorijsko postrojenje sa dodatkom za dosušivanje
 1 - rezervoar, 2 - mešalica, 3 - pumpa, 4 - grejač vazduha, 5 - fluidizaciona kolona, 5a - distributor, 5b - inertne čestice, 5c - deflektor, 6 - ciklon, 6a - rotacioni ventil, 7 - vrećasti filter, 7a - programator vrećastog filtera, 8 - prihvatni sudovi za produkt, 9 - skruber, 9a - mlaznica, 9b - punjenje, 10 - ventilator, 11 - fluidizaciona kolona za dosušivanje ($D_c=110$ mm), 12 - mehanička mešalica, 13 - motor mešalice, 14 - ejektor, 15 - električni predgrejač vazduha (2 kW), 16 - ciklon ($\phi 40$ mm x 100 mm), 17 - vrećasti filter, FI - merač protoka, PI - indikator pritiska, TI - pokretni termopar, TIC - indikacija i kontrola temperature 124
- Slika 3.35.** Uticaj temperature na dosušivanje primarnog praha Cineba iz ogleđa 24 (tabela 3.12) u fluidizovanom sloju inertnog materijala
 A- na sadržaj vlage u dosušenom prahu, B- na sadržaj aktivne materije u dosušenom prahu 126
- Slika 3.36.** Uređaj za dosušivanje sa fluidizovanim slojem praha
 1 - fluidizaciona kolona ($D_c=286$ mm), 2 - raspodeljivač, 3 - mešalica, 4 - motor mešalice, 5 - vrećasti filter, 6 - električni predgrejač vazduha (2 kW), FI - merač protoka, TIC - indikacija i kontrola ulazne temperature vazduha, TI - indikator temperature 127
- Slika 3.37.** Dosušivanje u fluidizovanom sloju praha Cineba – promena sadržaja vlage praha i sadržaja aktivne materije (A) i promena temperatura (B) sa vremenom 127
- Slika 3.38.** Dosušivanje u fluidizovanom sloju praha $\text{Cu}(\text{OH})_2$ – promena sadržaja vlage praha (A) i temperatura (B) sa vremenom 130
- Slika 3.39.** Uvećano laboratorijsko postrojenje sa dodatkom za ciklonsko dosušivanje
 1 - rezervoar, 2 - mešalica, 3 - pumpa, 4 - grejač vazduha, 5 - fluidizaciona kolona, 5a - distributor, 5b - inertne čestice, 5c - deflektor, 6 - ciklon, 6a - rotacioni ventil, 7 - vrećasti filter, 7a - programator vrećastog filtera sušnice, 8 - prihvatni sudovi za produkt, 9 - skruber, 9a - mlaznica, 9b - punjenje, 10 - ventilator, 11 - kolona za dosušivanje ($D_c=110$ mm), 12 - električni predgrejač vazduha (2 kW), 13 - ciklon ($\phi 60$ mm x 120 mm), 14 - vrećasti filter, 14a - programator vrećastog filtera, 15 - ventilator, FI - merač protoka, PI - indikator pritiska, TI - pokretni termopar, TIC - indikacija i kontrola temperature 131
- Slika 3.40.** Uvećano laboratorijsko postrojenje sa dodatkom za hlađenje praha u režimu pneumatskog transporta
 1 - rezervoar, 2 - mešalica, 3 - pumpa, 4 - grejač vazduha, 5 - fluidizaciona kolona, 5a - distributor, 5b - inertne čestice, 5c - deflektor, 6 - ciklon, 6a - rotacioni ventil, 7 - vrećasti filter, 7a - programator vrećastog filtera sušnice, 8 - prihvatni sudovi za produkt, 9 - skruber, 9a - mlaznica, 9b - punjenje, 10 - ventilator, 11 - cevovod za pneumatski transport prečnika 30 mm i dužine 3 m, 12 - ciklon ($\phi 60$ mm x 120 mm), 13 - vrećasti filter, 13a - programator vrećastog filtera, 14 - ventilator, FI - merač protoka, PI - indikator pritiska, TI - pokretni termopar, TIC - indikacija i kontrola temperature 134
- Slika 3.41.** Uticaj relativne vlažnosti atmosferskog vazduha na rezidualnu vlagu praha 134

