

UNIVERZITET U BEOGRADU

MAŠINSKI FAKULTET

Nikola V. Karličić

**SVOJSTVA PEPELA IZ
TERMOELEKTRANA ZNAČAJNA ZA
ODLAGANJE I PRIMENU**

Doktorska disertacija

Beograd, 2018.

UNIVERSITY OF BELGRADE
FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

Nikola V. Karličić

**CHARACTERISTICS OF ASH FROM
THERMAL POWER PLANTS
IMPORTANT FOR DISPOSAL AND
UTILIZATION**

Doctoral Dissertation

Belgrade, 2018.

Mentor doktorske disertacije

dr Dejan Radić, redovni profesor

Univerzitet u Beogradu, Mašinski fakultet

Članovi komisije za odbranu doktorske disertacije:

dr Dejan Radić, redovni profesor

Univerzitet u Beogradu, Mašinski fakultet

dr Vladimir Stevanović, redovni profesor

Univerzitet u Beogradu, Mašinski fakultet

dr Aleksandar Jovović, redovni profesor

Univerzitet u Beogradu, Mašinski fakultet

dr Marko Obradović, docent

Univerzitet u Beogradu, Mašinski fakultet

dr Đorđe Janačković, redovni profesor

Univerzitet u Beogradu, Tehnološko-metalurški fakultet

Datum odbrane:

SVOJSTVA PEPELA IZ TERMOELEKTRANA ZNAČAJNA ZA ODLAGANJE I PRIMENU

Apstrakt

Velika količina pepela nastaje kao nusproizvod sagorevanja uglja u termoenergetskim postrojenjima, čiji pravilan rad zahteva sistem pneumatskog transporta za njegovo efikasno odvođenje. Odlaganje pepela na deponije predstavlja teret za životnu sredinu. Poznavanje fizičko-hemijskih i aeracionih karakteristika pepela je preduslov za precizno predviđanje ponašanja sistema pneumatskog transporta pepela iz termoelektrana velikog kapaciteta i ocene moguće primene ovog nusproizvoda u različitim industrijskim granama. U okviru ove disertacije razmatrane su karakteristike pepela lignita Kolubara iz termoelektrane snage 620 MWe. Ispitivanjima fizičko-hemijskih karakteristika uzoraka zaključeno je da postoji izrazita heterogenost pepela, što naročito utiče na njegove aeracione karakteristike. Međusobne zavisnosti fizičkih i aeracionih karakteristika pokazale su da za ispitivani pepeo nije moguće jednoznačno definisati režim pneumatskog transporta. S obzirom na činjenicu da je ispitivani pepeo na granici ugušćene i razređene faze, peremabilnost pepela, koja je značajan parametar za definisanje pneumatskog transporta, pokazuje da su neophodne brzine transporta u granicama od 10 do 15 m/s. Razvijen je programski kod za dva numerička modela proračuna pada pritiska pri pneumatskom transportu pepela velikog kapaciteta i velike dužine. Verifikacija modela izvedena je na osnovu eksperimentalnih ispitivanja pneumatskog transporta pepela kapaciteta 120 t/h i dužine 600 m. Model zasnovan na korelaciji Dogina i Lebedeva, gde je parametar $A=1,4 \cdot 10^{-6}$, daje odlično slaganje sa eksperimentalnim podacima, uz korelacioni odnos 93,99% i srednje kvadratno odstupanje 9,58%. Rezultati ove doktorske disertacije imaju veliki naučni i praktični značaj. Predstavljaju dobru osnovu za dalja istraživanja, razmatranje moguće primene ispitivanog pepela, kao i za definisanje optimalnog režima i projektovanje sistema pneumatskog transporta ovog ili sličnog materijala.

Ključne reči: lignit, leteći pepeo, fizičko-hemijske karakteristike, fluidizacija, permeabilnost, pneumatski transport, pad pritiska, numeričko modelovanje.

Naučna oblast: Mašinstvo

Uža naučna oblast: Procesna tehnika

UDK: 622.332:662.613.13(043.3)

CHARACTERISTICS OF ASH FROM THERMAL POWER PLANTS IMPORTANT FOR DISPOSAL AND UTILIZATION

Abstract

Large volumes of ash are generated as byproduct of coal combustion process in thermoenergetic plants, and their proper operation depends upon efficient pneumatic conveying system to dispose it continuously. Disposing the ash to landfills creates huge environmental burden. Both physico-chemical and aeration characteristics of ash are prerequisite for accurate and reliable behaviour prediction of long distance large capacity pneumatic conveying system as well as for possible utilization consideration. This doctoral dissertation analyzed characteristics of Kolubara lignite ash from a 620 MWe thermal power plant. Physico-chemical characteristics investigation of samples led to conclusion that this ash is extremely heterogeneous material, and that significantly affects its aeration characteristics. Relationship between physical and aeration characteristics of ash showed that unambiguous defining of pneumatic conveying mode is not possible. Considering the fact that this ash belongs to boundary area of dilute and dense phase, ash permeability, as important parameter of pneumatic conveying defining, indicated required transport velocities between 10 to 15 m/s. A computer program code was developed for two numerical models to estimate pressure drop for large capacity long distance ash pneumatic conveying. Model verification was undertaken using experimental data obtained by examination of 120 t/h and 600 m pneumatic conveying of ash. Model based on correlation of Dogin and Lebedev, for parameter $A=1,4 \cdot 10^{-6}$, is in excellent agreement with experimental data, having correlation ratio 93,99% and root-mean-square deviation 9,58%. This doctoral dissertation results are of scientific and practical importance. They offer a good basis for further investigations, considering possible utilization of this ash as well as for defining optimal mode and designing pneumatic conveying system of this or similar material.

Keywords: lignite, fly ash, physico-chemical characteristics, fluidization, permeability, pneumatic conveying, pressure drop, numerical modeling.

Scientific discipline: Mechanical engineering

Scientific sub-discipline: Process Engineering

UDC: 622.332:662.613.13(043.3)

Sadržaj

1	Uvod.....	1
2	Pregled literature	4
2.1	Ugalj	4
2.1.1	Ugljevi u Srbiji	5
2.2	Leteći pepeo	7
2.2.1	Karakteristike letećeg pepela	8
2.2.1.1	Fizičke karakteristike letećeg pepela	9
2.2.1.2	Hemijski sastav, mineraloški sastav i morfologija letećeg pepela	10
2.2.2	Klasifikacija letećeg pepela.....	13
2.2.3	Primena letećeg pepela	17
2.2.4	Leteći pepeo iz termoenergetskih postrojenja u Srbiji	20
2.3	Pneumatski transport	23
2.3.1	Karakteristike materijala i njihov uticaj.....	25
2.3.2	Aeracione karakteristike materijala	27
2.3.2.1	Fluidizacija	27
2.3.2.2	Permeabilnost	33
2.3.3	Tipovi sistema i režimi pneumatskog transporta.....	36
2.3.4	Karakterizacija i klasifikacija materijala za određeni režim pneumatskog transporta	44
2.3.5	Pneumatski transport praškastih i abrazivnih materijala - habanje komponenata sistema	52
2.3.6	Pneumatski transport na velike udaljenosti (Long distance conveying).....	53
2.3.6.1	Kolena i krivine u sistemima pneumatskog transporta na velike udaljenosti.....	54
2.3.7	Određivanje pada pritiska	55
2.3.8	Pneumatski transport letećeg pepela.....	63
3	Materijali i metode	65
3.1	Laboratorijsko ispitivanje uzoraka pepela	65

3.1.1	Fizičko-hemijske karakteristike pepela	66
3.1.2	Aeracione karakteristike pepela	67
3.1.2.1	Opis instalacije.....	67
3.1.2.2	Proračun aeracionih karakteristika pepela.....	69
3.2	Modeli za proračun pada pritiska	72
3.2.1	Model zasnovan na korelaciji za koeficijent trenja prema Doginu i Lebedevu, Michaelidis-u i Shimizu-u	72
3.2.2	Model zasnovan na korelaciji Muschelknauz-a i Krambrock-a.....	77
3.3	Eksperimentalna ispitivanja pneumatskog transporta u cilju verifikacije modela za proračun pada pritiska	80
3.3.1	Prikaz sistema pneumatskog transporta pepela	80
3.3.2	Merna mesta u sistemu pneumatskog transporta.....	83
3.4	Statističke metode za obradu rezultata	84
4	Rezultati i diskusija	85
4.1	Uzorci pepela i uglja.....	85
4.2	Fizičko-hemijske karakteristika pepela	86
4.3	Aeracione karakteristika pepela	89
4.4	Karakterizacija i klasifikacija pepela za određeni režim pneumatskog transporta.....	92
4.4.1	Klasifikacija pepela	92
4.4.2	Dijagrami za procenu režima transporta.....	93
4.4.3	Zaključak o mogućem režimu transporta letećeg pepela.....	97
4.5	Ispitivanje radnih uslova termoelektrane i merenje pritiska u sistemu pneumatskog transporta.....	98
4.6	Verifikacija modela - proračun pada pritiska duž cevovoda za pneumatski transport.....	106
4.6.1	Vrednost koeficijenta trenja f_m u zavisnosti od usvojenog parametra A za model Dogina i Lebedeva [150]	111

4.6.2	Promena brzine vazduha duž cevovoda dobijena proračunom za model Dogina i Lebedeva	113
4.7	Uticaj dimenzija i gustine pepela na rad sistema pneumatskog transporta...	114
5	Zaključak	117
6	Literatura	124

Spisak oznaka

A	površina poprečnog preseka kolone za fluidizaciju	m^2
A	konstanta koja zavisi od hrapavosti cevovoda	-
d, d_p	prečnik čestica čvrste faze (pepela)	m
d_e	efektivni prečnik čestice	m
D	prečnik cevovoda	m
D_k	prečnik kolone	m
f_B	Blazijusov koeficijent trenja za strujanje gasa	-
f_g	koeficijent trenja u hrapavoj cevi za gasnu fazu	-
f_m	koeficijent trenja za strujanje mešavine, ili kombinacija koeficijenata trenja za strujanje čvrste faze i gasne faze	-
f_p	koeficijent trenja za čvrstu fazu	-
Fr	Frudov broj	-
g	gravitaciono ubrzanje	m/s^2
H	visina sloja geodezijska visina cevovoda	m
H_0	početna visina sloja nasutog materijala	m
H_c	visina kolone od pleksiglasa	m
H_m	visina sloja nasutog materijala	m
L	dužina cevovoda na kome se posmatra pad pritiska	m
m^*	bezdimezionih parametara strujanja, odnos masenog protoka čvrste faze i masenog protoka gasne faze	-
\dot{m}_g	maseni protok gasne faze	t/h
\dot{m}_p	maseni protok pepela za razmatrani blok termoelektrane	t/h
\dot{m}_{p1}	maseni protok pepela po jednom cevovodu	t/h
\dot{m}_{ps}	stvarni protok pepela po jednom cevovodu	t/h
n	konstanta ili funkcija promenljivih u strujanju čvrste i gasne faze broj uređenih parova	-

p	pritisak u posmatranoj tački cevovoda	Pa
p_1	pritisak na početku sloja dat jednačinom	Pa
p_2	pritisak na kraju sloja	Pa
p_a	atmosferski pritisak	Pa ili mbar
p_{f1}	početni apsolutni pritisak u cevi	Pa
p_{f2}	krajnji apsolutni pritisak u cevi	Pa
p_{k1}	natpritisak vazduha ispred porozne pregrade	Pa
p_{mp}	natpritisak vazduha ispred prigušnice	mm Hg ili mm H ₂ O
p_{sr}	srednja vrednost pritiska u sloju	Pa
PE	Faktor permeabilnosti	m ² /(Pa·s) ili m ³ s/kg
Re	Rejnoldsov broj	-
R_g	gasna konstanta	J/(kg·K)
t_0	temperatura vazduha u prostoriji	°C
t_p	temperatura vazduha ispred prigušnice	°C
T_g	temperatura gasne faze	K
u_g	brzina strujanja gasne faze	m/s
u_p	brzina strujanja čvrste faze (pepela)	m/s
u_{∞}	brzina taloženja čestica određena za nasipnu gustinu čvrste faze (pepela)	m/s
\dot{V}	zapreminski protok gasne faze	m ³ /s
w	srednja brzina strujanja gasne faze (kojom se vrši fluidizacija)	m/s
w_I^*	prva kritična brzina fluidizacije	m/s
x_i	konstanta ili funkcija promenljivih u strujanju čvrste i gasne faze	-

Grčka slova

α	konstanta ili funkcija promenljivih u strujanju čvrste i gasne faze	-
α_g	zapreminski udeo gasa (vazduha) u dvofaznoj mešavini	-
α_p	zapreminski udeo pepela u dvofaznoj mešavini	-
β	konstanta ili funkcija promenljivih u strujanju čvrste i gasne faze	-
γ	koeficijent materijala	-
Δp	pad pritiska	Pa
Δp_f	ukupni pad pritiska usled trenja za strujanje čvrste i gasne faze	Pa
Δp_F	pad pritiska pri strujanju vazduha kroz poroznu pregradu	Pa
Δp_p	pad pritiska kroz prigušnicu	mm alkohola
$\Delta p_s, \Delta p_u$	ukupan pad pritiska kroz sloj materijala i poroznu pregradu	Pa ili mm H ₂ O
ε	poroznost	-
ε_0	poroznost materijala u nasutom stanju	-
ε_{max}	maksimalna vrednost poroznosti	-
μ_g	dinamička viskoznost gasa	Pa·s
ζ_F	koeficijent otpora porozne pregrade	Pa/(m/s)
ρ^*	bezdimenzioni parametar strujanja	-
$\rho_b, \rho_\varepsilon, \rho_{\varepsilon 0}$	nasipna gustina čvrste faze (pepela)	kg/m ³
ρ_{f1}	početna vrednost gustine gasne faze	kg/m ³
ρ_{f2}	krajnja vrednost gustine gasne faze	kg/m ³
ρ_g	stvarna gustina gasne faze	kg/m ³
ρ_p, ρ_s	stvarna gustina čvrste faze (pepela)	kg/m ³
ρ_m	gustina mešavine čvrste i gasne faze	kg/m ³
ϕ	konstanta ili funkcija promenljivih u strujanju čvrste i gasne faze	-

Spisak slika

Slika 2.1 Geografski položaj basena u Srbiji [22]	6
Slika 2.2 Tačke nagomilavanja pepela u termoelektrani [32]	7
Slika 2.3 Različite vrste letećeg pepela [40]	8
Slika 2.4 Šema geneze čestica letećeg pepela [47]	13
Slika 2.5 Klase letećeg pepela F (a) i C (b) prema ASTM C618-17a [69]	15
Slika 2.6 Zatravnjena kasetna deponija Termoelektrane „Nikola Tesla A“ [79]	18
Slika 2.7 Deponija Termoelektrane „Nikola Tesla B“ [79]	19
Slika 2.8 Deponija Termoelektrane „Kolubara A“ [79]	19
Slika 2.9 Deponija PD „Termoelektrane i kopovi Kostolac“ [79]	20
Slika 2.10 Fluidizacioni režimi mešavine gas-čvrsta faza [109]	28
Slika 2.11 Zavisnost jediničnog pada pritiska od brzine fluidizacije (I karakteristični slučaj)	30
Slika 2.12 Zavisnost jediničnog pada pritiska od brzine fluidizacije (II karakteristični slučaj)	30
Slika 2.13 Prikaz fluidizacije pepela nejednolike krupnoće i heterogenog fizičko-hemijskog sastava [111]	32
Slika 2.14 Idealizovana veza gradijenta pritiska i brzine vazduha za proticanje kroz sloj materijala [94]	34
Slika 2.15 Skica tipičnog permeametra [94]	35
Slika 2.16 Šematski prikaz pneumatskog transporta u vidu jednog čepa materijala (single plug) [116]	37
Slika 2.17 Šematski prikaz razređenog pneumatskog transporta [118]	37
Slika 2.18 Šematski prikaz razređenog pneumatskog transporta [116]	37
Slika 2.19 Šematski prikaz ugušćenog transporta u vidu pokretnog sloja [118]	39
Slika 2.20 Šematski prikaz ugušćenog transporta u vidu čepa ili klipa [118]	39
Slika 2.21 Šematski prikaz ugušćenog transporta u vidu čepa [116]	39
Slika 2.22 Šematski prikaz ugušćenog transporta u vidu klina [116]	39
Slika 2.23 Režimi transporta za materijale koji dobro zadržavaju vazduh, pogodnih za ugušćeni transport malim brzinama [115]	41
Slika 2.24 Pulsni sistem za formiranje čepova [115]	42

Slika 2.25 Bajpasni sistemi [116]	42
Slika 2.26 Sistemi za ubrizgavanje vazduha [115]	43
Slika 2.27 Šematski prikaz ugušćenog transporta gde materijal konstantno zauzima pun poprečni presek [118].....	43
Slika 2.28 Šematski prikaz ugušćenog transporta gde materijal konstantno zauzima pun poprečni presek [116].....	43
Slika 2.29 Geldart-ova klasifikacija sipkavih čvrstih materijala [81], [94]	44
Slika 2.30 Dixon-ova klasifikacija sipkavih čvrstih materijala [94], [126], [127]	47
Slika 2.31 Pan-ova klasifikacija sipkavih čvrstih materijala [91]	49
Slika 2.32 Režimi transporta prema Jones-u [131].....	50
Slika 2.33 Mills-ov dijagram - uticaj permeabilnosti na režim transporta [94]	51
Slika 3.1 Aparatura za određivanje granulometrijskog sastava.....	66
Slika 3.2 Aparatura za određivanje nasipne gustine i nasipne gustine u zbijenom stanju	67
Slika 3.3 Instalacija za ispitivanje fluidizacionih karakteristika pepela [111]	68
Slika 3.4 Algoritam kompjuterskog programa za model zasnovan na korelacijama za koeficijent trenja prema Doginu i Lebedevu, Michaelidis-u i Shimizu-u.....	76
Slika 3.5 Transportni sistem gde je cevovod ispunjen materijalom [164]	77
Slika 3.6 Veza između bezdimenzionih parametara pneumatskog transporta [149].....	78
Slika 3.7 Veza brzine taloženja i veličine čestice [190]	79
Slika 3.8 Posuda za pneumatski transport pepela [187].....	81
Slika 3.9 Cevovod za pneumatski transport pepela od elektrofiltra do silosa [187]	82
Slika 4.1 Vrednosti srednjeg prečnika za ispitivane uzorke.....	88
Slika 4.2 Vrednosti nasipne i stvarne gustine za ispitivane uzorke	88
Slika 4.3 Fluidizovanje heterogenog materijala	90
Slika 4.4 Geldart-ov dijagram sa eksperimentalnim tačkama za ispitivane uzorke pepela [81].....	93
Slika 4.5 Dixon-ov dijagram sa eksperimentalnim tačkama za ispitivane uzorke pepela [126], [127].....	94
Slika 4.6 Pan-ov dijagram sa eksperimentalnim tačkama za ispitivane uzorke pepela [91].....	95
Slika 4.7 Režimi transporta prema Jones-u [131].....	96

Slika 4.8 Uticaj permeabilnosti na režim transporta [94]	97
Slika 4.9 Rezultati merenja pritiska u cevovodu 1	99
Slika 4.10 Rezultati merenja pritiska u cevovodu 2	99
Slika 4.11 Promene pritiska za liniju 1 [187]	101
Slika 4.12 Promene pritiska za liniju 2 [187]	102
Slika 4.13 Rezultati proračuna pada pritiska duž cevovoda 1 za pneumatski transport pepela	107
Slika 4.14 Rezultati proračuna pada pritiska duž cevovoda 2 za pneumatski transport pepela	109
Slika 4.15 Zavisnost eksperimentalnih i izračunatih vrednosti Fanning-ovog koeficijenta trenja na zidu cevi pri strujanju smeše vazduha i čvrste faze od Reynoldsovog broja [160]	112
Slika 4.16 Brzina vazduha duž transportnog cevovoda 1 dobijena korišćenjem modela Dogina i Lebedeva [150] za $A = 1,4 \cdot 10^{-6}$ [187]	113
Slika 4.17 Zavisnost pada pritiska od srednjeg prečnika čestica pepela (proračun primenom modela Dogina i Lebedeva [150] za $A = 1,4 \cdot 10^{-6}$) [187]	115
Slika 4.18 Zavisnost pada pritiska od stvarne gustine pepela (proračun primenom modela Dogina i Lebedeva [150] za $A = 1,4 \cdot 10^{-6}$) [187]	115

Spisak tabela

Tabela 2.1 Hemijski sastav pepela u zavisnosti od vrste uglja [37], [42].....	10
Tabela 2.2 Hemijski sastav letećeg pepela ugljeva iz Indije [44]	11
Tabela 2.3 Hemijski sastav letećeg pepela ugljeva iz Turske [60].....	11
Tabela 2.4 Hemijski sastav letećeg pepela po regionima [38]	12
Tabela 2.5 Kriterijumi za klasifikaciju letećeg pepela prema ASTM C618-17a [29], [68]	14
Tabela 2.6 Kriterijumi za klasifikaciju letećeg pepela prema EN 450-1:2012 [30].....	15
Tabela 2.7 Kriterijumi za klasifikaciju letećeg pepela prema IS 3812:2013 [70], [71]..	16
Tabela 2.8 Hemijske karakteristike letećeg pepela u Srbiji	21
Tabela 2.9 Rezultati ispitivanja objavljeni u studiji [85]	22
Tabela 2.10 Korelacije analizirane u radu [159]	57
Tabela 3.1 Geometrija cevovoda za pneumatski transport	81
Tabela 4.1 Pregled uzoraka pepela	85
Tabela 4.2 Izvod iz tehničke analize lignita koji je sagorevan u trenutku uzorkovanja .	85
Tabela 4.3 Rezultati laboratorijskih ispitivanja fizičkih karakteristika uzoraka pepela .	86
Tabela 4.4 Rezultati laboratorijskih ispitivanja hemijskih karakteristika uzoraka pepela	87
Tabela 4.5 Rezultati aeracionih ispitivanja uzoraka pepela	89
Tabela 4.6 Snaga bloka i potrošnja uglja tokom sprovedenih merenja	104
Tabela 4.7 Podaci o analizama uglja u toku merenja.....	104
Tabela 4.8 Srednje kvadratno odstupanje i korelacioni odnos modela od eksperimentalnih vrednosti za cevovod 1	108
Tabela 4.9 Srednje kvadratno odstupanje i korelacioni odnos modela od eksperimentalnih vrednosti za cevovod 2	110

1 Uvod

Energetski sektor je industrijska grana sa najvećim uticajem na životnu sredinu i pod stalnim je pritiskom usled konstantnog unapređenja mera uštede energije i zaštite životne sredine.

Ugalj je oduvek bio dominantan energetska resurs, a predviđa se dalji porast njegove upotrebe u proizvodnji električne energije [1]–[5]. Napori i posvećenost prelasku na alternativne izvore energije još uvek nisu uspeli bitno da promene situaciju, pre svega zbog ravnomernije raspoređenih zaliha uglja širom sveta, a pored toga zahvaljujući brojnim problemima koji prate proizvodnju električne energije u nuklearnim, hidro, vetro i solarnim postrojenjima. Procenjuje se da 38,4% [6] ukupno proizvedene električne energije u svetu potiče upravo od ovog energenta.

Najveća potrošnja uglja u energetska sektoru u svetu je u Kini, SAD i Indiji sa učešćem od oko 70% [7], a sudeći prema procenama svetske rezerve potrajaće narednih 200 godina [8]. Trend konstantnog povećavanja kapaciteta za proizvodnju električne energije naročito je prisutan u rastućim ekonomijama. Oko 80% proizvodnje električne energije u Kini [4], i između 50% i 55% u Indiji [5], zasniva se na sagorevanju ugljeva niskog ranga u termoelektranama niske efikasnosti.

Srbija je jedan od vodećih proizvođača uglja u Evropi sa proizvodnjom od oko 40 miliona tona godišnje [9]. Sa instalisanih 4390 MW u termo blokovima, učešće uglja u proizvodnji električne energije u Srbiji iznosi 65% [9], a u pojedinim godinama (2015.) dostiže i preko 70% [10], pa će i u narednim decenijama ugalj biti jedini energent koji će moći da obezbedi pouzdano snabdevanje.

Proizvodnja električne energije sagorevanjem uglja ima za posledicu stvaranje velikih količina različitih štetnih materija, pre svega pepela, šljake, SO_x, NO_x, CO₂ i otpadne vode. Visoku cenu nemerljivog doprinosa uglja razvoju čovečanstva plaća se štetom koja se čini životnoj sredini, sa direktnim posledicama po zdravlje ljudi i živi svet. Povećavanje proizvodnih kapaciteta u termoelektranama dovodi do porasta količine štetnih produkata procesa, stvarajući globalni problem. Najveće poteškoće javljaju se u oblasti upravljanja čvrstim ostatkom iz ovog procesa (pre svega leteći pepeo), a odnose se na transport, odlaganje (deponovanje) i mogućnosti za dalju upotrebu. Literaturni izvori u poslednjih 50 godina opisuju mnoge nerešene probleme u ovoj oblasti, a brojna

istraživanja još uvek nisu dala konačno rešenje osnovnih pitanja, među kojima su pouzdan transport pepela iz termoelektrana, ekološki prihvatljivo odlaganje i mogućnosti za iskorišćenje ovog nusproizvoda u različitim industrijama kako bi se smanjilo opterećenje deponija.

Pneumatski sistemi su se nametnuli kao logično rešenje u većini termoelektrana za brz transport velikih količina pepela do deponija ili do krajnjih korisnika. Projektovanje ovako kompleksnih sistema uglavnom je zasnovano na iskustvima sličnih sistema u eksploataciji, što često dovodi do poteškoća u radu, naročito pri sagorevanju uglja niskog ranga, neujednačenog kvaliteta i sastava, kada nastaju velike oscilacije u količini i fizičko-hemijskim karakteristikama pepela. Pored toga, često se javljaju i pojačano abrazivno delovanje pri transportu, oštećenja cevovoda i armature, veliki eksploatacioni troškovi, zastoji u radu, a neretko dolazi i do potpunog gašenja termoelektrane zbog blokade sistema za odvođenje pepela.

Obimna istraživanja literature pokazala su da se eksperimentalnim istraživanjima (na realnim i pilot postrojenjima) i složenim matematičkim aparatima došlo do brojnih numeričko-eksperimentalnih modela i metoda za analizu i procenu eksploatacionog ponašanja sistema pneumatskog transporta. Međutim, analiza postojećih matematičkih modela i korelacija za proračun pneumatskog transporta, za materijale sličnih karakteristika i za slične uslove rada, pokazala je da su teško primenljivi na konkretan slučaj zbog nedovoljno dobro definisanih uslova i ograničenja, odnosno kompleksnosti parametara koje nije lako ili nije moguće utvrditi. Takođe, utvrđena je suštinska važnost precizne karakterizacije materijala u cilju što efikasnijeg upravljanja u sistemima pneumatskog transporta, što se odnosi i na primenu u proračunskim modelima.

Istraživanja prikazana u disertaciji započela su proučavanjem karakteristika letećeg pepela, nastalog u ložištima termoelektrana u procesu sagorevanja sprasjenih ugljeva niske toplotne moći, lignita Kolubara, sa idejom da se napravi iskorak ka potpunijem shvatanju njihovog uticaja na probleme koji se javljaju u radu sistema za pneumatski transport. Pored toga, detaljna klasifikacija ispitivanog pepela bi predstavljala adekvatan pokazatelj za ocenu njegove moguće primene u različitim industrijskim granama, što bi doprinelo rešavanju problema deponija i unapređenju ekološke situacije.

Osnovni cilj istraživanja je bio da se formira odgovarajući matematički model, koji bi verno predstavljao pneumatski transport pepela lignita Kolubara, i koji bi bilo moguće

primeniti za proračun i efikasnu analizu i unapređenje rada sistema. Stoga je razmatrana primena ili modifikacija postojećih modela i korelacija za proračun pneumatskog transporta. Da bi model što približnije opisivao rad sistema, moraju se poznavati pojedini parametri bitni za njegovo formiranje i verifikaciju, pre svega podaci o transportovanom materijalu. Sprovedena su opsežna eksperimentalna ispitivanja u termoelektrani snage 620 MWe, gde je praćen je rad sistema pneumatskog transporta letećeg pepela lignita Kolubara, kapaciteta 120 t/h, dužine 600 m, pri radnim uslovima. S obzirom da dostupna literatura nije pružala precizne podatke o svim karakteristikama pepela lignita Kolubara, naročito ne one koje se odnose na aeracione karakteristike, iz razmatrane termoelektrane uzet je veliki broj uzoraka pepela i za njih su određene sve fizičko-hemijske karakteristike relevantne za istraživanje.

2 Pregled literature

2.1 Ugalj

Ugalj je izrazito heterogena materija, sastavljena od različitih organskih komponenata, na osnovu kojih se određuju karakteristike i vrši klasifikacija u posebne grupe [11], [12]. Ugalj se definiše na osnovu tri karakteristike: rang uglja - stepen karbonizacije (ligniti, mrki, kameni, antraciti), petrografski sastav i kvalitet uglja (u zavisnosti od udela pepela u uglju i donje toplotne moći) [11].

Pored ugljenika, isparljivih materija i vlage, u sastavu uglja se može naći i neorganski materijal, uključujući različite vrste minerala [13], [14]. Količina i vrsta minerala u ugljevima je bitna s aspekta analize letećeg pepela, jer ove nesagorive komponente mogu imati znatan uticaj na hemijski sastav pepela [15]. Ugljevi sa mineralima iz škrljaca i kaolinskih grupa daju aluminosilikatne pepele, dok ugljevi sa izraženim sadržajem sulfidnih minerala, pirita i markazita, daju povećanu koncentraciju gvožđa u pepelu. Ugljevi nastali u alkalnoj sredini (sveža voda) utiču na taloženje i visok sadržaj karbonata Ca i Na u uglju, dok barske ili slane vode utiču na visok sadržaj S (zbog razgradnje vodenog sveta) snižavajući pH vrednost [12]. Različiti mikroelementi sa ukupnim masenim udelom manjim od 1% se mogu naći u sastavu ugljeva [3]. Struktura ovih elemenata određuje njihovu raspodelu u česticama pepela [16], a uglavnom su čvrsto vezani i ne mogu se lako osloboditi.

Pripremom ili obogaćivanjem uglja [17] neorganske nečistoće se odvajaju od sirovog rovnog uglja i postižu se poboljšane karakteristike. Stepem pripreme uglja zavisi od tržišta i određuje se prema sadržaju pepela i sumpora, donjoj toplotnoj moći i drugim parametrima. U SAD je 2014. godine bilo 252 postrojenja za pripremu uglja, ali se ni u jednom nije vršila priprema ugljeva niskog ranga (lignita), zbog njihove nepodobnosti za takav način obrade [18], jer se iskopavanje ugljeva niskog ranga vrši selektivnim uklanjanjem naslaga jalovine i oblasti sa visokom koncentracijom pepela (mineralnih, neorganskih primesa), a bilo kakvo oslobađanje od ovih materija zahtevalo bi opsežno mlevenje, što u slučaju ugljeva niskog ranga nije ekonomski isplativo.

2.1.1 Ugljevi u Srbiji

Srbija ima blizu 21 milijardu tona geoloških rezervi uglja [19], [20]. Međutim, struktura energetske rezervi u Srbiji je veoma nepovoljna, jer između 97% i 98% od ukupnih rezervi svih vrsta uglja čine ligniti niskog ranga [19], [20], sa visokim sadržajem mineralnih materija i vlage, donje toplotne moći između 5000 i 9000 kJ/kg [21], prosečne vrednosti od 7850 kJ/kg [22]. Ova činjenica svrstava Srbiju među zemlje sa najvećim geološkim nalazištima lignita u Evropi [20], [22], što uslovljava da termoenergetski kapaciteti budu osnov energetske sistema, odnosno između 45% i 49% ukupnih potreba za energijom u Srbiji se obezbeđuje iz lignita [22], [23].

Lignit predstavlja najveći izvor električne energije u Srbiji [24], sa učešćem u proizvodnji između 65% [9] i 70% [24], a navodi se da dostiže čak i 74% [25]. Takođe, sasvim je realna tendencija da lignit bude dominantan izvor električne energije i do 2050. godine [25].

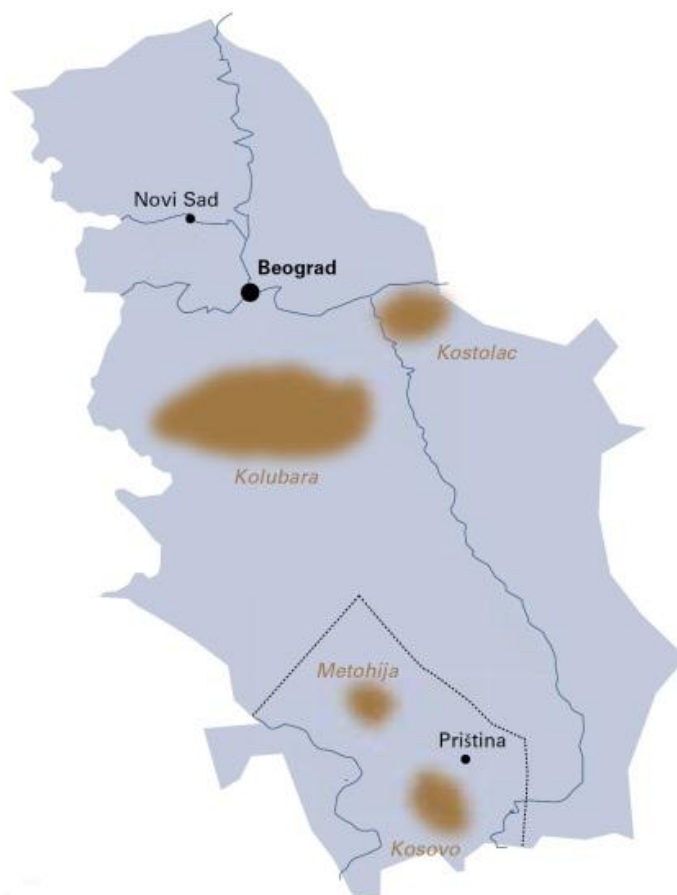
S obzirom da se u ovom trenutku ne može računati na oko 4,5 milijardi tona uglja u Kosovsko-metohijskom¹ basenu, najznačajnije rezerve lignita se nalaze u Kolubarskom i Kostolačkom basenu (slika 2.1), oko 4 milijarde tona. Ukupne eksploataбилne rezerve uglja su značajne i predstavljaju realnu osnovu za dalji dugoročni razvoj energetike uopšte, a posebno za proizvodnju električne energije. [19].

Proizvodnja uglja, koji se koristi kao osnovno gorivo u termoelektranama, odvija se na površinskim kopovima kolubarskog i kostolačkog basena [24]. Termoelektrane u Srbiji se u najvećoj meri snabdevaju ugljem iz Kolubarskog basena [21], gde se ostvaruje oko 75% proizvodnje lignita u Srbiji, dok se u Kostolačkom basenu proizvede oko 25% [24].

Kolubarski ugljeni basen lociran je u zapadnom delu Šumadije, između mesta Rudovaca (na istoku), Koceljeva (na zapadu), Stepojevca (na severu) i Slovca (na jugu) i zahvata površinu od oko 600 km². Basen je izdužen pravcem istok-zapad, dimenzija po dužoj

¹ Kosovsko-metohijski basen se nalazi u Autonomnoj pokrajini Kosovo i Metohija koja je u sastavu Republike Srbije i na osnovu Rezolucije Saveta bezbednosti Ujedinjenih nacija 1244 od 10. juna 1999. godine nalazi se pod privremenom civilnom i vojnom upravom Ujedinjenih nacija, <http://www.srbija.gov.rs/pages/article.php?id=45630>

strani 55, a po kraćoj 16 km. Danas se ugalj otkopava na četiri aktivna kopa: „Polje B”, „Polje D”, „Tamnava- Zapadno polje” i „Veliki Crljeni” [26].



Slika 2.1 Geografski položaj basena u Srbiji [22]

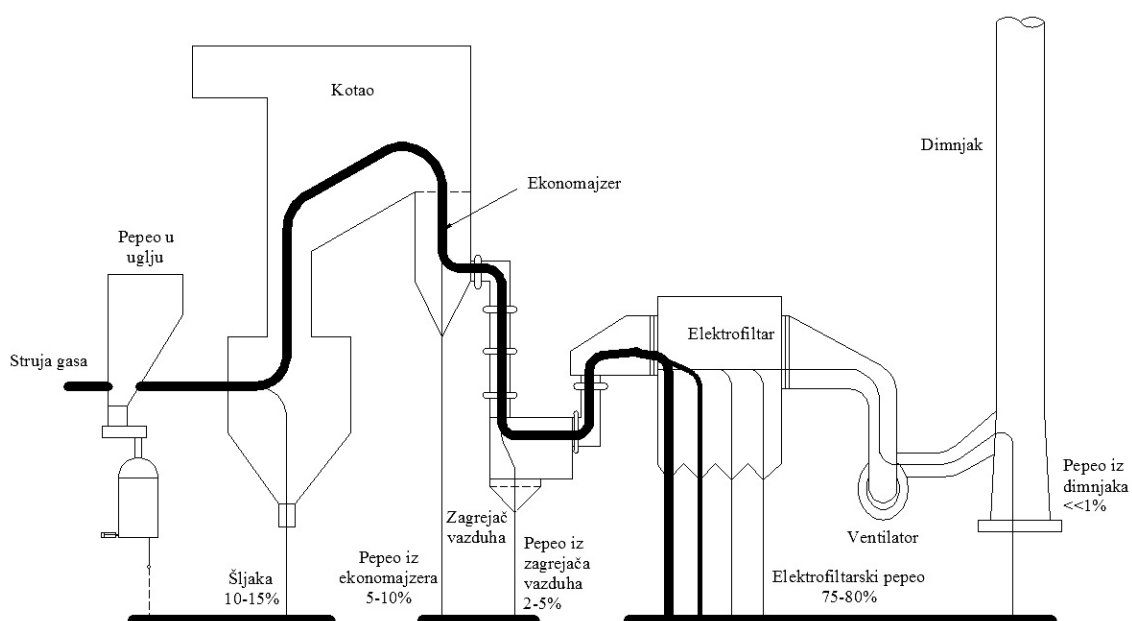
Kolubarski ugalj spada u grupu mekih mrkih ugljeva (niskog ranga C). Sastoji se od ksilita i zemljastog barskog uglja, spada u humusne ugljeve sa visokim udelom huminita (93,5%) i relativno niskim udelom liptinita (3,3%) i inertinita (3,3%) [27]. Udeo pepela u glavnom sloju polja D je 6,67 - 40,45%, udeo vlage je tipičan za lignite i iznosi 40,38 - 53,23%, organskog ugljenika 36,5 - 60,0% i sumpora 0 - 1,58%. Gustina iznosi 1,2 - 1,24 g/cm³, nasipna gustina 1,07 - 1,16 g/cm³ i poroznost 15,32 - 26,1% [11].