Slika 3.42.	Dinamika hlađenja praha $\text{Cu}(\text{OH})_2$ iz primarne sušnice u laboratorijskom hladnjaku sa fluidizovanim slojem.....	135
Slika 3.43.	Poluindustrijsko postrojenje za sušenje prošireno sa pužnim transporterom sa duplikatorom 1 - rezervoar, 2 - mešalica, 3 - pumpa, 4 - grejač vazduha, 5 - fluidizaciona kolona, 5a - distributor, 5b - inertne čestice, 5c - deflektor, 6 - ciklon, 6a - rotacioni ventil; 7 - vrećasti filter, 7a - programator vrećastog filtera sušnice, 8 - prihvatni sudovi za produkt, 9 - skruber, 9a - mlaznica, 9b - punjenje, 10 - ventilator, 11 - pužni transporter sa duplikatorom, FI - merač protoka, PI - indikator pritiska, TI - pokretni termopar, TIC - indikacija i kontrola temperature.....	137
Slika 4.1.	Šematski prikaz sušenja u fontanskom sloju inertnih čestica sa cevnom umetkom	141
Slika 4.2.	Šematski prikaz sistema za sušenje u fontanskom sloju sa cevnom umetkom 1 - rezervoar, 2 - mešalica, 3 - pumpa, 4 - grejač vazduha, 5 - kolona, 5a - mlaznica za uvođenje vazduha, 5b - konično dno, 5c - cevni umetak, 5d - distributor vazduha, 5e - pokretna sonda za merenje pritiska i temperature, 6 - ciklon, 6a - rotacioni ventil, 7 - vrećasti filter, 8 - prihvatni sudovi za produkt, 9 - skruber, 9a - mlaznica za uvođenje vode, 9b - punjenje, 10 - ventilator, FI - merač protoka, PI - indikator pritiska, TI- indikator temperature sa pokretnom sondom, TIC - indikacija i kontrola temperature	144
Slika 4.3.	Šematski prikaz fontanskog sloja sa cevnom umetkom	147
Slika 4.4.	Šematski prikaz ulazne zone u cevni umetak.....	149
Slika 4.5.	Kretanje čestica u diferencijalnoj zapremini fontane ulazne zone.....	150
Slika 4.6.	Raspodela protoka vazduha u diferencijalnoj zapremini ulazne zone.....	152
Slika 4.7.	Aksijalni profil statičkog pritiska u transportnoj cevi; upoređenje izračunatih i izmerenih vrednosti ($d_p=1.94$ mm).....	153
Slika 4.8.	Šematski prikaz eksperimentalnog sistema za određivanje koncentracije čestica i brzine zagušenja u vertikalnom transportu gas-čestice a-transportna cev, b-priključci za merenje pritiska, c-spojnica, d-pneumatski zatvarači, e-elektromagnetni ventil za zatvaranje pneumatskog zatvarača, f-elektromagnetni ventil za otvaranje pneumatskog zatvarača, g-mrežica, h-kutija za merenje protoka čestica, i-prihvatni rezervoar, j-ventili, k-prigušna ploča, l-mlaznica, m-dozer čestica (fontanski sloj sa zatvorenim anularnom zonom na vrhu, gornji deo ϕ 200 mm, donji deo 140x140 mm), n-“on-off” ventili.....	156
Slika 4.9.	Promena G_p (kg/s), $-dp_d/dz$ (kPa/m), $(-dp_d/dz)/G_p$ (kPa·s/kg·m), G_p/G_f i ϵ sa U/U_t ($d_p=1.94$ mm, $L=30$ mm) U_s - minimalna brzina gasa za stabilan tok sa klipovima čestica, U_c - brzina zagušenja, (A, B, C, D, E – videti sliku 4.10)	158
Slika 4.10.	Fluktuacije pritiska u zavisnosti od U/U_t ($d_p=1.94$ mm, $L=30$ mm).....	159
Slika 4.11.	Zavisnost standardne devijacije lokalnog statičkog pritiska od površinske brzine gasa ($d_p=1.94$ mm).....	159

- Slika 4.12.** Eksperimentalni podaci za stanje zagušivanja pri transportu čestica približno iste veličine kroz cevi različitog prečnika
neosenčeni simboli - podaci Capes-a i Nakamura-e /1973/, $d_p=2.90$ mm, $\rho_p=2860$ kg/m³, $D_d=76.2$ mm; osenčeni simboli - podaci iz ovog rada, $d_p=2.98$ mm, $\rho_p=2509$ kg/m³, $D_d=30$ mm; A - ε_c i u_{sc}/U_t u zavisnosti od c_s , B - U_c/U_t i v u zavisnosti od ε 163
- Slika 4.13.** Izračunati profili $-dp_d/dz$ u zavisnosti od U , za konstantne protoke čestica ($D_d=30$ mm, $d_p=1.20$ mm)
 U_c predstavlja eksperimentalno određene vrednosti brzine zagušenja za konstantne protoke čestica 163
- Slika 4.14.** Zavisnost u_{sc}/U_t od $\beta u_{sc}^2/F_c$ pri zagušivanju..... 164
- Slika 4.15.** Profil brzine gasa, brzine čestica i relativne brzine između faza duž cevnog umetka, ogled 1 (voda), ogled 16 (kalcijum stearat)..... 174
- Slika 4.16.** Promena poroznosti duž cevnog umetka, ogled 1 (voda), ogled 16 (kalcijum(II)-stearat)..... 174
- Slika 4.17.** Promena statičkog pritiska duž cevnog umetka, ogled 1 (voda), ogled 16 (kalcijum(II)- stearat) 174
- Slika 4.18.** Promena temperatura vazduha u cevnom umetku i u anularnoj zoni sloja, ogled 1 (voda), ogled 16 (kalcijum(II)-stearat) 175
- Slika 4.19.** Promena masenog protoka tečne i gasovite faze vode duž cevnog umetka, ogled 1 (voda), ogled 14 (kalcijum(II)-karbonat) 175
- Slika 4.20.** Promena masenog protoka tečne i gasovite faze vode duž cevnog umetka, ogled 2 (voda), ogled 16 (kalcijum(II)-stearat) 176
- Slika 4.21.** Promena brzine sušenja duž cevnog umetka 176
- Slika 4.22.** Uticaj prisustva glicerola na oblik fontane u fontanskom sloju polipropilenskih čestica, A-bez glicerola, B-sa glicerolom (slika 4 iz Trinidade i dr. /2004/)..... 178
- Slika 4.23.** Zavisnost debljine filma od dužine jednog ciklusa cirkulacije 179
- Slika 4.24.** Poređenje eksperimentalnih i izračunatih vrednosti za brzinu isparavanja vode (ogledi sa $x_A=1$) 183
- Slika 4.25.** Poređenje eksperimentalnih i izračunatih vrednosti temperature vazduha na izlazu iz kolone 180
- Slika 4.26.** Rezultati numeričke simulacije (za uslove iz ogleda 2):
A-Uticaj temperature ulaznog vazduha i temperature inertnih čestica na ulazu u cevni umetak na količinu isparene vode duž cevnog umetka, B-Uticaj brzine cirkulacije inertnih čestica i temperature ulaznog vazduha na količinu isparene vode duž cevnog umetka, C- Potrebna dužina cevnog umetka za potpuno isparavanje vode $G_p=const$ ($x_A=1$), D-Potrebna dužina cevnog umetka za potpuno isparavanje vode $T_{p0}=const$ ($x_A=1$) 185
- Slika 4.27.** Potrebna dužina cevnog umetka za potpuno isparavanje vode pri $T_{p0}=const.$ za uslove iz ogleda 1 ($x_A=1$)..... 186