Godišnja proizvodnja lignita u kolubarskom basenu iznosi oko 30 miliona tona. Od početka eksploatacije 1896. godine u basenu je proizvedeno oko 883,2 miliona tona [11], a rezerve su procenjene na 2811 miliona tona [23]. Većina uglja se iskoristi u

termoelektranama, gde se godišnje proizvede oko 17 milijardi kWh električne energije [23].

2.2 Leteći pepeo

Leteći pepeo je najzastupljeniji nusprodukt procesa sagorevanja spraešenog uglja u termoelektranama, koji se iz dimnih gasova izdvaja u elektrostatičkim filtrima [28]–[31]. To se jasno može uočiti na slici 2.2, gde su date najznačajnije tačke nagomilavanja pepela u okviru termoelektrane [32]: ispod kotla (šljaka), ispod ekonomajzera, ispod zagrejača vazduha i elektrostatičkog prečištača dimnih gasova, dok se zanemarljiva količina izdvoji u dimnjaku.



Slika 2.2 Tačke nagomilavanja pepela u termoelektrani [32]

Izdvajanje letećeg pepela u elektrostatičkim prečištačima, sa efikasnošću od 99%, nije dovoljno da spreči emisiju najfinijih čestica ($< 1 \mu\text{m}$) u atmosferu [33], [34], pa se danas sve više prelazi na efikasnije sisteme prečišćavanja vrećastim filtrima. Istraživanja [35] su pokazala da frakcioni sastav pepela ima bitan uticaj na stepen izdvajanja elektrostatičkog prečištača, pri čemu se došlo do zaključaka da čestice manje od

17,5 μm imaju stepen izdvajanja između 68% i 98%, dok čestice preko 17,5 μm imaju stepen izdvajanja između 99% i 100%.

Kao što je navedeno u prethodnom poglavlju, iako postoji tendencija ka smanjivanju upotrebe uglja u proizvodnji električne energije, u skorijoj budućnosti ne postoji realna alternativa koja će obezbediti energetska stabilnost, naročito u zemljama u razvoju. Iz godine u godinu, evidentan je porast količine čvrstog ostatka iz procesa sagorevanja uglja u termoelektranama. Enormne količine letećeg pepela čine ga najzastupljenijim nusproizvodom ovog procesa, a njegovo upravljanje i odlaganje sa razlogom predstavlja globalni problem. Kao dobar primer, koji ilustruje ozbiljnost problema, mogu poslužiti podaci da je 1997. godine godišnja produkcija na globalnom nivou iznosila 500 miliona tona [36], deceniju kasnije, tačnije 2010. godine brojka je porasla na 660 miliona tona [37], a već 2012. godine iznosila je 750 miliona tona [38].

2.2.1 Karakteristike letećeg pepela

Količina, fizičke karakteristike i hemijski sastav letećeg pepela zavise pre svega od sastava uglja i uslova sagorevanja [32], [34], stoga sagorevanjem različitih vrsta ugljeva (antracita, mrkih i lignita) nastaju različite vrste letećih pepela (slici 2.3). U skladu sa tim, u zavisnosti od vrste uglja nastali pepeli imaju različite fizičke i hemijske karakteristike [39].



Slika 2.3 Različite vrste letećeg pepela [40]

2.2.1.1 Fizičke karakteristike letećeg pepela

U radovima [41]–[43] navodi se da leteći pepeo u najužem smislu podrazumeva najfinije čestice od 0,2 do 90 μm , nastale transformacijom mineralnih materija u procesu sagorevanja uglja u termoelektranama, dovoljno sitnih da ostanu u suspenziji sa gasovitim produktima sagorevanja i na taj način budu iznesene iz kotla. Međutim, mala efikasnost sagorevanja u kotlovima termoelektrana, ugljevi niskog ranga i neodgovarajuća kontrola granulometrije meljave uglja, doveli su do toga da se pod letećim pepelom smatraju i čestice do 300 μm [44], pa čak i do 500 μm [45].

Ovaj fini praškasti materijal složenog heterogenog sastava i porozne strukture, poreklom od nesagorive neorganske materije u uglju, pretežno čine čestice nepravilnog oblika, čvrste, ili šuplje sferične, uglavnom staklaste (amorfne) strukture [42], [44], [46], fizičke gustine od 2,1 do 2,6 g/cm^3 i nasipne gustine od 1 do 1,8 g/cm^3 [47]–[49]. Boja varira od vodeno bele, preko žute i narandžaste, jarko crvene i braon do tamne, što zavisi od sadržaja oksida gvožđa. Leteći pepeo karakteriše sposobnost da zadržava vodu, pa se često koristi kao pokrivka za površinske kopove uglja zbog pozitivnog uticaja na fizičko stanje zemljišta [39].

Brojni problemi podstakli su istraživače [50]–[56] na proučavanje uticaja transformacije mineralnih materija, u procesu sagorevanja uglja, na formiranje letećeg pepela, što je omogućilo bolje razumevanje hemijskih transformacija minerala i njihovu interakciju sa organskim materijama u česticama uglja [57]. Ispitivanjima fizičkih transformacija silicijum-dioksida i pirita u funkciji vremena zadržavanja čestica [50] (kao najzastupljenijih predstavnika mineralnih materija u uglju), pokazano je da raspodela veličine čestica mineralnih materija u sirovom uglju podleže bitnoj promeni u ranoj fazi devolatilizacije i ne može biti relevantan parametar za određivanje raspodele veličine mineralnih materija u koksnom ostatku. Teorijskim modelom, zasnovanom na eksperimentalnim istraživanjima mrkih ugljeva i lignita [58], ustanovljeno je da mrki ugljevi podležu fragmentaciji u velikoj meri, što direktno utiče na veličinu čestica letećeg pepela, ali i da kod lignita to nije slučaj, gde stepen fragmentacije zavisi od veličine i ranga uglja. Na osnovu kinetičkog modela za simulaciju razvoja raspodele veličina čestica prilikom sagorevanja koksnog ostatka [51], utvrđeno je da raspodela veličina čestica zavisi od načina fragmentacije. Međutim, isti autor u drugom

istraživanju [52] izveo je zaključak da fragmentacija nema veliki uticaj na raspodelu veličina čestica u letećem pepelu prilikom sagorevanja spraćenog uglja. Merenja [53] su pokazala da nerazdvojiva mineralna materija utiče na formiranje submikronskih čestica letećeg pepela. Na primeru sagorevanja uglja u najvećoj termoelektrani u Australiji (*Eraring*) [56] zaključeno je da na raspodelu veličine čestica u letećem pepelu najveći uticaj ima veličina uglja i temperatura sagorevanja.

2.2.1.2 Hemijski sastav, mineraloški sastav i morfologija letećeg pepela

Hemijski sastav letećeg pepela čine osnovni elementi (> 1%), primese (0,1 - 1%) i elementi u tragovima (< 0,1%). Osnovni elementi i primese su u obliku oksida, a najzastupljeniji hemijski elementi u opadajućem nizu su kiseonik, silicijum, aluminijum, kalcijum, gvožđe, ugljenik, kalijum, magnezijum, vodonik, natrijum, titanijum, azot, fosfor, i barijum, dok se ostali elementi nalaze samo u tragovima, u obliku organske i neorganske materije, u zavisnosti od minerala i faza u letećem pepelu [59]. Osnovne komponente letećeg pepela su silicijum dioksid (SiO_2), aluminijum oksid (Al_2O_3), kalcijum oksid (CaO) i gvožđe(III) oksid (Fe_2O_3) i čine između 75% i 85% materijala, dok preostali deo čine kristalni oblici i nesagoreli ugljenik [42]. S obzirom da hemijski sastav letećeg pepela pre svega zavisi od vrste uglja koji se sagoreva [38], u tabeli 2.1 su dati tipični hemijski sastavi letećih pepela različitog porekla.

Tabela 2.1 Hemijski sastav pepela u zavisnosti od vrste uglja [37], [42]

Komponenta \ Ugalj	Kameni (% _{mas})	Mrki (% _{mas})	Ligniti (% _{mas})
SiO_2	20 - 60	40 - 60	15 - 45
Al_2O_3	5 - 35	20 - 30	10 - 25
Fe_2O_3	10 - 40	4 - 10	4 - 15
CaO	1 - 12	5 - 30	15 - 40
MgO	0 - 5	1 - 6	3 - 10
SO_3	0 - 4	0 - 2	0 - 10
Na_2O	0 - 4	0 - 2	0 - 6
K_2O	0 - 3	0 - 4	0 - 4
Nesagorive	0 - 15	0 - 3	0 - 5

Leteći pepeo iz *Western U.S.* Termoelektrane, u kojoj se sagoreva ugalj sa niskim sadržajem sumpora i visokim sadržajem pepela, sačinjen je od mnoštva morfološki

različitih tipova čestica [47], pri čemu oblik čestica zavisi od sastava čestica i stepena izloženosti visokim temperaturama u kotlu.

Udeo sumpora u uglju utiče na pH vrednost pepela, koja se kreće u granicama između 4,5 i 12,0. Antracite odlikuje izrazito visok udeo sumpora, dok nizak udeo sumpora i visok udeo kalcijuma kod lignita dovodi do formiranja alkalnog pepela [39].

Sveobuhvatna karakterizacija letećeg pepela koji je nastao sagorevanjem indijskih i turskih lignita obrađena je u [44] i [60], a njihov tipičan hemijski sastav dat je u tabelama 2.2 i 2.3, dok su u tabeli 2.4 predstavljene karakteristike letećih pepela u svetu prema regionima (Evropa, SAD, Kina, Indija i Australija).

Tabela 2.2 Hemijski sastav letećeg pepela ugljeva iz Indije [44]

Komponenta	Udeo (% _{mas})
SiO ₂	39,57 - 55,40
Al ₂ O ₃	22,13 - 26,77
Fe ₂ O ₃	3,21 - 5,32
CaO	0,42 - 0,54
MgO	0,19 - 0,29
Na ₂ O	0,13 - 0,16
K ₂ O	0,93 - 1,0
P ₂ O ₅	0,23 - 0,32
TiO ₂	2,06 - 0,24
SO ₃	0,39 - 1,45
G.Ž.	6,88 - 29,8

Tabela 2.3 Hemijski sastav letećeg pepela ugljeva iz Turske [60]

Komponenta	Udeo (% _{mas})
SiO ₂	13 - 49,5
Al ₂ O ₃	3 - 26,70
Fe ₂ O ₃	3 - 16,30
CaO	0,1 - 60,0
MgO	1 - 6,11
Na ₂ O	0,27 - 3,0
K ₂ O	0,28 - 3,70
TiO ₂	0,12 - 1,50
SO ₃	0,57 - 31,5
G.Ž.	1,33 - 6,47

Pored fizičkih i hemijskih karakteristika letećeg pepela, za utvrđivanje moguće industrijske primene bitnu ulogu igraju prisutni minerali i faze [59]. Minerološki sastav letećeg pepela zavisi od geoloških faktora povezanih sa formiranjem i taloženjem rezervi uglja [61], [62], uslovima sagorevanja [63] i dr. Leteći pepeo se sastoji iz

gradivnih (više od 10%), osnovnih (između 1% i 10%), sporednih (između 0,1% i 1%) i dopunskih (manje od 0,1%) minerala i faza [59].

Tabela 2.4 Hemijski sastav letećeg pepela po regionima [38]

Komponenta	Udeo (% _{mas})				
	Evropa	SAD	Kina	Indija	Australija
SiO ₂	28,5 - 59,7	37,8 - 58,5	35,6 - 57,2	50,2 - 59,7	48,8 - 66,0
Al ₂ O ₃	12,5 - 35,6	19,1 - 28,6	18,8 - 55,0	14,0 - 32,4	17,0 - 27,8
Fe ₂ O ₃	2,6 - 21,2	6,8 - 25,5	2,3 - 19,3	2,7 - 14,4	1,1 - 13,9
CaO	0,5 - 28,9	1,4 - 22,4	1,1 - 7,0	0,6 - 2,6	2,9 - 5,3
MgO	0,6 - 3,8	0,7 - 4,8	0,7 - 4,8	0,1 - 2,1	0,3 - 2,0
Na ₂ O	0,1 - 1,9	0,3 - 1,8	0,6 - 1,3	0,5 - 1,2	0,2 - 1,3
K ₂ O	0,4 - 4	0,9 - 2,6	0,8 - 0,9	0,8 - 4,7	1,1 - 2,9
P ₂ O ₅	0,1 - 1,7	0,1 - 0,3	1,1 - 1,5	0,1 - 0,6	0,2 - 3,9
TiO ₂	0,5 - 2,6	1,1 - 1,6	0,2 - 0,7	1,0 - 2,7	1,3 - 3,7
MnO	0,03 - 0,2	-	-	0,5 - 1,4	-
SO ₃	0,1 - 12,7	0,1 - 2,1	1,0 - 2,9	-	0,1 - 0,6
G.Ž.	0,8 - 32,8	0,2 - 11,0	-	0,5 - 5,0	-

Najzastupljeniji oblici su staklo, mulit, kvarc, koksni ostatak, hematit-magnetit, anhidrit-gips, feldspat, krečnjak-portlandit, minerali gline i liskuna, kristobalit-tridimit, kalcit-ankerit, korund, jarozit i neki silikati Ca i Ca-Mg [59], [64], [65].

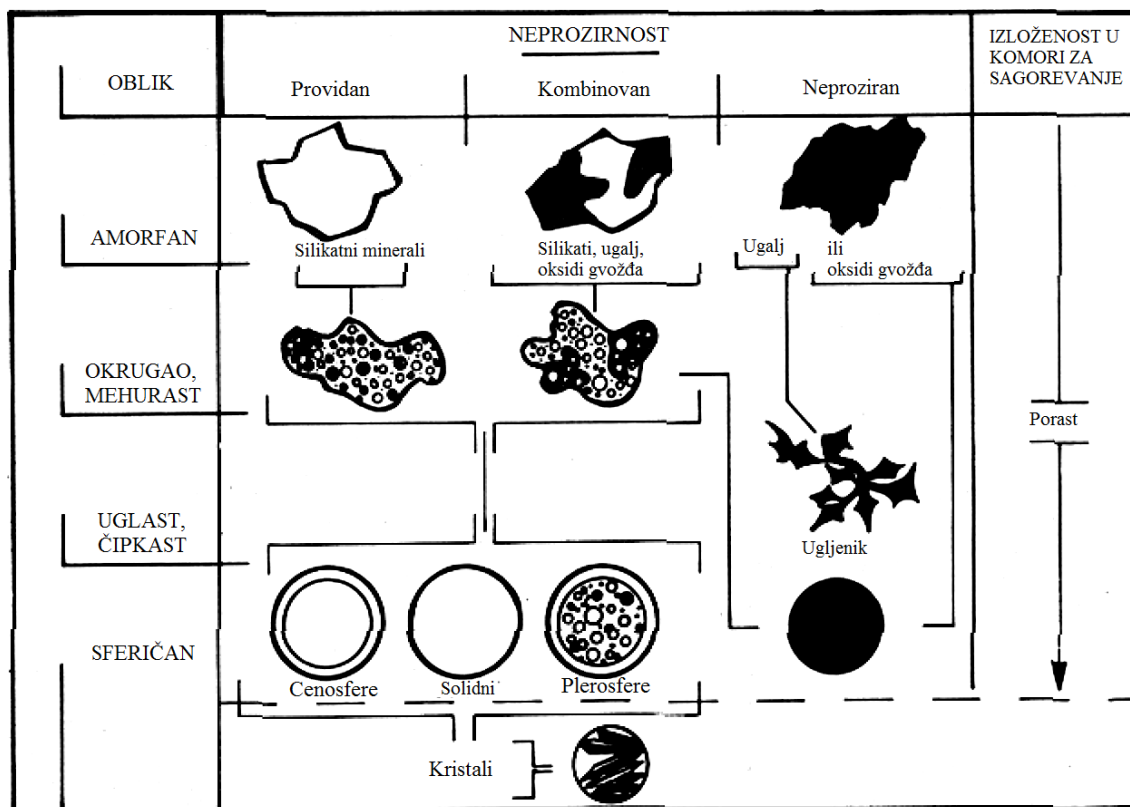
Prema načinu nastanka minerali i faze kod letećeg pepela mogu biti primarni, sekundarni i tercijarni. Primarne minerale čine izvorni minerali iz uglja, kod kojih se nije dogodila transformacija, a karakteriše ih visoka temperatura topljenja. U ovu grupu spadaju neki silikati, oksidi, sulfati, fosfati i karbonati. Sekundarni minerali su nastali u toku procesa sagorevanja, i to su različiti silikati, oksidi, sulfati, karbonati, sulfidi, staklo i koksni ostatak. U tercijarnu grupu spadaju minerali formirani u toku transporta i skladištenja: portlandit, brucit, gips, gvožđe sulfat, kalcit, dolomit, hidroksidi gvožđa i aluminijuma i amorfni materijali [59].

Dominantne kristalne strukture kod lignitskog letećeg pepela su kvarc, anortit, galenit, hematit i mulit [60], [66], [67].

Kvarc i mulit su najčešće kristalne strukture kod pepela sa niskim sadržajem kalcijuma, dok se kod pepela sa visokim sadržajem kalcijuma javljaju SiO₂, C₃A, CS i C₄AS [42].

Pored hemijskog sastava, vrlo bitan aspekt za razmatranje i karakterizaciju letećeg pepela je njegova morfologija. Na osnovu ispitivanja svetlosnim mikroskopom, čestice letećeg pepela svrstane su u 11 grupa [47], na osnovu kojih je formirana šema gezeze

čestica letećeg pepela (slika 2.4) u zavisnosti od stepena izloženosti u komori za sagorevanje.



Slika 2.4 Šema geneze čestica letećeg pepela [47]

Najznačajnija ugljenična forma u sastavu letećeg pepela je koksni ostatak, formiran devolatilizacijom čestica uglja, i čije naknadno sagorevanje i unutrašnja transformacija minerala formira leteći pepeo [41].

2.2.2 Klasifikacija letećeg pepela

U literaturi postoji više klasifikacija letećeg pepela, a u radu će biti predstavljene najznačajnije s aspekta klasifikacije letećeg pepela poreklom od lignita, odnosno njegove dalje upotrebe.

Prema vrsti uglja od koga je nastao leteći pepeo može biti:

- silikatni i
- krečnjački.

I silikatni i krečnjački pepeo gradi ista grupe oksida (Si, Al i Fe). Razlika je u prisustvu krečnjaka, čiji je udeo manji od 10% kod silikatnih, odnosno veći od 10% kod krečnjačkih [37].