Slika 4.28.	Poređenje eksperimentalnih i izračunatih vrednosti brzine cirkulacije čestica.....	188
Slika 4.29.	Promena izračunatog gradijenta brzine čestica duž cevnog umetka (ogled 1-voda).....	189
Slika 5.1.	Šematski prikaz modifikovanog fontanskog sloja sa cevnom umetkom i razdvojenom anularnom zonom.....	191
Slika 5.2.	Šeme mernih mesta i vrednosti padova pritiska u FB-sušnici i SBDT-sušnici	193
Slika 5.3.	Uticaj sadržaja vode u suspenziji na potreban prečnik kolone (D_c), potreban protok vazduha (G_v) i količinu isparene vode (G_{H_2O}) za dati kapacitet FB-sušnice od $G_m=350$ kg/h pri $T_{gi}=300^\circ\text{C}$ i $T_{gc}=105^\circ\text{C}$ (izračunate vrednosti)	194
Slika 5.4.	Specifična potrošnja toplote pri isparavanju vode u funkciji razlike temperatura u FB-sušnici i SBDT-sušnici pri doziranju vode	196
Slika 5.5.	Specifična potrošnja vazduha u funkciji razlike temperatura u FB-sušnici i SBDT-sušnici pri doziranju vode	197
Slika 5.6.	Termička efikasnost procesa sušenja u funkciji razlike temperatura u FB-sušnici i SBDT-sušnici.....	198

SPISAK TABELA

Tabela 2.1. Karakteristike fontanskog sloja sa i bez cevnog umetka /Ishikura i dr., 2003/	34
Tabela 2.2. Usporedni prikaz osnovnih karakteristika fontanskog i fontansko-fluidizovanog sloja sa i bez cevnog umetka /Grbavčić, 1989/	34
Tabela 2.3. Korelacije za ocenu globalnog ponašanja vertikalnog toka gas-čestice	55
Tabela 2.4. Korelacije za izračunavanje brzine zagušivanja u sistemima gas-čvrste monodisperzne čestice	64
Tabela 2.5. Korelacije za izračunavanje koeficijenta trenja čestice-zid transportne cevi u sistemima gas-čestice za stanje zagušivanja	64
Tabela 3.1. Karakteristike fluidizacije kolone ($D_c=72$ mm) i sloja inertnih čestica	83
Tabela 3.2. Karakteristike fluidizacije kolone ($D_c=215$ mm) i slojeva inertnih čestica.....	87
Tabela 3.3. Fizičko-hemijski parametri suvog vazduha, vodene pare i tečne vode u zavisnosti od temperature /Đorđević i dr., 1997/	91
Tabela 3.4. Ocena gustoće i tečljivosti pasti Cineba, $Ca(OH)_2$ i $CaCO_3$	94
Tabela 3.5. Tipičan ogled sušenja u fluidizovanom sloju inertnog materijala (suspenzija Cineb fungicida, $x_0 = 0.70$ kg_{H_2O}/kg_{sus} , inertne čestice $d_p=0.93$ mm)	105
Tabela 3.6. Karakteristike različitih kuglica i kumulativni gubitak mase nakon 15 časova rada vertikalnog kugličng mlina	112
Tabela 3.7. Karakteristike inertnih čestica	113
Tabela 3.8. Zadržavanje ("hold-up") osušenog materijala u sloju inertnih čestica.....	115
Tabela 3.9. Sadržaj vlage i sadržaj aktivne materije u osušenom prahu Cineba.....	117
Tabela 3.10. Rezultati ispitivanja uticaja prisustva tečne faze na pad pritiska u sloju inertnih čestica.....	121
Tabela 3.11. Karakteristike kolone i sloja u sistemu za dosušivanje	125
Tabela 3.12. Eksperimentalni rezultati dosušivanja primarnog praha Cineba u fluidizovanom sloju inertnog materijala (staklene sfere, $d_p=0.355$ mm, frakcija 0.29-0.42 mm).....	125
Tabela 3.13. Rezultati dosušivanja u fluidizovanom sloju praha Cineba	128
Tabela 3.14. Rezultati dosušivanja u fluidizovanom sloju praha $Cu(OH)_2$	129
Tabela 3.15. Karakteristike kolone za ciklonsko dosušivanje i rezultati dosušivanja	132
Tabela 3.16. Eksperimentalni podaci za ciklonsko dosušivanje	132
Tabela 3.17. Eksperimentalni podaci za hlađenje u ciklonskom uređaju.....	136
Tabela 4.1. Izračunati strujni parametri na ulazu u transportnu cev ($d_p=1.94$ mm)	152
Tabela 4.2. Pregled mogućih algoritama za izračunavanje osnovnih parametara dvofaznog vertikalnog toka	153

Tabela 4.3. Predviđanje protoka čestica na osnovu poznate brzine gasa i vrednosti statičkog pritiska u transportnoj cevi na jednoj poziciji	154
Tabela 4.4. Karakteristike sferičnih čestica korišćenih za proveru korelacija zagušivanja.....	157
Tabela 4.5. Eksperimentalni podaci pri zagušivanju	160
Tabela 4.6. Poređenje eksperimentalnih vrednosti brzine zagušivanja i odgovarajućih poroznosti sa predviđanim vrednostima prema različitim korelacijama i modelima.....	165
Tabela 4.7. Jednačine za određivanje karakteristika nezasićenog vlažnog vazduha.....	169
Tabela 4.8. Fizičko-hemijski parametri suvog vazduha, vodene pare i tečne vode u zavisnosti od temperature /Đorđević i dr., 1997/	169
Tabela 4.9. Pojednostavljen algoritam proračuna.....	171
Tabela 4.10. Pregled eksperimentalnih uslova i proračunatih parametara	172
Tabela 4.11. Osnovni hidrodinamički parametri na početku i kraju cevnog umetka	173
Tabela 4.12. Vrednosti parametara za stanje zagušivanja u cevnom umetku određene prema modelu iz Poglavlja 4.3.2.3	180
Tabela P1.1. Osnovne karakteristike sušenih materijala.....	221
Tabela P2.1. Eksperimentalna ispitivanja isparavanja vode na laboratorijskom uređaju ($D_c=72$ mm).....	227
Tabela P2.2. Eksperimentalna ispitivanja sušenja suspenzije Cineba na laboratorijskom uređaju ($D_c=72$ mm).....	228
Tabela P2.3. Eksperimentalna ispitivanja isparavanja vode na uvećanom laboratorijskom uređaju ($D_c=215$ mm).....	229
Tabela P2.4. Eksperimentalna ispitivanja sušenja suspenzija na uvećanom laboratorijskom uređaju ($D_c=215$ mm).....	235
Tabela P3.1. Pregled eksperimentalnih uslova za sušenje suspenzija u sušioniku sa fontanskim slojem i cevnom umetkom.....	247
Tabela P3.2. Izmereni aksijalni profili pritiska i temperature u cevnom umetku	248
Tabela P3.3. Izračunati profil pritiska u cevnom umetku	250
Tabela P3.4. Izračunati hidrodinamički parametri i parametri sušenja u fontanskom sloju sa cevnom umetkom i karakteristični dijagrami za 19 izvršenih oglada (ogledi 1÷12: doziranje tečne faze vode, ogledi 13÷19: sušenje vodenih suspenzija).....	251