Najzastupljenija je svakako klasifikacija je prema američkom standardu ASTM C618-17a [29], gde se leteći pepeo deli u dve klase:

- klasa F i
- klasa C.

Leteći pepeo sa zbirom udela SiO_2 , Al_2O_3 , i Fe_2O_3 većim od 70% i niskim sadržajem krečnjaka, pripada klasi F. Nastaje sagorevanjem ugljeva višeg ranga i odlikuju ga pucolanska svojstva. Leteći pepeo sa visokim sadržajem krečnjaka i zbirom udela SiO_2 , Al_2O_3 , i Fe_2O_3 između 50% i 70% pripada klasi C. Nastaje sagorevanjem ugljeva niskog ranga, mrkih ugljeva i lignita, a ovu klasu karakterišu pucolanska i cementna svojstva u kontaktu sa $\text{Ca}(\text{OH})_2$ i vodom.

Kriterijumi za klasifikaciju letećeg pepela prema standardu ASTM C618-17a [29] dati su u tabeli 2.5, a fotografije klase F i klase C prikazane su na slici 2.5.

Tabela 2.5 Kriterijumi za klasifikaciju letećeg pepela prema ASTM C618-17a [29], [68]

Klasa	F	C
Kriterijum		
$\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ (% _{min})	70	50
SO_3 (% _{max})	5	5
Vlaga (% _{max})	3	3
Gubitak žarenjem (LOI) (% _{max})	6	6

Osnovna razlika između letećeg pepela klase F i klase C je u sadržaju Ca [59]. Kod klase F ukupan udeo kalcijuma se kreće između 1% i 12%, i nalazi se u obliku $\text{Ca}(\text{OH})_2$, CaSO_4 i staklastih komponenata u kombinaciji sa SiO_2 i Al_2O_3 . Za razliku od klase F, kod klase C kalcijum se nalazi u obliku CaO sa udelom od čak 30% do 40% i karakteriše ga veće prisustvo alkalija (Na, K) i sulfata [42].



(a)

(b)

Slika 2.5 Klase letećeg pepela F (a) i C (b) prema ASTM C618-17a [69]

U evropskim zemljama klasifikacija se najčešće vrši prema standardu EN 450-1:2012 [30], gde je podela izvršena u 3 kategorije A, B i C, a odgovarajući kriterijumi su prikazani u tabeli 2.6. Međutim, skoro svaka od zemalja ima i posebne standarde.

Tabela 2.6 Kriterijumi za klasifikaciju letećeg pepela prema EN 450-1:2012 [30]

Kriterijum	Zahtev prema EN 450-1:2012	
	Kategorija A	
Gubitak žarenjem (LOI) (%max)	Kategorija A	5
	Kategorija B	7
	Kategorija C	9
SiO ₂ + Al ₂ O ₃ + Fe ₂ O ₃ (% _{min})	70	
Reaktivni SiO ₂ (% _{min})	25	
Ukupne alkalije (% _{max})	5	
Reaktivni CaO (% _{max})	10	
Slobodni CaO (% _{max})	1,5	
SO ₃ (% _{max})	3	
MgO (% _{max})	4	
Ukupni hloridi (% _{max})	0,1	

Evropski regulatorni sistem pokazao je pozitivan primer u oblasti upotrebe letećeg pepela, a s obzirom na iskorišćenje preko 90% na nivou Evropske unije [37], bilo bi od globalnog značaja primeniti ga i u drugim regionima.

Evroazijski savet za standardizaciju, metrologiju i sertifikaciju (EASC) prepoznao je prednosti američkog i evropskog standarda za klasifikaciju letećeg pepela, pre svega za

potrebe građevinske industrije. U skladu sa pomenutim standardima 2017. godine izdat je standard ГOCT 25818-2017, koji je zamenu standard ГOCT 25818-91 iz 1991. godine.

Indijski standard IS 3812:2013 klasifikuje leteći pepeo u dve grupe u zavisnosti od primene, kao zamenu za cement i kao primesu. Ovaj standard je najobimniji u pogledu ispitivanja hemijskih karakteristika letećeg pepela, jer pored osnovnih elemenata uključuje određivanje sadržaja magnezijum oksida, ukupnog sadržaja alkalija kao i ukupnog sadržaja hlorida [68]. U tabeli 2.7 dati su osnovni kriterijumi za klasifikaciju letećeg pepela prema IS 3812:2013.

Tabela 2.7 Kriterijumi za klasifikaciju letećeg pepela prema IS 3812:2013 [70], [71]

Kriterijum	Zamena za cement		Primesa	
	Silikatni	Kalcitni	Silikatni	Kalcitni
SiO ₂ + Al ₂ O ₃ + Fe ₂ O ₃ (% _{min})	70	50	70	50
SO ₃ (% _{max})	3	3	5	5
SiO ₂ (% _{min})	35	25	35	25
MgO (% _{max})	5	5	5	5
Alkalije kao Na ₂ O (% _{max})	1,5	1,5	1,5	1,5
Ukupni hloridi (% _{max})	0,05	0,05	0,05	0,05
Vlaga (% _{max})	2	2	-	
Gubitak žarenjem (LOI) (% _{max})	5	5	7	7

U radu [59] se navodi podela letećeg pepela predložena od strane Komisije za primenu letećeg pepela pri Ujedinjenim nacijama (UN), koja klasifikuje leteći pepeo u četiri grupe:

- siliko-aluminatni, gde je odnos SiO₂/Al₂O₃ ≥ 2 i koji sadrže manje od 15% CaO,
- alumino-silikatni, gde je odnos SiO₂/ Al₂O₃ < 2 i koji sadrže manje od 15% CaO i manje od 3% SO₃,
- krečnjačko-sulfatni, gde je sadržaj CaO veći od 15% i sadržaj SO₃ veći od 3%, i
- bazni, gde je sadržaj CaO veći od 15% i sadržaj SO₃ manji od 3%.

U zavisnosti od R modula (izraz 2.1), leteći pepeo se može svrstati u 3 grupe:

$$R = \frac{\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3}{\text{CaO} + \text{MgO} + \text{Fe}_2\text{O}_3}, \quad (2.1)$$

- silikatno-kalcitni ($R < 2$)
- silikatni ($R = 2 - 6$)
- alumino-silikatni ($R > 6$)

2.2.3 Primena letećeg pepela

Sve manje prostora i sve veći troškovi odlaganja letećeg pepela potpuno su promenili pogled prema nekada najvećoj količina otpada u svetu. Stroži propisi u oblasti zaštite životne sredine, ekonomski razlozi, a u novije vreme posebni zahtevi tehnologije i industrije, pretvorili su leteći pepeo u potencijalno prihvatljivu robu ili sirovinu. Zbog toga, sve više termoelektrana prelazi na modernije sisteme pneumatskog transporta i deponovanja letećeg pepela, podstaknuti ne samo merama zaštite životne sredine, već i povećanom potražnjom.

Vrlo je važna činjenica da se leteći pepeo može upotrebljavati direktno, bez prethodnog tretmana. S druge strane, pojedine komponente se mogu izdvojiti iz letećeg pepela različitim metodama (hemijski, termički, mehanički) i dalje koristiti kao delimična zamena za važne sirovine, ili kao ključni aditivi za poboljšavanje određenih proizvoda (npr. pucolanski aditiv za cement i beton) [42]. Naročito je značajan porast njegove upotrebe u cementnoj industriji i građevinarstvu. Pored toga, leteći pepeo nalazi mnoštvo primena: kao pokrivka, u podlogama za puteve, za solidifikaciju i stabilizaciju otpada, za proizvodnju lakih agregata, u industriji keramike, metalurgiji, za poboljšanje poljoprivrednog zemljišta i vode, i dr. [42].

Prema podacima koje daje ECOBA (European Coal Combustion Products Association) [72], iskorišćenje letećeg pepela na nivou EU je oko 92%, od toga većina u građevinskoj i cementnoj industriji. ACAA (American Coal Ash Association) daje redovne izveštaje o korišćenju letećeg pepela u SAD (Sjedinjene Američke Države), i za 2016. godinu ukupno iskorišćenje letećeg pepela iznosi 59,95% [73]. U toku 2017. godine, u Indiji je proizvedeno oko 169 miliona tona letećeg pepela, od čega je iskorišćeno 107 miliona tona, što je oko 63%, najviše u cementnoj industriji, blizu 25% [74]. Međutim, i pored mnogobrojnih primena u različitim granama industrije, poražavajuća je činjenica da svega 25% ovog nusproizvoda bude iskorišćeno na globalnom nivou [38], [75], [76], a da njegova nedovoljna upotreba predstavlja

konstantan izvor zagađenja, ogroman teret za životnu sredinu, i stvara probleme sa održavanjem deponija.

Učešće Srbije u globalnoj produkciji letećeg pepela može se učiniti kao zanemarljivo, gde sa oko 32 miliona tona sagorelog uglja niskog ranga, ukupnoj količini doprinosi sa oko 6 miliona tona godišnje [21]. Neplanska i neznatna upotreba letećeg pepela onemogućava dobijanje validnih podataka o njegovom korišćenju. Zbog toga se može pretpostaviti da je situacija nepromenjena u odnosu na 2011. godinu, kada se navodi podatak o iskorišćenju od samo 2,7% na godišnjem nivou, i to u cementnoj industriji [77]. Uzevši u obzir zanemarljivu upotrebu i činjenicu da se najveći deo ovog nusproizvoda odlaže na deponije u blizini termoelektrana, zauzimajući više od 1500 ha obradivog zemljišta, kao i mere koje je potrebno primeniti za održavanje i sanaciju deponija, problem dobija sasvim druge razmere. Na slikama 2.6 - 2.9 prikazane su neke od nepreglednih deponija pepela u Srbiji. Nažalost, takva je situacija u većini zemalja u razvoju. Slično je i u Turskoj, gde se sagorevanjem lignita proizvede oko 15 miliona tona letećeg pepela [78], a njegov mali deo iskoristi, stvarajući slične probleme sa deponijama kao u Srbiji.



Slika 2.6 Zatravnjena kaseta deponije Termoelektrane „Nikola Tesla A“ [79]



Slika 2.7 Deponija Termoelektrane „Nikola Tesla B“ [79]



Slika 2.8 Deponija Termoelektrane „Kolubara A“ [79]



Slika 2.9 Deponija PD „Termoelektrane i kopovi Kostolac“ [79]

2.2.4 Leteći pepeo iz termoenergetskih postrojenja u Srbiji

Literatura daje vrlo oskudne podatke o detaljnim ispitivanjima karakteristika letećeg pepela u Srbiji. Pregledom radova i izveštaja instituta i laboratorija, rađenih za potrebe različitih projekata, prikupljeni su određeni podaci. Rezultati ispitivanja hemijskih karakteristika grupisani su i prikazani u tabeli 2.8.

Grupa autora [49] obavila je ispitivanja 36 uzoraka letećeg pepela, nastalog sagorevanjem lignita iz basena Kolubara i Kostolac u termoelektranama u Srbiji. Određene su fizičke, hemijske i mineraloške karakteristike, sa konstatacijom da su izrazito promenljive i da njihovo poznavanje daje dobru osnovu za predviđanje i rešavanje određenih tehnoloških i ekoloških problema. Fizička gustina je bila u opsegu $2,04 - 2,32 \text{ g/cm}^3$, a udeo frakcije manje od $63 \mu\text{m}$ između 10% i 81%. Na osnovu R modula leteći pepeo je svrstan u alumino-silikatne. Za sve uzorke je utvrđeno da sadrže veliku količinu amorfne materije, između 45% i 66%, a dominantni minerali su kvarc (5 - 31%) i feldspat (5 - 25%).

Ispitivanja novog sistema pneumatskog transporta u termoelektrani „Nikola Tesla B“ [80] obuhvatila su i određivanje karakteristika uzoraka letećeg pepela. Nasipna gustina je bila u opsegu $650 - 833 \text{ kg/m}^3$, a srednji prečnik $70 - 120 \mu\text{m}$, na osnovu čega je

većina uzoraka svrstana u grupu B prema Geldart-u [81] i preporučeni transport u ugušćenoj fazi.

Tabela 2.8 Hemijske karakteristike letećeg pepela u Srbiji

Literaturni izvor	[49]	[79]	[82]	[83]
Ispitivani parametar				
SiO ₂ +Al ₂ O ₃ +Fe ₂ O ₃ (%)		79,14 - 83,3		
SiO ₂ (%)	32,98 - 55,38	27,67 - 36,27	55,09 - 57,58	47,38 - 58,88
Al ₂ O ₃ (%)	12,24 - 23,22	-	22,68 - 24,92	13,36 - 25,39
Fe ₂ O ₃ (%)	5,46 - 11,44	-	4,88 - 5,96	2,03 - 4,69
CaO slobodni (%)	-	0,01 - 0,55	0,17 - 0,29	-
CaO reaktivni (%)	1,05 - 11,71	5,95 - 8,05	5,97 - 6,74	3,99 - 9,67
MgO (%)	1,83 - 3,28	2,61 - 3,04	2,03 - 2,57	2,8 - 4,74
SO ₃ (%)	0,12 - 2,45	0,64 - 1,51	1,55 - 2,36	3,01 - 8,7
K ₂ O (%)	0,67 - 1,23	-	0,9 - 0,99	0,71 - 1,02
CO ₂ (%)	-	-	0,25 - 0,50	-
TiO ₂ (%)	-	-	0,55 - 0,63	0,55 - 1,06
S (%)	0,05 - 0,98	-	-	-
alkalije kao Na ₂ O (%)	0,43 - 0,57	1,25 - 1,94	-	0,34 - 0,52
P ₂ O ₅	-	-	0,04 - 0,05	0,04 - 0,13
Cl ²⁻ (%)	-	0,04 - 0,05	-	-
Gubitak žarenjem (LOI) (%)	2,11 - 10,5	2,37 - 5,9	2,14 - 2,51	1,05 - 2,67
Amorfna faza (%)	45 - 66	-	-	-
Kvarc (%)	5 - 31	-	-	-
Feldspat (%)	5 - 25	-	-	-
pH	7,77 - 13,15	-	-	-
Reakcija	-	-	Izrazito kisela	-

Analiza kvaliteta letećeg pepela u Srbiji [79] obuhvatila je ispitivanja letećeg pepela iz više termoelektrana u Srbiji. U periodu ispitivanja, u Srbiji nisu postojali precizni podaci o godišnjim količinama produkata sagorevanja, kao ni proizvodnja suvog letećeg pepela, jer se odmah nakon izdvajanja u elektrofiltrima mešao sa vodom i šljakom iz ložišta i kao takav odlagao na deponiju. Kompletna hemijska i fizičko-mehanička ispitivanja su urađena na po 6 uzoraka za svaku od termoelektrana, čiji rad se uglavnom zasniva na sagorevanju lignita niskog ranga, donje toplotne moći 6000 - 8000 kJ/kg, sa sadržajem vlage 45 - 53%, sadržajem pepela 14,2 - 23,5% i visokim udelom ksilita. Ispitivani uzorci su pokazali dobru pucolansku aktivnost nakon 15 dana.

U okviru Studije opravdanosti i idejnog projekta rekonstrukcije sistema za transport i odlaganje pepela i šljake u okviru Termoelektrane „Nikola Tesla“ B [82], izvršena su ispitivanja fizičko-hemijskih karakteristika pepela lignita Kolubara, koji se izdvaja ispod ekonomajzera, zagrejača vazduha i ispod elektrofiltra. Nasipna gustina je bila u

granicama 574 - 652 kg/m³, nasipna gustina u zbijenom stanju 706,5 - 795,1 kg/m³, a fizička gustina 2,08 - 2,15 g/cm³.

U okviru iste elektrane, druga grupa autora [83] je za potrebe rekonstrukcije sistema za otpepeljivanje ispitala 12 uzoraka pepela lignita Kolubara, pri čemu je utvrđeno da se nasipna gustina kretala u opsegu 566 - 755 kg/m³, nasipna gustina u zbijenom stanju 650 - 1043 kg/m³, a fizička gustina 1,97 - 2,13 g/cm³. Srednji prečnik za ovu grupu uzoraka određen je u okviru ove disertacije, na osnovu podataka o granulometrijskom sastavu, i kretao se u veoma širokom opsegu 35,7 - 337 μm.

Za potrebe analize uticaja promenljivih uslova rada na projektovanje i eksploataciju sistema za pneumatski transport letećeg pepela, u okviru Termoelektrane „Nikola Tesla B“, ispitano je 10 uzoraka letećeg pepela lignita Kolubara [84]. Nasipna gustina se kretala u opsegu 610 - 1180 kg/m³, nasipna gustina u zbijenom stanju 670 - 1255 kg/m³ i fizička gustina 1,4 - 1,5 g/cm³, uz povišene vrednosti za dva uzorka 1,68 - 2,17 g/cm³ zbog visokog sadržaja SiO₂. Srednji prečnik uzoraka je bio u između 80 μm i 120 μm, uz izuzetak 2 pomenuta uzorka gde je bio od 200 μm i 350 μm.

U studiji [85], pored stvarne gustine, nasipne gustine i nasipne gustine u zbijenom stanju, za 4 uzorka letećeg pepela iz termoelektrane Kolubara određene su i stvarna gustine pojedinih frakcija (tabela 2.9).

Tabela 2.9 Rezultati ispitivanja objavljeni u studiji [85]

Ispitivani parametar		Uzorak				
		Uzorak 1	Uzorak 2	Uzorak 3	Uzorak 4	
Nasipna gustina (kg/m ³)		575	575	575	575	
Nasipna gustina u zbijenom stanju (kg/m ³)		800	800	800	800	
Stvarna gustina (g/cm ³)	za ceo uzorak	1,84	1,90	1,84	1,82	
	Frakcija	-300	1,55	1,58	1,68	1,85
		-300 +200	1,68	1,72	1,65	1,86
		-200 +100	1,84	1,74	1,79	1,85
		-100 +75	1,78	1,83	1,81	1,77
		-75 +61	1,84	1,83	1,74	1,79
		-61 +0	1,93	1,93	1,93	1,84

Jedino zabeleženo ispitivanje aeracionih karakteristika pepela u Srbiji prikazano je u [86], i to za 1 uzorak iz kotlarnice Kolubara - Prerada. Srednji prečnik je bio 44,5 μm, fizička gustina 2,1 g/cm³, nasipna gustina 475 kg/m³, nasipna gustina u zbijenom stanju 630 kg/m³, poroznost sloja 0,774, poroznost sloja u zbijenom stanju 0,7, dok su zrna bila zaobljena do dobro zaobljena. Ispitivani pepeo je svrstan u grupu A prema Geldart-

ovoj klasifikaciji [81], ali autori navode da se prilikom fluidizacije ponašao kao materijal koji pripada grupi C. Permeabilnost je iznosila $0,85 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/(\text{Pa} \cdot \text{s})$, prva kritična brzina fluidizacije $0,0085 \text{ m/s}$, a druga kritična brzina fluidizacije između $0,133 \text{ m/s}$ i $0,161 \text{ m/s}$. Autori su predložili primenu ugušćenog pneumatskog transporta.