SPISAK UPOTREBLJENIH SIMBOLA

- a - specifična površina inertnih čestica u sloju (u cevnom umetku), $m^2_{\text{čestice}}/m^3_{\text{sloj}}$
- A - bezdimenzioni parametar $[(\rho_f U_i U_{mf})/((\rho_p - \rho_f)gD_n)]$
- A_a - površina poprečnog preseka anularnog dela sloja, m^2
- A_d - površina poprečnog preseka cevnog umetka, m^2
- A_c - površina poprečnog preseka kolone neposredno iznad ploče distributora vazduha, m^2
- A_g - površina kolone za razmenu toplote prirodnom konvekcijom i zračenjem, m^2
- A_p - površina inertnih čestica, m^2
- Ar - Archimedes-ov broj $[(\rho_f d_p^3)(\rho_p - \rho_f)/\mu^2]$
- C - intenzitet boje smeše prahova
- C_0 - intenzitet boje Cu(OH)_2 praha
- C_1, C_2 - konstante u jednačini (2.24)
- C_c - konstanta zračenja apsolutno crnog tela, $\text{kW}/(m^2 K^4)$
- C_D - koeficijent otpora jedne čestice u disperziji čestica u fluidu
- $C_{D_{s0}}$ - koeficijent otpora usamljene sferične čestice u fluidu
- C_{D_s} - koeficijent otpora usamljene čestice u fluidu
- C_p - specifični toplotni kapacitet, $\text{kJ}/(\text{kg K})$
- C_{pg} - specifični toplotni kapacitet gasa ili nezasićenog vlažnog vazduha, $\text{kJ}/(\text{kg K})$
- C_{pm} - specifični toplotni kapacitet čestica iz suspenzije, $\text{kJ}/(\text{kg K})$
- C_{pp} - specifični toplotni kapacitet inertnih čestica, $\text{kJ}/(\text{kg K})$
- C_{pgsv} - specifični toplotni kapacitet suvog vazduha, $\text{kJ}/(\text{kg K})$
- C_{psr} - specifični toplotni vazduha na T_{sr} za obračun gubitaka toplote, $\text{kJ}/(\text{kg K})$
- C_{pw}^G - specifični toplotni kapacitet vode u gasovitoj fazi, $\text{kJ}/(\text{kg K})$
- C_{pw}^L - specifični toplotni kapacitet vode u tečnoj fazi, $\text{kJ}/(\text{kg K})$
- c_s - površinska brzina čestica u cevnom umetku i u fluidizovanom sloju $[G_p/(\rho_p A_d)]$, m/s
- c_{sc} - površinska brzina čestica u cevnom umetku (transportnoj cevi) u stanju zagušivanja, m/s
- D_c - prečnik kolone, m
- D_d - prečnik cevnog umetka, m
- D_{epk} - ekvivalentni prečnik kolone za prelaz toplote prirodnom konvekcijom, m
- D_g - difuzivnost vodene pare u vazduhu, m^2/s
- D_n - prečnik mlaznice na dnu kolone, m
- d_p - prečnik inertne čestice (volumetrijski), m
- F^* - bezdimenzioni gradijent pritiska usled trenja
- F_b - sila potiska, N/m^3
- F_D - sila trenja između fluida i čestice, N/m^3
- F_{ds} - sila trenja koja deluje na usamljenu česticu u struji fluida, N/m^3
- F_{dt} - sila trenja koja deluje na jednu česticu u fluidizovanom sloju, N/m^3
- F_e - gradijent pritiska usled statičke težine sloja, Pa/m
- f_f - koeficijent (faktor) trenja fluid-zid
- F_f - gradijent pritiska usled trenja fluid-zid, Pa/m
- F_g - gravitaciona sila koja deluje na suspenziju fluid-čestice, N/m^3
- f_p - koeficijent (faktor) trenja čestice-zid
- F_p - gradijent pritiska usled trenja čestice-zid, Pa/m
- f_{pA} - modifikovani koeficijent (faktor) trenja čestice-zid za pakovani sloj u anularnom delu sloja, $[f_{pA} = (-dp_a/dz)[d_p/(\rho_f U_a^2)(\epsilon_a^3/1 - \epsilon_a)]$

f_{pc}	- koeficijent trenja čestice-zid cevi u stanju zagušivanja vertikalnog toka gas-čestice
F_u	- gradijent pritiska usled ubrzavanja, N/m^3
F_w	- gradijent pritiska usled trenja smeše fluid-čestice o zidove cevi, N/m^3
g	- gravitaciono ubrzanje, m/s^2
G_a	- maseni protok fluida (vazduha) u anularnom delu sloja, kg/s
G_d	- maseni protok fluida (vazduha) u cevnom umetku, kg/s
G_d'	- maseni protok suvog vazduha u cevnom umetku, kg/s
G_f	- maseni protok fluida, kg/s
G_{H_2O}	- maseni protok vode na ulazu u kolonu (FB, SBDT) i u cevnom umetku (SBDT), kg/s
$G_{H_2O}^G$	- maseni protok vode u cevnom umetku u gasovitoj fazi, kg/s
$G_{H_2O}^L$	- maseni protok vode u cevnom umetku u tečnoj fazi, kg/s
$G_{H_2O}^{L_0}$	- maseni protok vode na početku cevnog umetka u tečnoj fazi, kg/s
G_m	- maseni protok suve materije u koloni (FB) i u cevnom umetku (SBDT), kg/s
G_p	- maseni protok inertnih čestica u cevnom umetku, kg/s
G_{SUS}	- maseni protok suspenzije, kg/s
G_v	- maseni protok vlažnog vazduha na ulazu u kolonu, kg/s
h	- hold-up (količina osušenog materijala u odnosu na masu inertnog sloja), %
H_0	- statička visina sloja inertnih čestica u fluidizovanom sloju, mm
H	- visina pakovanog sloja u anularnom delu sloja (slika 4.3), m
H_c	- visina kolone, m
h_D	- koeficijent prenosa mase gas-čestice, m/s
H_m	- maksimalna visina sloja koja se može fontanovati, m
H_{mF}	- visina sloja u stanju minimalne fluidizacije, m
h_p	- koeficijent prenosa toplote gas-čestice, $W/(m^2 K)$
K	- konstanta u Darcy-evom zakonu u jednačini (2.89)
K_1	- konstanta u Ergun-ovoj jednačini uz član $150 \cdot U$ u jednačini (2.90)
K_2	- konstanta u Ergun-ovoj jednačini uz član $1.75 \cdot U^2$ u jednačini (2.90)
k_y	- koeficijent prenosa mase u jednačini (3.1), kg/m^2s
L	- rastojanje cevnog umetka od dna sloja (mlaznice) (slika 4.3), m
L_r	- vertikalna koordinata na kojoj se uvodi suspenzija u sloj (slika 4.3), m
L_t	- dužina cevnog umetka, m
L_t^*	- dužina zone ubrzavanja čestica i fluida u cevnom umetku, m
M_{H_2O}	- molarna masa suvozasicene vodene pare, $kg_{H_2O\ para}/kg\ mol$
M_R	- srednja molarna masa gasovite faze (vlažnog vazduha), $kg_{vlaž.vaz.}/kg\ mol$
M_{sl}	- masa inertnih čestica u sloju, kg
M_{sv}	- molarna masa suvog vazduha, $kg_{suv\ vaz.}/kg\ mol$
Nu_p	- Nusselt-ov broj za čestice [$Nu_p = (h_p d_p) / \lambda_g$]
Nu_{pk}	- Nusselt-ov broj za prelaz toplote prirodnom konvekcijom
n_z	- kumulativni broj čestica u šupljini na aksijalnom rastojanju z (slika 4.4), broj čestica/s
ΔP	- pad pritiska sloja, Pa
P_a	- dinamički pritisak u anularnom delu sloja, Pa
p_B	- parcijalni pritisak vode u gasovitoj fazi, atm
p_{d1}	- statički pritisak fluida na kraju cevnog umetka ($z=L_t$), Pa
p_d	- statički pritisak fluida u cevnom umetku, Pa
P_d	- dinamički pritisak u cevnom umetku, u fontani, Pa

- ΔP_g - pad pritiska usled dejstva gravitacione sile, Pa
 ΔP_n - pad pritiska sloja (meren na mlaznici, neto), Pa
 ΔP_{nb} - pad pritiska sloja (meren na mlaznici, bruto), Pa
 Pr - Prandtl-ov broj [$Pr = (\mu c_{pg}) / \lambda_g$]
 p_s - parcijalni pritisak tečne vode / napon pare vode / pritisak zasićenja vodene pare, atm
 p_{st} - statički pritisak fluida u zoni uspostavljenog toka u pneumatskom transportu ($dv/dz=0$), Pa
 ΔP_w - pad pritiska usled trenja smeše fluid-čestice o zid cevi, Pa
 ΔP_u - pad pritiska usled ubrzavanja čestica, Pa
 q - specifična potrošnja toplote, bazirana na $T_{gi} - T_{ge}$, kJ/kg_{H2O}
 q' - specifična potrošnja toplote, bazirana na $T_{gi} - T_{0A}$, kJ/kg_{H2O}
 Q_g - gubici toplote prirodnom konvekcijom i zračenjem, kJ/s
 Q_{gpk} - gubici toplote usled prelaza toplote prirodnom konvekcijom, kJ/s
 Q_g - gubici toplote usled prelaza toplote zračenjem, kJ/s
 r - radijalna koordinata, m
 R - konstanta idealnog gasa, J/(kg mole K)
 Re - Reynolds-ov broj u cevnom umetku, u funkciji površinske brzine fluida
 $[Re = (D_d \rho_f U) / \mu]$
 Re_p - Reynolds-ov broj za česticu, u funkciji relativne brzine između fluida i čestica
 $[Re_p = (d_p \rho_f u_s) / \mu]$
 Re_{pA} - Reynolds-ov broj za čestice u anularnom delu sloja [$Re_{pA} = (d_p \rho_f U_a) / (\mu (1 - \epsilon_a))$]
 Re_{pt} - Reynolds-ov broj za čestice u funkciji površinske brzine odnošenja čestica
 $[Re_{pt} = (d_p \rho_f U) / (\mu (1 - \epsilon))]$
 Re_t - Reynolds-ov broj u funkciji površinske brzine odnošenja čestica [$Re = (D_d \rho_f U) / \mu$]
 r_w - latentna toplota isparavanja vode, kJ/kg
 Sc - Schmidt-ov broj [$Sc = \mu / (\rho_f D_g)$]
 Sh_p - Sherwood-ov broj [$Sh_p = (h_D d_p) / D_g$]
 SV - specifična potrošnja vazduha [G_v / G_{H2O}], kg_{vazd.}/kg_{H2O}
 T_{0A} - temperatura okoline, °C
 T_a - temperatura vazduha u anulusu, °C
 T_{aH} - temperatura vazduha na vrhu anulusa, °C
 T_g - temperatura vazduha u cevnom umetku, °C
 T_{g1} - temperatura vazduha na kraju cevnog umetka ($z=L_c$), °C
 T_{ge} - temperatura vazduha na izlazu iz kolone, °C
 T_{gi} - temperatura vazduha na ulazu u kolonu (u mlaznici-DTSB), °C
 T_p - temperatura inertnih čestica u cevnom umetku, °C
 T_{p1} - temperatura inertnih čestica na kraju cevnog umetka ($z=L_c$), °C
 T_{sr} - srednja temperatura vazduha za obračun gubitaka toplote [$T_{sr} = (T_{ge} + T_{0A}) / 2$], °C
 T_{wb} - temperatura adijabatskog zasićenja vazduha (temperatura vlažnog termometra), °C
 U - površinska brzina fluida, m/s
 u - srednja međučestična brzina fluida u cevnom umetku, u šupljini ispod cevnog umetka i u fluidizovanom sloju [$u = U / \epsilon$], m/s
 U_0 - površinska brzina vazduha kroz ploču distributora (na T_{0A}), m/s
 u_a - srednja međučestična brzina fluida u anularnom delu sloja [$u_a = U_a / \epsilon_a$], m/s