2.3 Pneumatski transport

U mnogim proizvodnim procesima komprimovani vazduh se koristi za brz transport različitih vrsta sitnozrnastih materijala. Literaturni podaci govore da su pneumatski transportni sistemi u upotrebi preko 100 godina [87], veoma su raznovrsni i u osnovi jednostavni i izuzetno pogodni za rad. Često se koriste za transport velikih količina izrazito abrazivnih praškastih i zrnastih materijala, kao što su sprášeni ugalj i pepeo u termoelektranama, pesak u livnicama i staklarama, cement, aluminijum-oksidi i drugi materijali u različitim industrijama.

Osnovne elemente sistema pneumatskog transporta čine izvor komprimovanog gasa (vazduh u najvećem broju slučajeva), dozator, transportni cevovod i silos za prihvatanje materijala gde se isti razdvaja od nosećeg gasa.

Pojava opreme visokog pritiska (pumpe, ventilatori, kompresori, rezervoari) omogućila je primenu pneumatskog transporta na razdaljine i preko 1 km sa protokom većim od 100 t/h [88]. Većina sistema danas u upotrebi ima kapacitet od 1 do 400 t/h , na razdaljine ne veće od 1000 m, gde je prosečna veličina čestica manja od 10 mm, a ograničenja su češće ekonomske nego tehničke prirode.

Pored jednostavnog koncepta i napretka u razvoju opreme, brojne poteškoće prate razvoj pneumatskog transporta, zadajući probleme inženjerima uvećanom potrošnjom energije, previsokim brzinama transporta, erozijom i abrazijom sistema, nezadovoljavajućom pouzdanošću, čestim otkazima delova opreme, degradacijom proizvoda, neadekvatnim kapacitetom, stvaranjem naslaga materijala duž cevovoda ili čak potpunom blokadi, vlagom u liniji i dr.

Stalna istraživanja i razvoj novih metoda i tehnika još uvek nisu razjasnili osnovne fizičke postavke kompleksnog fenomena strujanja koje se odigrava u toku pneumatskog transporta. Kako se navodi u [87], prvo tehničko ispitivanje pneumatskog transporta obavio je Gasterstädt [89] 1924. godine. Tada počinje evolucija metoda istraživanja i

prelazak sa čisto eksperimentalnog i empirijskog pristupa ispitivanju na numeričke analize. Isti autor [87] navodi da su Tsuji i Morikawa 1982. godine prvi primenili numeričke metode za simulaciju i proračun pneumatskog transporta.

Težnja da se predvidi ponašanje sistema pneumatskog transporta postala je imperativ. Istraživači su saglasni da bi prediktivne metode trebalo da budu zasnovane isključivo na karakteristikama materijala, ali bilo kakve generalizacije još uvek nisu moguće [90]. Uglavnom su vršena ograničena ispitivanja na materijalima u laboratorijskim uslovima, a rezultati korelisani sa podacima iz postojećih sistema u radu ili pilot postrojenja. Faktori koji su dovedeni u vezu sa režimom strujanja, odnosno uopšte radom sistema pneumatskog transporta su karakteristike čestica (materijala), geometrija cevovoda (prečnik, dužina, broj kolena,...) i uslovi transporta (pritisak, brzina vazduha, ...) [91]. Prvi korak u projektovanju i eksploataciji pneumatskog transporta zahteva pravilno definisanje polaznih tačka i detaljno proučavanje karakteristika transportovanog materijala, minimalnih brzina potrebnih za transport, optimalnih uslova rada, prečnike cevovoda, potrebe za strujnim mašinama, i dr. [88]. S druge strane, poznavanje ovih podataka olakšava sagledavanje problema koji prate rad sistema pneumatskog transporta u postojećim postrojenjima.

Dugotrajna i iscrpna istraživanja još uvek nisu dovela do visoko pouzdanih rešenja za projektovanje sistema pneumatskog transporta velikog kapaciteta, otpornog na sve izazove pri transportu specifičnog materijala kao što je leteći pepeo neujednačenog sastava. Većina modela za proračun pneumatskog transporta zasnovana je na numeričkim simulacijama ili ispitivanjima na pilot postrojenjima, dok su pojave pri pneumatskom transportu veoma raznovrsne i kompleksne.

Opšti zaključak je da se moraju poznavati i dobro razumeti karakteristike materijala, koji je potrebno pneumatski transportovati, kako ne bi dolazilo do brojnih problema u radu ovih sistema [92]. Isti autor [87] predviđa da ćemo tek za 30 do 40 godina, uz konstantan rad, biti u mogućnosti da napravimo ozbiljniji iskorak ka rešenju problema pneumatskog transporta.

2.3.1 Karakteristike materijala i njihov uticaj

Pneumatski transport podrazumeva kretanje velikog broja čestica u ograničenom prostoru, a adekvatan rad postrojenja za pneumatski transport u potpunosti zavisi od karakteristika materijala, i to ne samo od različite vrste, već i od same šarže istog materijala [93]. Zbog toga, vrlo često se javlja ista greška prilikom definisanja i projektovanja sistema pneumatskog transporta isključivo na osnovu vrste, odnosno naziva materijala [94]. To je naročito izraženo kod letećeg pepela, koji je predstavnik izuzetno heterogene vrste materijala, što je očigledno na primeru vrednosti stvarnih gustina pojedinih frakcija pepela lignita Kolubara (tabela 2.9). Za sada je praktično nemoguće precizno odrediti fizičko-hemijske karakteristike za sve vrste letećeg pepela širom sveta, na osnovu kojih bi bilo moguće dobiti univerzalne smernice za projektovanje njegovog pneumatskog transporta.

Karakteristike materijala koje utiču na pneumatski transport su veličina čestica, raspodela veličina čestica (granulometrijski sastav), nasipna gustina, fizička gustina, permeabilnost, aeracione (fluidizacione) karakteristike (deaeraciona konstanta, zadržavanje vazduha), karakteristike površine (lepljivost, kohezivnost, elektrostatička svojstva), osetljivost na temperaturu [95].

Od svih navedenih, najčešće ispitivane karakteristike materijala su nasipna gustina, permeabilnost i deaeracija [90], odnosno srednja veličina čestica, njihov oblik i raspodela, fizička i nasipna gustina [88].

Problem kod letećeg pepela je da su sve pobrojane karakteristike izrazito heterogene i kreću se u veoma širokim granicama, zbog čega je izuzetno bitno uključiti u razmatranje i aeracione karakteristike materijala, jer bitno utiču na režim odvijanja pneumatskog transporta.

Poznavanje veličina čestica materijala predstavlja osnovu pouzdanog sistema njegovog pneumatskog transporta i njegovog upravljanja [96]. Sile privlačenja između čestica povećavaju se sa smanjenjem veličine čestice, i u zavisnosti od veličine čestica (d) može se izvršiti klasifikacija materijala na sledeće grupe [97]:

- komadni, $d > 10$ mm,
- krupnozrnasti, $d = (2 - 10)$ mm,
- sitnozrnasti, $d = (0,5 - 2)$ mm,

- prah, $d = (0,05 - 0,5)$ mm i
- fini prah, $d < 0,05$ mm.

Granulometrijski sastav nekog materijala može biti određen na različite načine [94], ali najjednostavnija i najčešće korišćena metoda, koja daje dovoljno konzistentne rezultate, je sitovna analiza. Sferne čestice su jednoznačno definisane prečnikom sfere, dok se veličina čestica nepravilnog oblika može predstaviti ekvivalentnim prečnikom koji se izračunava na osnovu sitovne analize [98].

Decenijama je poznato da je minimalna brzina transporta kritičan parametar za određivanje režima pneumatskog transporta u cevovodu [99], pada pritiska i potrebne količine vazduha, i da zavisi od veličine čestica i granulometrijskog sastava. Uži opseg raspodele veličina čestica ima tendenciju formiranja permeabilnih čepova i daje bolju mogućnost za predviđanje ponašanja pneumatskog transporta [96].

Oblik i struktura čestica su parametri koji se ne smeju zanemariti, međutim određivanje oblika čestica materijala i njegova kategorizacija je znatno kompleksnija od određivanja prečnika. Krhka i lomljiva struktura može ukazati sklonost materijala ka degradaciji i usitnjavanju tokom transporta. Za razliku od sferičnih, čestice izduženog i vlaknastog oblika imaju tendenciju da se upletu međusobno formirajući čepove materijala, dok oštre ivice tvrdih kristalnih materijala ukazuju na mogućnost povećane erozije i abrazije delova sistema pneumatskog transporta.

Fluido-dinamičke karakteristike materijala daju zavisnost protoka vazduha od materijala, pada pritiska i minimalno potrebne brzine za njegov transport [93].

Ostale prateće osobine materijala su kohezivnost, koja pokazuje intenzitet privlačnih sila između čestica, tvrdoća umnogome određuje uticaj na eroziju, abraziju i mere koje je potrebno preduzeti, dok elektrostatičke osobine mogu pojačati kohezivnost.

Poznavanje svih navedenih karakteristika nedovoljno je za procenu minimalnih brzina transporta, pada pritiska, i dr., a naročito u slučaju pneumatskog transporta na velike udaljenosti i kod cevovoda velikog prečnika. Tada se zahtevi moraju utvrditi koristeći pilot postrojenja [88] ili matematičke modele.

2.3.2 Aeracione karakteristike materijala

2.3.2.1 Fluidizacija

Fluidizacija je nezamenljiv proces u mnogim granama savremene industrije gde se tretiraju čvrsti sipkavi materijali, kao što je leteći pepeo. Pre početka bilo kakvog ispitivanja ili projektovanja u ovoj oblasti, moraju se istražiti fluidizacione karakteristike materijala [92].

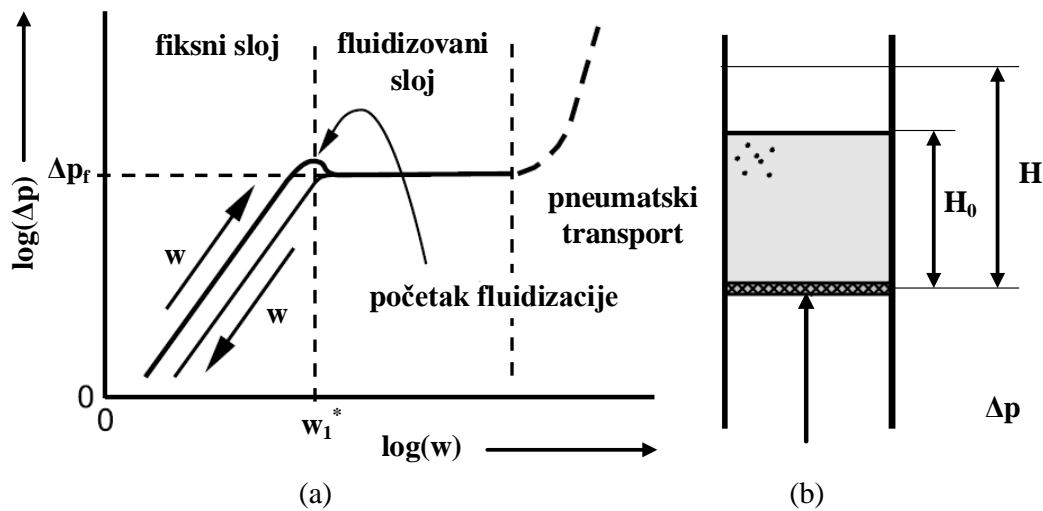
Fluidizacija predstavlja hidromehaničko stanje između gasa i čvrstih čestica, koje nastaje uvođenjem određene količine gasa u prostor sa sipkavim materijalom, a razbijanjem nasutog sloja čvrstih čestica u mnoštvo pojedinačnih čestica razdvojenih fluidom dobija se sredina pogodnija za razmenu mase, toplote ili za obavljanje hemijskih reakcija [100].

Fluidizacija je veoma izučavan pojam [101]–[108], a među najznačajnijim dostignućima izdvaja se formiranje faznog dijagrama i detaljnije objašnjenje mehanizama homogene, mehuraste, turbulentne i brze fluidizacije.

Uvođenjem gasa u nasuti sloj praškastog materijala ne dolazi do promena karakteristika tečljivosti materijala, sve dok se materijal ne fluidizuje. Tek nakon početka fluidizacije materijala dolazi do drastičnih promena njegove tečljivosti, nakon čega se aerisani praškasti materijal ponaša kao fluid. Opis promena u sloju prilikom fluidizacije, odnosno fazni dijagram fluidizacionih režima mešavine gas-čvrsta faza za rastresiti materijal u vertikalnoj koloni, dat je na slici 2.10. Karakteristike sloja praškastog materijala zavise od srednje brzine strujanja gasa u koloni w svedene na poprečni presek kolone. Definisane su promenom pada pritiska kroz sloj u zavisnosti od srednje brzine gasa $\Delta p = f(w)$ (slika 2.10 (a)). U koloni iznad poroznog dna nalazi se rastresiti materijal poznatih fizičkih svojstava, poroznosti ε_0 i visine nasutog sloja H_0 . Kroz porozno dno vrši se ravnomerno uvođenje gasa po poprečnom preseku kolone. Srednja brzina strujanja gasa u poprečnom preseku kolone w zavisi samo od zapreminskog protoka fluida \dot{V} koji se uvodi u kolonu i površine poprečnog preseka kolone A .

Na dijagramu (slika 2.10 (a)) se razlikuju tri oblasti: oblast nefluidizovanog (fiksno sloja), oblast fluidizovanog sloja, i oblast pneumatskog transporta. Kada se kroz nasuti sloj u koloni pusti gas, koji struji malim brzinama, ništa se neće dogoditi, strujanje je

laminarno i pad pritiska je linearna funkcija srednje brzine strujanja. Pad pritiska kroz sloj je najvećim delom posledica strujanja gasa kroz praškasti materijal. Zbog toga režim strujanja ne zavisi samo od protoka fluida, već i od krupnoće čestica, jer ona direktno utiče na veličinu protočnog preseka.



Slika 2.10 Fluidizacioni režimi mešavine gas-čvrsta faza [109]

(a) Logaritamski dijagram zavisnosti pada pritiska od srednje brzine gasa u koloni,
 (b) Šematski prikaz kolone za fluidizaciju.

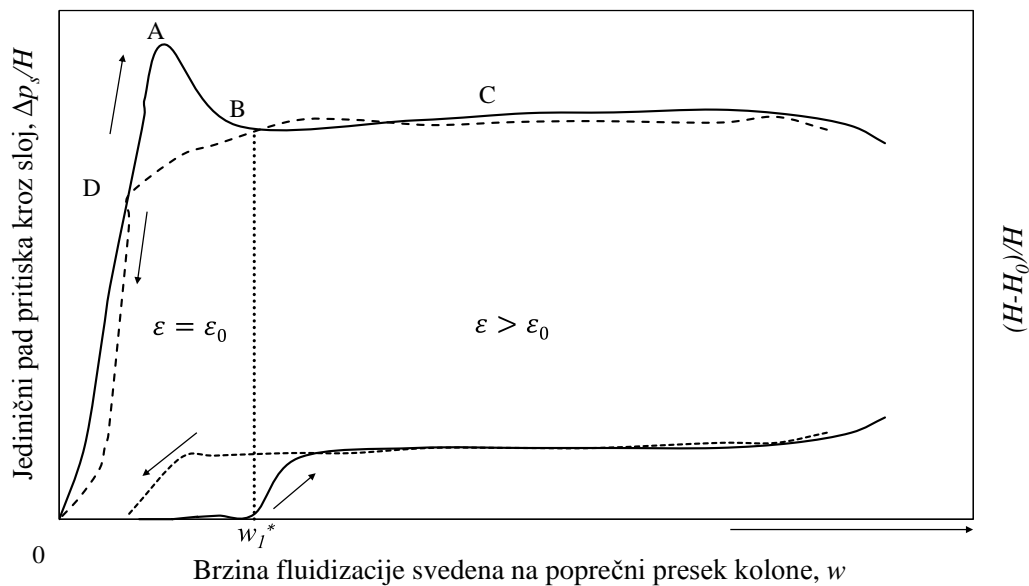
Malim delom dolazi do pada pritiska zbog trenja gasa o zid kolone. Sa porastom brzine strujanja gasa raste i pad pritiska kroz nasuti sloj, sve do dostizanja vrednost pri kojoj je moguće održavati čestice u stanju lebdenja. Brzina pri kojoj se gube mehaničke veze između čestica i pri kojoj se čestice postavljaju u najpovoljniji aerodinamički položaj, naziva se minimalna ili prva kritična brzina fluidizacije (w_1^*). Na početku režima fluidizacije može se dogoditi lokalni porast pada pritiska. Ovaj pik je posledica savladavanja adhezionih sila između čvrstih čestica koje su u kontaktu. U zavisnosti od fizičkih svojstava materijala, naglo smanjenje pada pritiska može biti između 10% i 15% od početne vrednosti. Prilikom smanjenja brzine gasa, nakon fluidizacije, na dijagramu (slika 2.10 (a)) se ne uočava stvaranje pika, jer su čestice prethodno fluidizovane i između njih nema adhezionih sila. Ne samo da ne dolazi do skoka pada pritiska, već se može uočiti i smanjenje pada pritiska jer je materijal koji se taloži nakon fluidizacije rastresen. Dalji porast srednje brzine gasa iznad prve kritične brzine ($w > w_1^*$) dovodi do porasta poroznosti materijala ($\varepsilon > \varepsilon_0$), zapremine dvofazne

mešavine u koloni i visine sloja, pri čemu pad pritiska ostaje približno stalan ($\Delta p = \Delta p_f$). Povećanje brzine praćeno je porastom pada pritiska, dok sa druge strane povećanje poroznosti usled povećanja visine sloja, dovodi do smanjenja pada pritiska. Ova dva efekta se međusobno poništavaju, tako da pad pritiska zadržava približno stalnu vrednost. Pri mnogo većim brzinama dolazi do iznošenja čestica iz sloja, što se smatra početkom pneumatskog transporta materijala. Posmatrana brzina definiše se kao druga kritična brzina fluidizacije [98], [100]. Dakle, fluidizacija se odvija samo između prve i druge kritične brzine fluidizacije. Pri drugoj kritičnoj brzini fluidizacije dostiže se najveća visina materijala i maksimalna poroznost sloja $\varepsilon = \varepsilon_{max}$ [100]. Ukoliko bi se pri ovoj brzini postavila prepreka iznad materijala i tako sprečilo odnošenje najsitnijih čestica, došlo bi do kretanja materijala u vidu fluidizovanog stuba, takozvanog fluid-lifta.

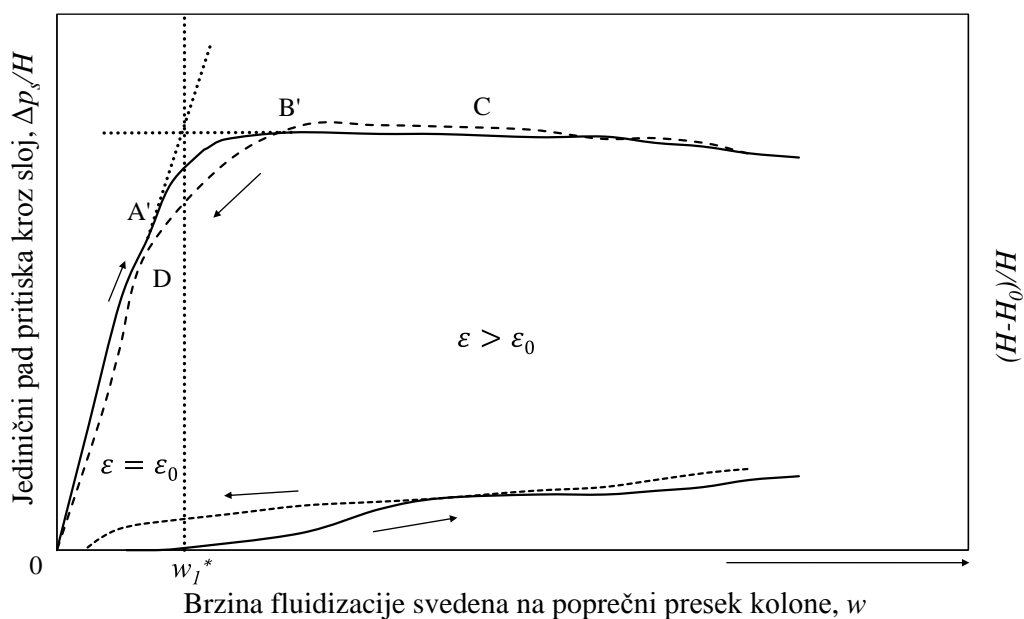
Fenomenološki opis promene stanja materijala za vreme fluidizacije predstavlja osnovu za tumačenje i analizu rezultata ispitivanja fluidizacije pepela [110]. Na slikama 2.11 i 2.12 dati su dijagrami za određivanje prve kritične brzine fluidizacije, formirani za dva karakteristična slučaja. Na dijagramima je prikazana zavisnost jediničnog pada pritiska $\Delta p_s/H$ (pada pritiska po jedinici visine sloja materijala) od brzine fluidizacije w . Porastom brzine w raste i jedinični pad pritiska (krive 0A i 0A' na dijagramima). Posmatrana zavisnost je linearnog karaktera za laminaran režim strujanja kroz prostor između čestica (za sitnije čestice), dok je za turbulentni režim strujanja (za krupnije materijale) nelinearna. U ovom području, hidrodinamičke sile koje se ostvaruju pri strujanju vazduha nisu dovoljne da izazovu promenu poroznosti ni po veličini ni po „obliku“ pa se ova vrsta fluidizacije naziva fluidizacijom pri stalnoj poroznosti ($\varepsilon = \varepsilon_0$). Granična vrednost brzine pri kojoj se ostvaruju hidrodinamičke sile dovoljne da poremete položaj čestica ostvaren u stanju mirovanja predstavlja minimalnu (kritičnu) brzinu fluidizacije w_l^* . Tada se čestice postavljaju u položaj u kome pružaju najmanji otpor strujanju vazduha kroz prostor između njih. Na taj način poroznost se promenila po veličini samo neznatno, ali je zato promena po „obliku“ značajna i utiče na smanjenje jediničnog pada pritiska (kriva AB na slici 2.11).

Postoje materijali kod kojih se ne pojavljuje karakteristično smanjenje jediničnog pada pritiska zbog fizičkih svojstava čestica. Takođe, u zavisnosti od načina formiranja

početnog nasutog stanja moguće je za isti materijal dobiti ili dijagram sa slike 2.11 ili dijagram sa slike 2.12.



Slika 2.11 Zavisnost jediničnog pada pritiska od brzine fluidizacije (I karakteristični slučaj)



Slika 2.12 Zavisnost jediničnog pada pritiska od brzine fluidizacije (II karakteristični slučaj)

Za dijagram sa slike 2.12 karakteristično je da se pri brzini u tački A' formira jedan ili više kanala kroz sloj materijala tako da se rast jediničnog pada pritiska sa povećanjem brzine usporava, jer tada veća količina vazduha struji kroz kanale. Ovakav režim strujanja narušava se kada brzina dostigne vrednost u tački B', tj. kada se izvrši homogenizacija sloja.

Posle tačke B, odnosno B', daljim povećanjem brzine raste pad pritiska kroz sloj Δp_s , ali i visina H sloja, tj. poroznost ε , dok jedinični pad pritiska $\Delta p_s/H$ ostaje približno konstantan. Zbog toga se ovo područje definiše kao područje fluidizacije pri promenljivoj poroznosti ($\varepsilon > \varepsilon_0$). Ovo strujanje ima sve odlike turbulentnog režima sa izraženim fluktuacijama i za stalnu vrednost jediničnog pada pritiska u ovom području treba uzeti njegovu prosečnu vrednost.

Fluktuacije visine i jediničnog pada pritiska se povećavaju sa povećanjem brzine fluidizacije w i mogu varirati u granicama i do $\pm 30\%$.

Smanjenjem brzine od tačke C do B, odnosno B', svi strujni parametri se menjaju identično kao i pri povećanju brzine od B, odnosno B', do C.

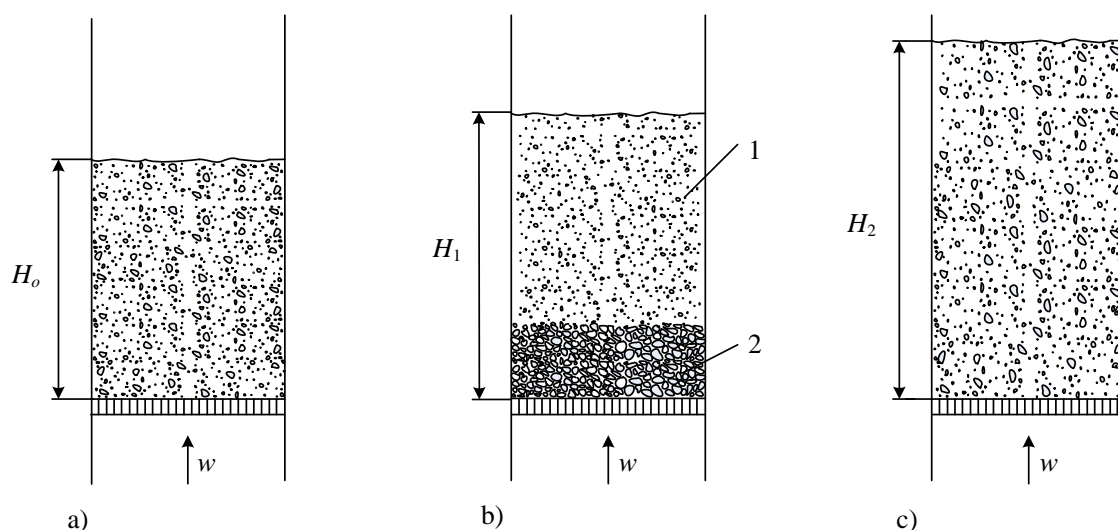
Međutim, smanjivanjem brzine od B do D (slika 2.11) jedinični pad pritiska je znatno manji od onog dobijenog povećanjem brzine, jer struja vazduha ne dozvoljava formiranje čvrste veze između čestica. Tačka D može da bude i na krivoj 0A, ali i da se poklopi sa tačkom 0.

Smanjenjem brzine od B' do D, za materijal sa slike 2.12, jedinični pad pritiska može biti i manji, ali i veći od onog dobijenog povećanjem brzine od A' do B', što zavisi od kanala koji su tom prilikom stvoreni.

Prva kritična brzina fluidizacije w_j^* , za materijal sa slike 2.11, jasno je određena tačkama A i B. Kod materijala sa slike 2.12 situacija je komplikovanija, jer to očigledno nije brzina u tačkama A' i B', već vrednost između njih, koja se dobija u preseku produžetaka krivih 0A' i B'C. Treba naglasiti da će se režim strujanja karakterističan za prvu kritičnu brzinu fluidizacije u ovom slučaju ostvariti isključivo ako se najpre brzina poveća do B', a zatim smanji do izračunate vrednosti w_j^* .

U donjem delu dijagrama na slikama 2.11 i 2.12 date su krive relativne ekspanzije sloja $(H - H_0)/H_0$. Trend promena ovih krivih u svemu prati opisane fenomene. Izložen opis ponašanja materijala pri fluidizaciji važi za materijal jednolike krupnoće i fizičko-hemijskog sastava.

U slučaju fluidizacije materijala nejednolike krupnoće i heterogenog fizičko-hemijskog sastava, javljaju se i dopunski efekti (slika 2.13). Pri prostrujavanju brzinom koja odgovara minimalnoj brzini fluidizacije za sitnije i lakše čestice, one će „isplivati“ na površinu sloja i taj deo sloja će imati sve karakteristike početka fluidizacije pri promenljivoj poroznosti. Međutim, donji deo sloja ostaje u području fluidizacije pri stalnoj poroznosti. Za ovakve materijale, vizuelno, a i grafički određena prva kritična brzina fluidizacije nije merodavna za definisanje uslova pneumatskog transporta. Za izuzetno heterogene materijale pri toj brzini donji sloj će ostati nepokretan, a za manje heterogene materijale kretaće se vrlo sporo ili sa zastojećima.



Slika 2.13 Prikaz fluidizacije pepela nejednolike krupnoće i heterogenog fizičko-hemijskog sastava [111]

- a) nasuti sloj pepela pre fluidizacije,
 b) sitniji deo pepela (1) se fluidizuje, krupniji deo pepela (2) je nepokretan,
 c) postignuta potpuna fluidizacija.

Iako se na prvi pogled može učiniti da je proces fluidizacije potpuno definisan i objašnjen, novim generacijama ostaje dosta toga da urade u cilju jasnijeg razumevanja i unapređenja primene ovog postupka.

2.3.2.2 Permeabilnost

Permeabilnost se definiše kao mera lakoće kojom vazduh prolazi kroz sloj nasutog materijala kada je izložen razlici pritiska [94]. Isti autor je uveo pojmove dobre i loše permeabilnosti i definisao njihove granice.

Materijali u obliku peleta uglavnom imaju dobru permeabilnost zbog malog otpora pri strujanju gasa kroz međuprostor. Vrednost permeabilnosti za ove materijale veća je od $120 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/(\text{Pa} \cdot \text{s})$.

Materijali sa veoma širokim opsegom veličina čestica obično imaju lošu permeabilnost, sa vrednostima do $120 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/(\text{Pa} \cdot \text{s})$. Mali čep materijala loše permeabilnosti, koji zapuši cevovod za pneumatski transport, dovoljan je da drži pritisak od 5 bar nekoliko minuta.

Permeabilnost materijala prema gasu je identifikovana kao važna karakteristika za uspešan transport u vidu čepa [112].

Jedan od najpoznatijih radova na temu protoka fluida kroz sloj nasutog materijala objavio je Ergun [113], gde je dao jednačinu:

$$\frac{\Delta p_s g}{H_m} = 150 \frac{(1-\varepsilon)^2}{\varepsilon^3} \frac{\mu_g w}{d_e^2} + 1,75 \frac{(1-\varepsilon)}{\varepsilon^3} \frac{\rho_g w^2}{d_e}, \quad (2.2)$$

gde su:

- d_e , efektivni prečnik čestice, (m),
- g , gravitaciono ubrzanje, (m/s^2),
- H_m , visina sloja nasutog materijala, (m),
- w , srednja brzina strujanja gasne faze, (m/s),
- Δp_s , pad pritiska kroz sloj materijala, (Pa),
- ε , poroznost materijala, (-),
- μ_g , dinamička viskoznost gasne faze, ($\text{Pa} \cdot \text{s}$), i
- ρ_g , stvarna (fizička) gustina gasne faze, (kg/m^3).

Srednja brzina vazduha se računa kao količnik zapreminskog protoka vazduha kroz kolonu i površine poprečnog preseka kolone, pri čemu se smatra da je kolona prazna.

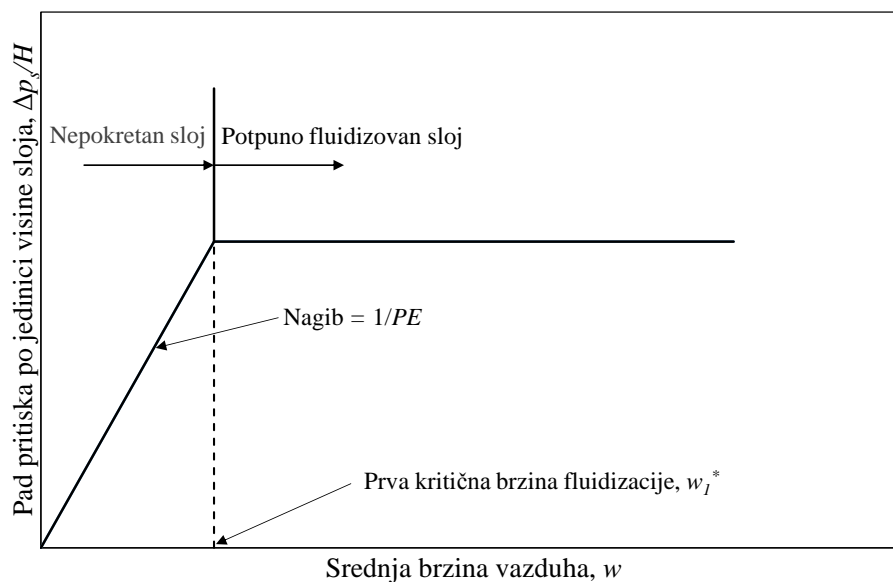
Poteškoću pri korišćenju Ergun-ove jednačine predstavlja određivanje efektivnog prečnika čestice, koji nije isti kao srednji ekvivalentni prečnik. Ergun-ova jednačina se sastoji iz dva dela. Prvi član je dominantna komponenta pri laminarnom strujanju fluida i uzima u obzir gubitak energije usled viskoznosti, dok je drugi član komponenta pri turbulentnom strujanju i uzima u obzir gubitke usled inercije. Testovi su pokazali da je pri malim brzinama gasa veza između $\Delta p_s / H$ i w linearna, pa se za laminarni tok ta veza se može prikazati na sledeći način:

$$w = \frac{PE \cdot \Delta p_s}{H}, \text{ (m/s) ili (cm/s)}, \quad (2.3)$$

gde je:

- PE, faktor permeabilnosti koji zavisi od karakteristika materijala i fluida, $(\text{m}^2/(\text{Pa}\cdot\text{s}))$ ili $(\text{m}^3\text{s}/\text{kg})$.

Na slici 2.14 prikazan je dijagram koji daje idealizovanu vezu između pada pritiska po jedinici visine sloja materijala i brzine vazduha u koloni, za uslove laminarnog strujanja. Vidi se da je deo dijagrama, koji je vezan za nepokretni sloj, prava linija.

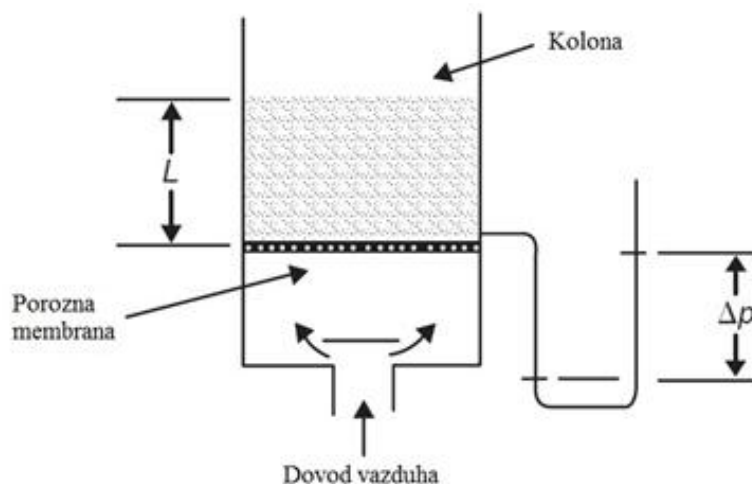


Slika 2.14 Idealizovana veza gradijenta pritiska i brzine vazduha za proticanje kroz sloj materijala [94]

Prema britanskoj asocijaciji za rukovanje materijalima [114] inverzna vrednost nagiba te linije predstavlja faktor permeabilnosti i koristan je parametar koji karakteriše propustljivost materijala prema fluidu.

Faktor permeabilnosti prihvaćen je kao lako merljiv indikator propustljivosti materijala prema vazduhu i dovodi se u vezu sa performansama pneumatskog transporta. Rezultati koji se dobijaju pri merenju faktora permeabilnosti su veoma pouzdani u pogledu ponovljivosti i proizvode dobre linearne veze. Za veoma hrapave materijale, sa relativno malim minimalnim brzinama fluidizacije, uticaj drugog člana Ergun-ove jednačine se ogleda u vidu blage zakrivljenosti linije pri velikim brzinama.

Aparatura za određivanje faktora permeabilnosti - permeametar (slika 2.15), sastoji se iz providne cevi od pleksiglasa ili stakla, na čijem dnu se nalazi porozna pregrada, koja može biti izrađena od različitog materijala (tkanina, presovani metal). Uloga porozne pregrade je da drži nasuti materijal i propušta vazduh. Ispod porozne pregrade može se nalaziti komora sa ispunom (Rašigovi prsteni, Palovi prsteni), radi bolje distribucije vazduha koji se dovodi iz duvaljke ili kompresora. Merenju faktora permeabilnosti prethodi određivanje pada pritiska kroz poroznu pregradu, kako bi kasnije bio oduzet od ukupnog pada pritiska (kroz poroznu pregradu i nasuti sloj materijala). Faktor permeabilnosti se određuje postepenim povećavanjem dotoka vazduha u kolonu prateći pad pritiska, brzinu fluida i visinu nasutog sloja materijala u koloni.



Slika 2.15 Skica tipičnog permeametra [94]

Pad pritiska kroz poroznu pregradu određuje se identičnim postupkom kao i kod određivanje faktora permeabilnosti, uz razliku što je u ovom slučaju kolona prazna, odnosno materijal nije nasut.

2.3.3 Tipovi sistema i režimi pneumatskog transporta

Raznovrsna primena i različite vrste materijala usloveli su razvoj brojnih sistema pneumatskog transporta. Prema klasifikaciji [115], sistemi pneumatskog transporta se prema različitim kriterijumima dele na: otvorene ili zatvorene, potisne ili vakuumske, fiksne ili mobilne, nisko-pritisne ili visoko-pritisne, konvencionalne ili inovativne, šaržne ili kontinualne, sa jednom ili više jedinica, i razređene ili ugušćene.

Otvoreni sistemi predstavljaju primarni tip pneumatskog transporta, naročito u slučaju kada je gasna faza vazduh i kada nema posebnih zahteva u pogledu zaštite životne sredine. S druge strane, zatvoreni sistemi se koriste isključivo u specifičnim okolnostima, kada se radi sa toksičnim i potencijalno eksplozivnim materijalima, i tada se obično koristi azot ili drugi gas.

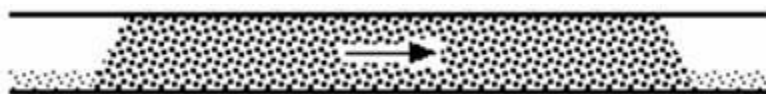
Potisni sistemi su najzastupljeniji sistemi pneumatskog transporta, kada je na izlazu atmosferski pritisak, iako postoje brojni problemi prilikom uvođenja materijala u cevovod ispunjen vazduhom pod pritiskom. Vakuumski sistemi se najčešće koriste kada je potrebno transportovati materijal sa više lokacija.

Najveći broj sistema pneumatskog sistema je na fiksnoj lokaciji u okviru industrijskog postrojenja, dok se mobilni sistemi upošljavaju za specifične namene u okviru drumskih vozila, železničkih vagona i brodova za utovar i istovar različitih materijala (šećer, brašno, pesak, cement, PVC, itd.).