U_a	- površinska brzina fluida u anularnom delu sloja, m/s
U_{a0}	- površinska brzina fluida na dnu anularnog dela sloja, m/s
U_{aH}	- površinska brzina fluida na vrhu anularnog dela sloja, m/s
U_c	- površinska brzina fluida u cevnom umetku ili transportnoj cevi u stanju zagušivanja, m/s
u_c	- srednja međučestična brzina fluida u cevnom umetku, u transportnoj cevi u stanju zagušivanja [$u_c = U_c / \epsilon_c$], m/s
U_{mf}	- površinska brzina fluida u stanju minimalne fluidizacije, m/s
U_{ms}	- površinska brzina fluida u stanju minimalnog fontanovanja, m/s
U_r	- radijalna brzina fluida na granici fontana- anularni deo sloja (slika 4.6), m/s
u_s	- relativna brzina između fluida i čestica u cevnom umetku [$u_s = u - v$], m/s
u_{sF}	- relativna brzina između fluida i čestica u partikulativno fluidizovanom sloju, m/s
U_t	- brzina taloženja (odnošenja) usamljene čestice u neograničenom medijumu, m/s
v	- radijalno usrednjena brzina čestica u cevnom umetku i u šupljini, m/s
v_0	- radijalno usrednjena brzina čestica na početku cevnog umetka, m/s
V_0	- zapreminski protok vazduha na ulazu u kolonu (na T_{0A}), m^3/s
V_{a0}	- zapreminski protok vazduha na ulazu u anularni deo sloja, m^3/s
v_a	- brzina čestica u anulusu, m/s
V_{n0}	- zapreminski protok vazduha na mlaznici na ulazu u sloj, m^3/s
v_r	- radijalna brzina čestica na granici fontana- anularni deo sloja (slika 4.5), m/s
V_{sus}	- zapreminski protok suspenzije, m^3/s
W_{H_2O}	- specifična brzina isparavanja vode [$W_{H_2O} = G_{H_2O} / A_c$], kg/m^2s
x_0	- sadržaj vode u suspenziji, kg_{H_2O}/kg_{SUS}
x	- trenutni sadržaj vlage u materijalu koji se suši, %
x_A	- količina isparene vode u cevnom umetku (jednačina (4.35))
x_{AH}	- količina isparene vode na kraju cevnog umetka
x_f	- rezidualni sadržaj vlage u produktu, %
y	- maseni udeo vode u gasnoj fazi (apsolutna vlažnost vazduha) u cevnom umetku, $kg_{H_2O}/kg_{suv\ vazd.}$
y_0	- maseni udeo vode u gasnoj fazi (apsolutna vlažnost vazduha) na početku cevnog umetka ($z=0$), $kg_{H_2O}/kg_{suv\ vazd.}$
y_e	- maseni udeo vode u gasnoj fazi (apsolutna vlažnost vazduha) u cevnom umetku (isparavanje 100%) (jednačina (4.36)), $kg_{H_2O}/kg_{suv\ vazd.}$
z	- vertikalna koordinata merena od početka cevnog umetka (slika 4.3), m
$z1$	- vertikalna koordinata merena od dna kolone (slika 4.3), m

Grčki simboli

β	- koeficijent trenja fluid-čestice, kg/m^4
β_{mF}	- koeficijent trenja fluid-čestice u partikulativno fluidizovanom sloju u stanju minimalne fluidizacije, kg/m^4
δ_f	- debljina filma suspenzije, μm
ϵ	- poroznost sloja u cevnom umetku i u fontani
ϵ_1	- stepen crnoće
ϵ_0	- poroznost sloja na početku cevnog umetka ($z=0$)
ϵ_a	- poroznost sloja u snularnom delu sloja
ϵ_c	- poroznost sloja u cevnom umetku i transportnoj cevi u stanju zagušivanja