U pneumatskom transportu, pod visokim pritiskom se smatra sve preko 1 bar natpritiska. Sistemi se retko kad projektuju da ulazni natpritisak bude preko 6 bar, kada je na izlazu atmosferski pritisak [94]. Veliki pritisci (20 - 40) bar se primenjuju kada je i izlaz na povišenom pritisku (hemijski reaktori i sl.).

Mnogo je zabuna i nejasnoća prilikom definisanja terminologije koja se odnosi na način na koji se materijal transportuje kroz cevovod, a autori su uveli svoje nazive za različite režime strujanja.

Pre svega je potrebno razmotriti da li se materijal može transportovati u šaržama ili kontinualnim sistemima. Ukoliko se radi o maloj šarži materijala, isti može biti transportovan u vidu jednog čepa (slika 2.16).



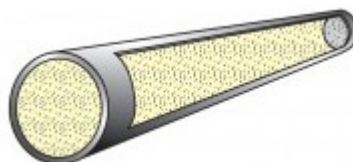
Slika 2.16 Šematski prikaz pneumatskog transporta u vidu jednog čepa materijala (single plug) [116]

Međutim, u slučaju velikih šarži i kontinualnog transporta, većina autora je saglasna da postoje dva režima pneumatskog transporta [115], [117]:

- razređeni pneumatski transport (transport u suspenziji) (dilute phase pneumatic conveying), i
- ugušćeni pneumatski transport (dense phase pneumatic conveying).

Iako dokumentovan u literaturi tek 1924. godine [89], razređeni pneumatski transport je zasigurno i dosta ranije bio primenjivan u industriji, upravo zbog jednostavnosti sistema [92].

Dokle god postoji dovoljna količina vazduha, skoro svi materijali (bez obzira na veličinu čestice, oblik i gustinu) mogu biti transportovani u razređenoj fazi, i gotovo da nema tehničkih ograničenja u dužini razređenog pneumatskog transporta, (slike 2.17 i 2.18).



Slika 2.17 Šematski prikaz razređenog pneumatskog transporta [118]



Slika 2.18 Šematski prikaz razređenog pneumatskog transporta [116]

Ovaj vid transporta karakteriše rad pri niskom pritisku (do 1 bar [119]), i zahtev za velikim brzinama strujanja vazduha (15 - 40 m/s [119]) (najmanje dvostruko veće od odgovarajućih brzina u slučaju ugušćenog transporta) kako bi se osigurao transport u suspenziji, izbeglo formiranje naslaga i olakšalo čišćenje cevovoda [88]. Tipične brzine strujanja vazduha su od 11 do 16 m/s, obično oko 12 m/s za fine praškaste materijale, do 16 m/s za zrnaste, a preko toga za veće čestice i za materijale veće gustine [115]. Minimalna brzina transporta za cement je 10 m/s, dok je za leteći pepeo približno istog srednjeg prečnika čestica oko 11 m/s (zbog razlika u obliku čestica). Velike brzine strujanja prate uvećana potrošnja energije i različiti eksploatacioni problemi, pre svega habanje cevovoda i armature [120]. Naročito otežavajući faktor za mogućnost transporta nekog materijala u razređenoj fazi su njegova abrazivna svojstva, što je bitna karakteristika letećeg pepela. Razređeni režim karakteriše i odnos masenog protoka čvrste faze i masenog protoka vazduha koji se kreće u granicama 0 - 15 kg_{čvrste faze}/kg_{vazduha}. Međutim, ukoliko se radi o kratkom cevovodu, ili sistemu visokog pritiska, vrednost ovog odnosa može dostići i 30 kg_{čvrste faze}/kg_{vazduha} [115].

Sve do 1971. godine, pneumatski transport se uglavnom odvijao u razređenoj fazi, kada se javlja potreba za redukovanjem potrošnje energije [92]. Ugušćeni transport se smatra poželjnijim i kada je potrebno smanjiti atriciju čestica materijala, stvaranje prašine, habanje opreme i troškove transporta, takođe za transport materijala prečnika većeg od 100 μm [121]. Ovi sistemi su znatno kompleksniji, a karakteriše ih viši pritisak (preko 1 bar) i znatno niži udeo vazduha u odnosu na udeo materijala (uglavnom abrazivnih svojstva). Zbog toga se projektuju tako da se transport odvija umerenim brzinama, čak i do 3 m/s [94]. Odnos masenog protoka čvrste faze i masenog protoka vazduha kod ugušćenog pneumatskog transporta je veći od 15 kg_{čvrste faze}/kg_{vazduha} [96]. Ono što ih čini težim za primenu, jeste činjenica da transportovani materijal mora imati dobru permeabilnost i/ili osobinu zadržavanja vazduha. U skladu sa tim, postoje dva potpuno različita režima transporta u ugušćenoj fazi.

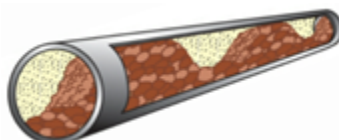
Prvi karakteristični režim je u vidu pokretnog sloja materijala (moving bed flow) (slika 2.19), gde se materijal kreće kroz cevi u obliku dina preko dna cevi.



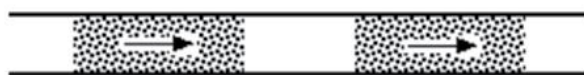
Slika 2.19 Šematski prikaz ugušćenog transporta u vidu pokretnog sloja [118]

Na ovaj način je moguće transportovati materijale koji dobro zadržavaju vazduh, obično prečnika manjeg od $50\ \mu\text{m}$, pri izrazito malim brzinama strujanja vazduha (cement, brašno i fine frakcije letećeg pepela) i sa vrlo malim padom pritiska. Minimalni odnos masenog protoka čvrste faze i masenog protoka vazduha mora biti $20\ \text{kg}_{\text{čvrste faze}}/\text{kg}_{\text{vazduha}}$, a nisu retki slučajevi da taj odnos dostigne i $100\ \text{kg}_{\text{čvrste faze}}/\text{kg}_{\text{vazduha}}$ [115].

Drugi karakteristični režim je u vidu čepa ili klina (plug flow; slug flow) (slike 2.20 - 2.22), gde se materijal kreće u vidu čepova ili klinova koji zauzimaju pun poprečni presek cevi, a međusobno su odvojeni vazdušnim prazninama. Kako bi bio moguć transport u ovom režimu, materijal mora imati dobru permeabilnost, što je karakteristika zrnastih materijala ujednačene veličine (semena, zrna, peleta).



Slika 2.20 Šematski prikaz ugušćenog transporta u vidu čepa ili klipa [118]



Slika 2.21 Šematski prikaz ugušćenog transporta u vidu čepa [116]



Slika 2.22 Šematski prikaz ugušćenog transporta u vidu klina [116]

Kod ovog režima transporta, odnos masenih protoka čvrste i gasne faze nije merodavan podatak i nema isti značaj, jer vazduh lako prolazi kroz čepove materijala, i ta vrednost

može biti maksimalno $30 \text{ kg}_{\text{čvrste faze}}/\text{kg}_{\text{vazduha}}$. U ovom režimu, materijali mogu biti pouzdano transportovani brzinama od 3 m/s [115].

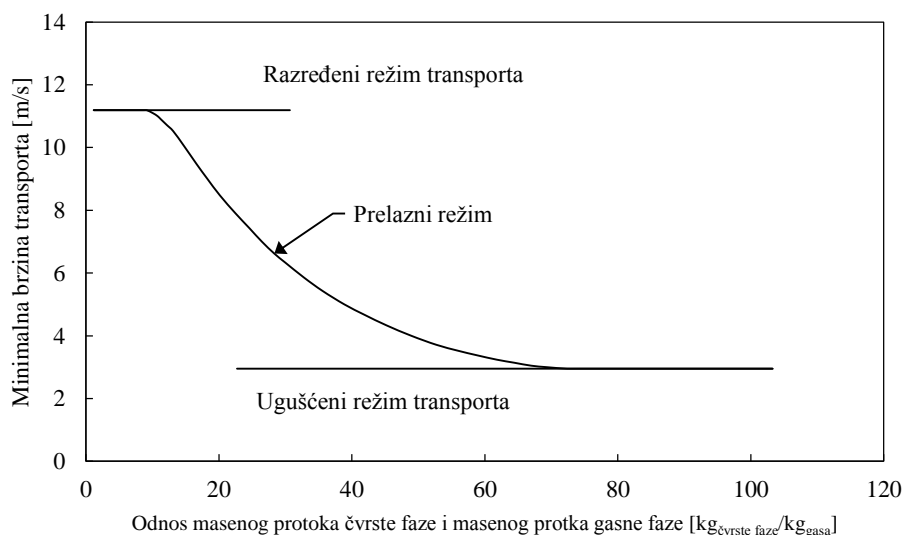
Dobro optimizovan sistem ugušćenog pneumatskog transporta obezbeđuje veći kapacitet uz daleko manje brzine, manje habanje opreme i manju degradaciju transportovanog materijala, a omogućeno je znatno efikasnije čišćenje cevovoda [88].

Transport peska pri uobičajenim brzinama za razređenu fazu 20 - 40 m/s može oštetiti komponente sistema kroz nekoliko dana, ili čak nekoliko sati. Usporavanjem sistema na oko 5 m/s, praveći ugušćeni transport, sistem može pouzdano prenositi isti abrazivni materijal mnogo godina bez značajnijeg habanja.

Sama činjenica da je materijal abrazivan ne znači nužno da je pogodan za ugušćeni transport. Zapravo, da bi se transportovao u ugušćenoj fazi, materijal mora imati sposobnost da propušta vazduh (permeabilnost) i/ili da poseduje sposobnost fluidizacije (dodavanjem vazduha, materijal dobija svojstva fluida). Takav materijal ima uniforman granulometrijski sastav i oblik.

Poređenje dva ekstremna tipa materijala [122], od kojih jedan jeste, a drugi nije moguće transportovati u ugušćenoj fazi - livački pesak i običan pesak sa plaže, odlično ilustruje ovu tvrdnju i objašnjava problem pneumatskog transporta letećeg pepela. Livački pesak ima uniforman granulometrijski sastav i oblik čestica, što ga čini veoma permeabilnim za vazduh. Zbog tih svojstava, livački pesak je moguće lako transportovati u ugušćenoj fazi. Nasuprot tome, pesak sa plaže ima značajne razlike u veličini i obliku čestica, tako da je daleko manje permeabilan za vazduh. Ukoliko bi se pesak sa plaže transportovao u ugušćenoj fazi, došlo bi do zagušenja sistema u roku od nekoliko minuta. Povećavanjem brzine vazduha pri transportu peska sa plaže, npr. dodavanjem injektora vazduha duž cevovoda, pesak će se kretati kroz sistem. To je omogućeno povećanjem brzine vazduha kroz sistem, bez obzira na njegov stepen permeabilnosti za vazduh. Međutim, povećanjem brzine vazduha do tačke u kojoj će se pesak sa plaže pouzdano transportovati, nastaje razređen sistem, koji će dovesti do brzog habanja. Iako sistem sadrži opremu tipičnu za transport u ugušćenoj fazi, kao što je posuda pod pritiskom i kompresor za vazduh, njegov rad je u razređenoj fazi. To bi značilo da pesak sa plaže nije moguće transportovati u ugušćenoj fazi. Podelom peska sa plaže u nekoliko frakcija, može se ostvariti pouzdan transport svake od frakcija u ugušćenoj fazi.

Međutim, čak i kada materijali poseduju odgovarajuća svojstva (permeabilnost i/ili sposobnost zadržavanja vazduha), nije dovoljna garancija za uspešan transport u ugušćenoj fazi [115]. To jasno pokazuje i dijagram na slici 2.23, formiran upravo za materijale koji imaju sposobnost dobrog zadržavanja vazduha i koji su pogodni za transport u ugušćenoj fazi malim brzinama. Prilikom projektovanja, pored karakteristika materijala, bitni faktori koji se moraju uzeti u obzir su dužina transporta i mogući pad pritiska. Kako može uočiti na dijagramu, ne postoji jasna promena između režima. Ukoliko u cevovodu ne postoji neophodan odnos masenog protoka čvrste faze i masenog protoka vazduha, doći će do zagušenja.

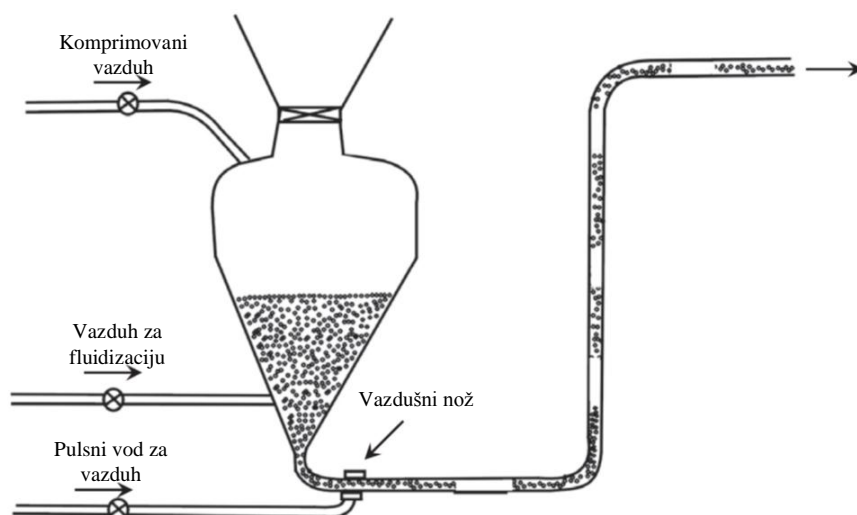


Slika 2.23 Režimi transporta za materijale koji dobro zadržavaju vazduh, pogodnih za ugušćeni transport malim brzinama [115]

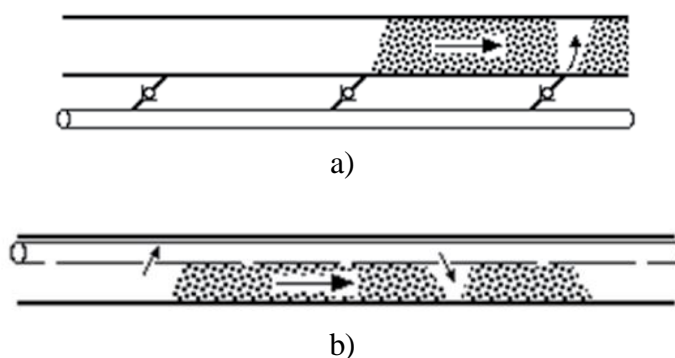
Konvencionalni sistemi su svi standardni sistemi kod kojih se materijal jednostavno uvodi u cevovod i biva usisan ili nošen strujom gasa do izlaza, i stoga se ne smatraju specijalnim slučajevima.

Inovativni sistemi se naročito primenjuju za transport određenog materijala u ugušćenoj fazi malim brzinama, kada razmatrani materijal nema prirodnu sposobnost za ovaj vid transporta. U tom slučaju, ne mogu biti primenjeni ni visoko-pritisni sistemi, budući da je mogućnost transporta u ugušćenoj fazi određena svojstvima materijala, pre svega permeabilnošću i njegovom sposobnošću da zadržava vazduh. Abrazivni, higroskopni i materijali skloni degradaciji zahtevaju drugačiji pristup. Korišćenjem alternativnih,

inovativnih sistema, materijal mora biti tretiran na određeni način (prilikom uvođenja u cevovod ili duž cevovoda), kako bi bio doveden u pogodno stanje za transport. Jedno od mogućih rešenja transporta finih kohezivnih, kao i mnogih drugih materijala je primena pulsno sistema za formiranje čepova (slika 2.24). Bajpasni sistemi (slika 2.25) se najčešće koriste za transport materijala koji nisu permeabilni za vazduh i koji su skloni formiranju čepova prilikom transporta malim brzinama, na taj način što razbijaju dugačke čepove materijala celom dužinom cevovoda.



Slika 2.24 Pulsni sistem za formiranje čepova [115]

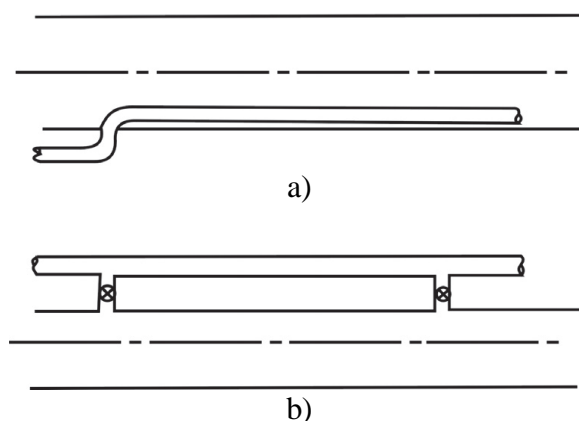


Slika 2.25 Bajpasni sistemi [116]

a) eksterni; b) interni

Dok bajpasni sistemi veštački stvaraju dobru permeabilnost materijala prema vazduhu, sistemi za ubrizgavanje vazduha (slika 2.26) doprinose uspostavljanju i održavanju sposobnosti materijala da zadržava vazduh. Razlika u odnosu na bajpasni sistem je taj

što paralelna linija ima nezavisni dovod vazduha, što može doprineti povećanju brzine strujanja vazduha, a samim tim i do povećane erozije cevovoda i degradaciji materijala. Stoga, dodavanje vazduha u cilju uspostavljanja ugušćenog režima transporta treba biti svedeno na minimum.



Slika 2.26 Sistemi za ubrizgavanje vazduha [115]

a) porozna cev; b) buster linija

U nekim slučajevima poželjno je transportovati materijal u režimu gde materijal konstantno zauzima pun poprečni presek cevi (slike 2.27 i 2.28).



Slika 2.27 Šematski prikaz ugušćenog transporta gde materijal konstantno zauzima pun poprečni presek [118]



Slika 2.28 Šematski prikaz ugušćenog transporta gde materijal konstantno zauzima pun poprečni presek [116]

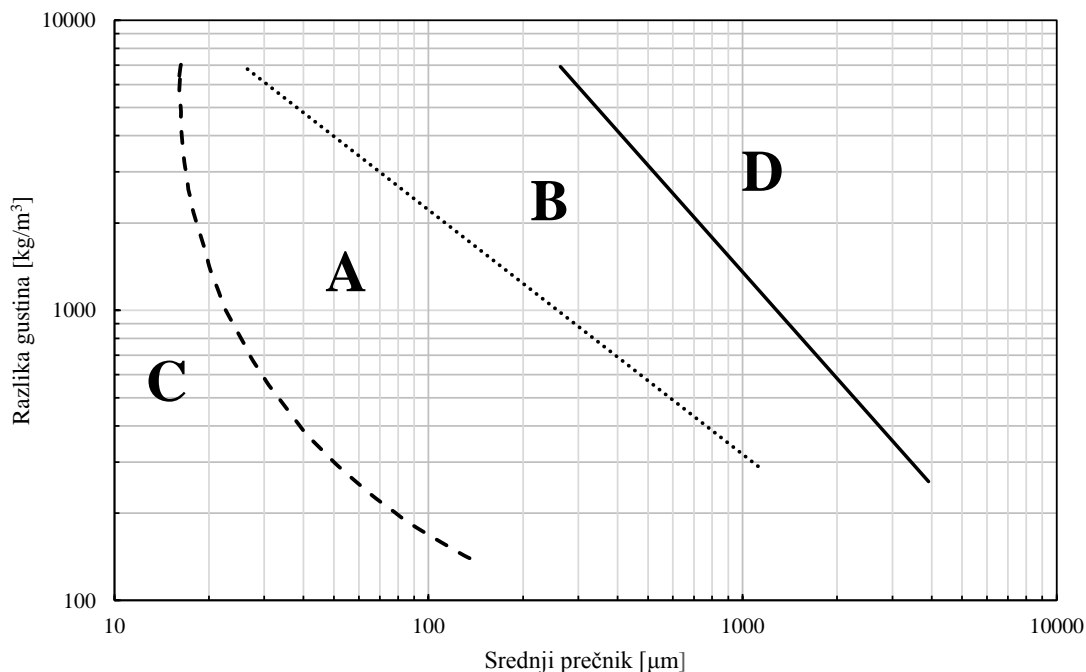
Neke od uspešnih primena ovog režima transporta je za transport komada mesa i ribe u proizvodnji hrane za kućne ljubimce, razmekšana zrna i povrće u procesima obrade hrane i konzerviranja. Dakle, vrlo važan režim transporta u slučajevima gde bi razređeni

transport uzrokovao prekomerno oštećenje proizvoda i kada materijali nisu pogodni za ostale vrste ugušćenog transporta.