ϵ_{mF}	- poroznost sloja u stanju minimalne fluidizacije
ϵ_v	- volumetrijska poroznost sloja
γ	- definisano u jednačini (2.77) [$\gamma = \rho_p v^2 - \rho_f u^2$], kg/(m s ²)
η_D	- efikasnost sušenja (jednačina (3.17))
η_E	- energetska efikasnost (jednačina (3.16))
η_T	- termička efikasnost u odnosu na T_{0A} (jednačina (3.15))
η'_T	- termička efikasnost u odnosu na T_p (jednačina (3.15))
φ	- relativna vlažnost vazduha
Φ_p	- masa produkta zadržanog u sloju po jedinici površine inertnih čestica, kg/m ²
λ	- konstanta u jednačini (2.24)
λ_g	- toplotna provodljivost gasa i nezasićenog vlažnog vazduha, W/(m K)
λ_{sr}	- toplotna provodljivost vazduha na T_{sr} za obračun gubitaka toplote, W/(m K)
λ_{sv}	- toplotna provodljivost suvog vazduha, W/(m K)
λ_w^G	- toplotna provodljivost vode u gasovitoj fazi, W/(m K)
μ	- viskozitet fluida i nezasićenog vlažnog vazduha, (N s)/m ²
μ_{sr}	- viskozitet vazduha na T_{sr} za obračun gubitaka toplote, (N s)/m ²
μ_{sv}	- viskozitet suvog vazduha, (N s)/m ²
μ_w^G	- viskozitet vode u gasovitoj fazi, (N s)/m ²
θ	- ugao koničnog dna kolone, °
ρ_f	- gustina fluida i nezasićenog vlažnog vazduha, kg/m ³
ρ_{fsr}	- gustina vazduha na T_{sr} za obračun gubitaka toplote, kg/m ³
ρ_p	- gustina inertnih čestica, kg/m ³
ρ_{sus}	- gustina suspenzije, kg/m ³
ρ_{sv}	- gustina suvog vazduha, kg/m ³
ρ_{vm}	- gustina vlažnog materijala u filmu na površini inertne čestice, kg/m ³
ρ_w^L	- gustina vode u tečnoj fazi, kg/m ³
τ	- vreme, s
τ_{cikl}	- trajanje jednog ciklusa cirkulacije čestica u SBDT, min
τ_w	- smicajni napon usled trenja smeše fluid-čestice o granicu sistema, N/m ²
τ_R	- nominalno vreme zadržavanja, s
Ψ	- sferičnost inertnih čestica

Skraćenice

FB	- fluidizovani sloj inertnih čestica
SBDT	- fontanski sloj inertnih čestica sa cevnom umetkom

SPISAK GREŠAKA U TEKSTU

STRANA	POZICIJA	STOJI	TREBA
42	u jednačini (2.18)	$(\rho_p - \rho_p)$	$(\rho_p - \rho_f)$
59	red 18	U jednačini (2.59)	U jednačini (2.58)
62	red 3	(2.56)	(2.57)
	red 9	. primenom	. Primenom
	u jednačini (2.75)	$-\frac{dp}{dz}$	$-\frac{dP}{dz}$
74	red 9-odozdo	(258)	(2.58)
93	red 6-odozdo	, sa manjim	, sa većim
96	ispod slika 3.12 i 3.13	tečne faze vode, primećeno	suspenzije Cineba, primećeno
109	red 5-odozdo	tipična	tipični
120	red 12	su bile neuspešne	je bilo neuspešno
123	red 10-odozdo	(17, slika 3.34)	(16, slika 3.34)
138	red 8-odozdo	iz postrojenja iz postrojenja	iz postrojenja
148	red 4	$-dp_d/dz$ je	$-dp_d/dz$
149	na slici 4.4	$z=-L$	$z=0$
		$z=0$	$z=-L$
151	u jednačini (4.11)	$\frac{1}{2} \frac{v^2}{n_z}$	$\frac{v^2}{n_z}$
	u jednačini (4.13)	$\frac{1}{2} \frac{v^2}{z} + v \frac{dv_s}{dz}$	$\frac{v^2}{z} + v \frac{dv}{dz}$
161	red 12	na slici 4.8	na slici 4.9
164	na slici 4.14	◆ 5	◆ 2
	red 7	$d_p=2.98$ m	$d_p=2.98$ mm
	red 11	neko	nego

Прилог 1.

Изјава о ауторству

Потписани-а Арсенијевић Зорана Љ.

Изјављујем

да је докторска дисертација под насловом

Сушење раствора и суспензија у покретном слоју инертних честица

- резултат сопственог истраживачког рада,
- да предложена дисертација у целини ни у деловима није била предложена за добијање било које дипломе према студијским програмима других високошколских установа,
- да су резултати коректно наведени и
- да нисам кршио/ла ауторска права и користио интелектуалну својину других лица.

Потпис

У Београду, 20.03.2014.

Зорана Арсенијевић

Прилог 2.

Изјава о коришћењу

Овлашћујем Универзитетску библиотеку „Светозар Марковић“ да у Дигитални репозиторијум Универзитета у Београду унесе моју докторску дисертацију под насловом:

Алумосиликати са уграђеним кластерима метала прелазних група лб и лВб-Вллл као електрокаталитички материјали

која је моје ауторско дело.

Дисертацију са свим прилозима предао/ла сам у електронском формату погодном за трајно архивирање.

Моју докторску дисертацију похрањену у Дигитални репозиторијум Универзитета у Београду могу да користе сви који поштују одредбе садржане у одабраном типу лиценце Креативне заједнице (*Цреативе Цоммонс*) за коју сам се одлучио/ла.

1. Ауторство
2. Ауторство - некомерцијално
3. Ауторство – некомерцијално – без прераде
4. Ауторство – некомерцијално – делити под истим условима
5. Ауторство – без прераде
6. Ауторство – делити под истим условима

(Молимо да заокружите само једну од шест понуђених лиценци, кратак опис лиценци дат је на полеђини листа).

Потпис

У Београду, 10.3.2014.

Зорице Марковић