2.3.4 Karakterizacija i klasifikacija materijala za određeni režim pneumatskog transporta

Geldart [81] je prvi istraživao fluidizacione karakteristike materijala. Ispitujući zavisnost dimenzija čestica (srednji prečnik) i fizičke gustine materijala i gasa kojim se vrši fluidizacija (okolni vazduh), odnosno ponašanje materijala u koloni za fluidizaciju, klasifikovao je materijale u 4 grupe (slika 2.29):

- grupa A (aerable),
- grupa B (bubble),
- grupa C (cohesive) i
- grupa D (dominantly inertial).



Slika 2.29 Geldart-ova klasifikacija sipkavih čvrstih materijala [81], [94]

Smatrao je da ove veličine najviše utiču na fluido-dinamičke karakteristike sipkavih materijala, što se do sada u praksi pokazalo tačnim. Iako je vršio ispitivanja

fluidizacionih karakteristika materijala bez ikakvog osvrta na pneumatski transport, ispostavilo se da je ustanovio jedan od najefikasnijih načina za brzo određivanje ponašanja praškastih materijala prilikom pneumatskog transporta, poznajući samo podatke o srednjem prečniku čestica čvrste faze i fizičkim gustinama čvrste faze i gasa (odnosno razlici fizičkih gustina čvrste i gasovite faze). Ukoliko je gas vazduh situacija se dodatno uprošćava, jer se fizička gustina gasa može zanemariti (fizička gustina vazduha je zanemarljiva u odnosu na fizičku gustinu materijala). Pored toga što je vrlo korisna, ova klasifikacija ipak ima ograničenja koja su se pokazala u praksi.

Granice Geldart-ove klasifikacije su nedovoljno dobro definisane i dvosmislene, naročito kada se radi o materijalima sa širokim opsegom raspodele veličine čestica ili kada čestice nisu sfernog oblika [95]. Zbog toga se javljaju i određene razlike prilikom njihovog tumačenja, ali većina autora se slaže da grupa materijala C nije pogodna za fluidizaciju, dok grupe materijala A, B i D postižu određeni stepen fluidizacije, što je od važnosti za praktičnu primenu.

Grupu A čine materijali sa česticama male gustine ($\rho_p < 1,4 \text{ g/cm}^3$) [97], [123] i/ili malog prečnika čestica (30 - 100 μm) [95], odnosno (30 - 150 μm) prema [124]. Ovu grupu karakteriše brza, glatka i homogena fluidizacija [97], [124], odnosno dobro zadržavanje vazduha [94], što utiče na njihovu sklonost ka nastavku strujanja čak i nakon isključivanja dovoda vazduha. Mogu formirati čepove. Navedene karakteristike ih čine najpogodnijim za ugušćeni fluidizovani transport [94], a smatraju se najboljim slobodno-padajućim materijalima za razređeni transport [90]. Tipičan predstavnik materijala iz grupe A je FCC katalizator [95].

Grupu B čine materijali srednje gustine (1,4 - 4,0 g/cm^3) [123], [124] i srednje veličine čestica [97], [124]. Različita tumačenja dovela su do neslaganja, pa je tako opseg prečnika za ovu grupu 40 - 500 μm [123], [124], 100 - 800 μm u [95], odnosno 150 - 1000 μm [125]. Materijali koji pripadaju grupi B ostvaruju dobru fluidizaciju pri velikim protocima gasa. Deaerišu se vrlo brzo po prestanku dovoda i strujanje se prekida gotovo trenutno [94]. Zbog loše ili nikakve sposobnosti da zadržavaju vazduh, ove materijale nije moguće transportovati u ugušćenoj fazi konvencionalnim sistemima pneumatskog transporta, zbog čega polju B odgovara otežan zgusnuti transport materijala [95]. Pri transportu, naročito u dugačkim cevovodima, može se javiti razdvajanje materijala prema veličini i gustini, što u ekstremnim situacijama dovodi do

stvaranja naslaga u cevovodima, zatvaranja protočnog preseka i potpunog zastoja. Tipičan predstavnik materijala iz grupe B je običan morski ili rečni pesak.

Grupu C čine veoma kohezivni, fini prahovi, sa malom raspodelom veličina čestica i prečnika manjeg od 30 μm [123]–[125]. Veoma se teško fluidizuju [124], [125] i sklone su stvaranju kanala prilikom isticanja iz bunkera [125], što ih čini izuzetno nepogodnim za transport u ugušćenoj fazi u konvencionalnim sistemima pneumatskog transporta. Tipični predstavnici materijala iz grupe C je brašno [95].

Grupu D čine veoma veoma gusti i krupni sipkavi materijali, prečnika većeg od 500 μm prema [124] odnosno većeg od 800 μm prema [95]. Karakteriše ih dobra permeabilnost i formiranje velikih mehurova [125], koji se veoma sporo dižu kroz sloj, znatno sporije od brzine kretanja gasa kroz čvrstu fazu [97], [123]. Fluidizacija je teška i neuniformna [124] i zahteva velike količine gasa [125]. Tipični predstavnici materijala iz grupe D su žitarice, grašak, kafa, ugalj za gasifikaciju i granulirane rude metala.

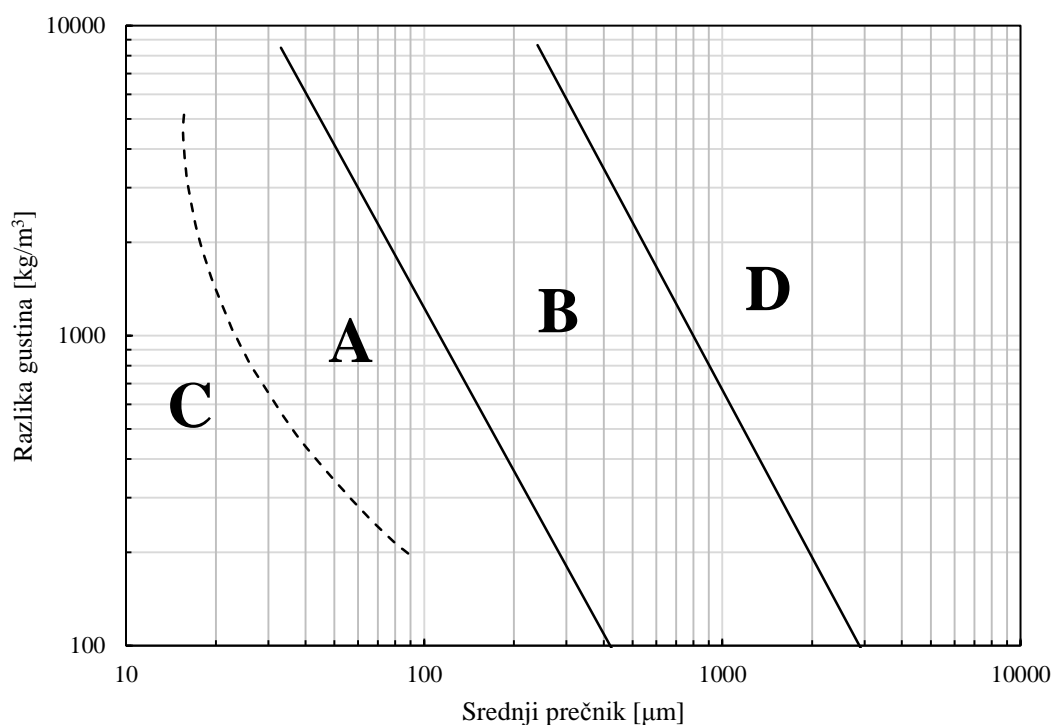
Još jedna od otežavajućih okolnosti, koja je upravo posledica neprecizno definisanih granica između grupa materijala, je ta da pritisak gasa može prouzrokovati promenu grupe materijala. Izloženi visokom pritisku materijali grupe B će se ponašati u skladu sa ponašanjem materijala grupe A [125]. Ova činjenica dovodi do značajnog usložnjavanja problema klasifikacije materijala za određeni režim pneumatskog transporta.

Geldart-ov dijagram je odoleo vremenu i još uvek se koristi za određivanje ponašanja sipkavih materijala pri fluidizaciji, ali je u [94] na osnovu eksperimenata sa određenim materijalima pokazano da Geldart-ova klasifikacija nije pouzdana pri proceni tipa pneumatskog transporta za materijale koji se nalaze u blizini granica na dijagramu.

Dixon je kasnije [126], [127], ispitujući ponašanje materijala u vertikalnim cevima, potvrdio izuzetnu važnost uticaja vrste materijala na režim pneumatskog transporta. Po ugledu na Geldart-ov dijagram [81], preuzevši ose i grupe materijala, formirao je sličnu klasifikaciju (slika 2.30) sa posebnim osvrtom na brzu karakterizaciju materijala u pogledu pogodnosti za određeni režim pneumatskog transporta.

Dixon-ova klasifikacija [126], [127], odnosno dijagram je kao i Geldart-ov podeljen na četiri oblasti (A, B, C, D), koje sačinjavaju materijali sličnih transportnih mogućnosti.

Za materijale u grupi A se smatra da imaju dobru sposobnost fluidizacije i identifikuju se transportom u vidu pokretnog sloja.



Slika 2.30 Dixon-ova klasifikacija sipkavih čvrstih materijala [94], [126], [127]

Materijali grupe B su hrapaviji i nisu skloni transportu u gustoj fazi u konvencionalnim sistemima.

Gruppu C čine kohezivni, fini materijali koje je teško fluidizovati, iako često dobro zadržavaju vazduh. Mogu se transportovati u ugušćenoj fazi, ali isto tako mogu biti problematični ako se dozvoli deaeracija.

Gruppu D čine krupniji materijali čiji se transport može odvijati u vidu čepa, pod uslovom da nemaju široku distribuciju veličina čestica.

Za razliku od Geldart-ove [81] i Dixon-ove [126], [127] klasifikacije, autori su u radovima [128], [129] prepoznali značaj faktora permeabilnosti i deaeracije (sposobnost sloja materijala da zadrži vazduh u prostoru između čestica u određenom vremenskom periodu). Na osnovu poznavanja ovih parametara pokušali su da predvide mogućnost ugušćenog pneumatskog transporta za određene vrste materijala. U radu [128] razvijena su dva dijagrama za klasifikaciju materijala, prvi koji uzima u obzir zavisnost permeabilnosti i jediničnog pada pritiska, a drugi zavisnost deaeracione konstante i jediničnog pada pritiska.

Istraživanja su pokazala da je Geldart-ova klasifikacija [81] suviše široka za procenu transportnih karakteristika materijala, kao i da je nekoliko materijala iz Geldart-ove [81] i Dixon-ove klasifikacije [126], [127] svrstano u pogrešnu kategoriju [129]. Izvedena je empirijska klasifikacija materijala prema sposobnosti za pneumatski transport u funkciji faktora deaeracije i permeabilnosti. Prema ovoj klasifikaciji [129], materijali sa niskom permeabilnošću i visokom sposobnošću da zadržavaju vazduh (mala deaeraciona konstanta) mogu biti transportovani u ugušćenoj fazi u vidu pokretnog sloja, materijalima visoke permeabilnosti i male sposobnosti da zadržavaju vazduh odgovara ugušćeni transport u vidu čepa, dok su svi ostali materijali ograničeni na transport u razređenoj fazi. Korišćenjem pomenute klasifikacije [129] ostvareni su dobri rezultati prilikom predviđanja mogućnosti transporta određenih materijala, a kao prednost ove klasifikacije u odnosu na ostale se navodi direktna veza interakcije materijal-vazduh sa određenim režimom pneumatskog transporta.

Koristeći aeracione karakteristike materijala (podatke o vremenu deaeracije i faktoru permeabilnosti) [130] došlo se do zaključaka da Geldart-ovim grupama C i D odgovara transport u ugušćenoj fazi u vidu čepa.

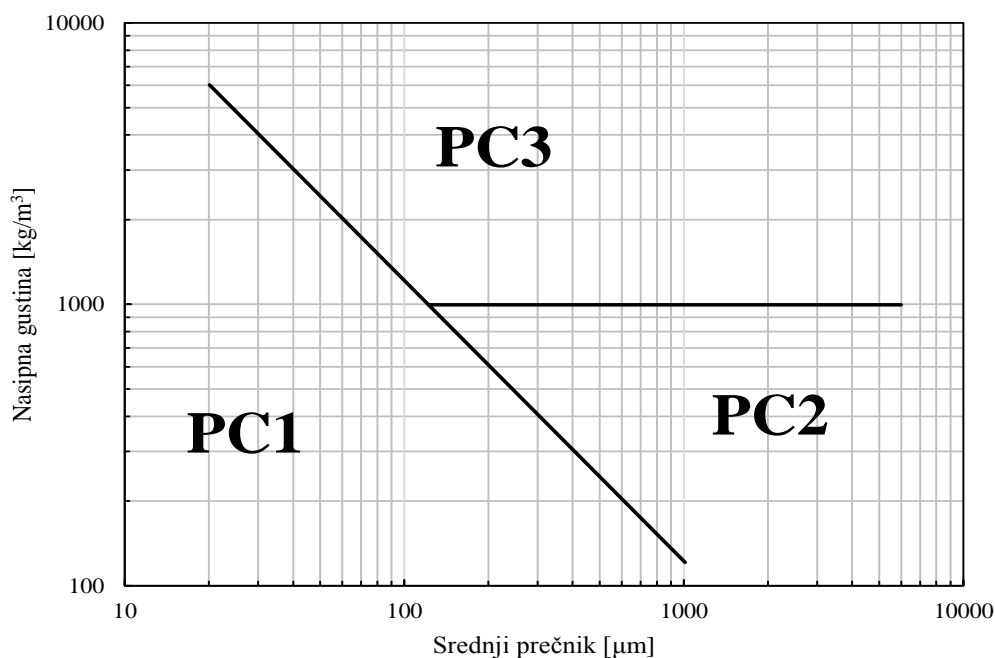
Međutim, problem kod primene klasifikacija zasnovanih na aeracionim karakteristikama [128], [129] je taj što su metode za određivanje faktora deaeracije nedovoljno precizno definisane u literaturnim izvorima, pa je upitna i uporedivost dobijenih rezultata. Zbog toga se ovaj parametar neće dalje razmatrati.

Sveobuhvatni pregled režima transporta u zavisnosti od karakteristika materijala prikazan je u [131], gde je utvrđeno da zamena fizičke gustine nasipnom gustinom u proračunima dovodi do neznatno boljih rezultata, a potvrđuje se i tvrdnja da je vrlo teško iskoristiti podatke o aeracionim karakteristikama koje su istraživali drugi autori.

Za razliku od komplikovanog i nedovoljno uniformnog određivanja faktora deaeracije, nasipna gustina i permeabilnost su dobro definisani.

Pan je [91], na osnovu baze podataka za preko 50 vrsta materijala, formirao uprošćeni dijagram (slika 2.31) za procenu sklonosti ispitivanog materijala za određeni režim pneumatskog transporta, samo na osnovu njegove nasipne gustine (u nasutom stanju) i srednjeg prečnika čestica materijala.

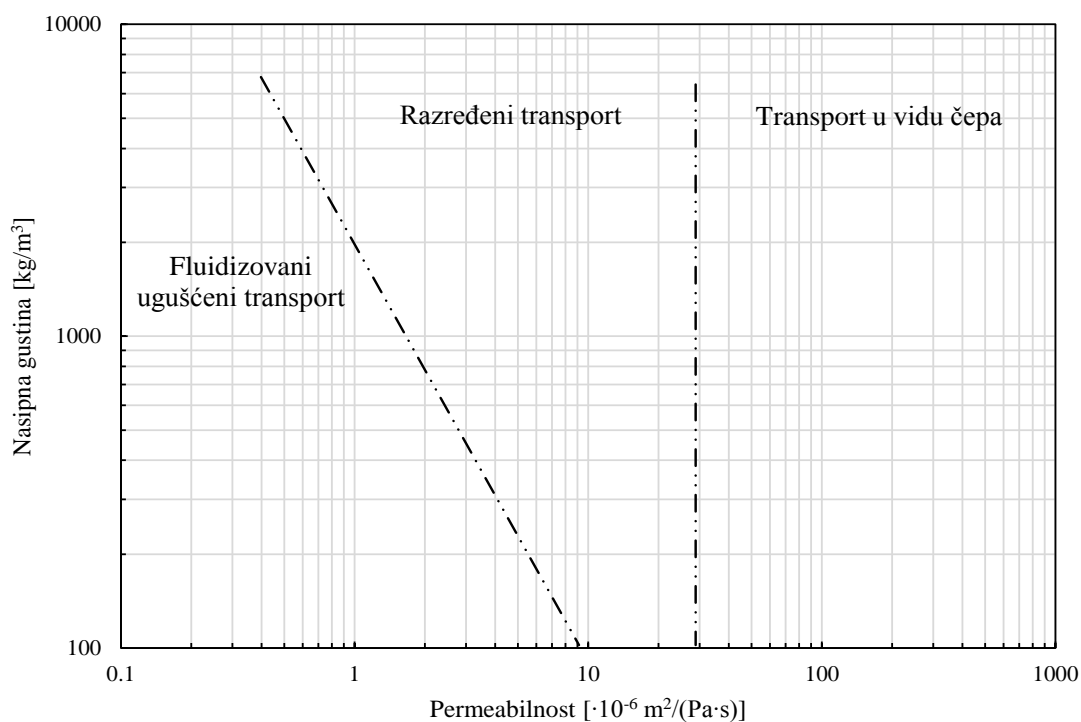
Dijagram je podeljen u tri grupe materijala PC1, PC2 i PC3, odnosno tri režima transporta. Materijali iz grupe PC1 su najpogodniji za transport u fluidizovanoj ugušćenoj fazi.



Slika 2.31 Pan-ova klasifikacija sipkavih čvrstih materijala [91]

Za materijale iz grupe PC2 preporučuje se transport u vidu čepa, dok se materijali iz grupe PC3 mogu transportovati samo u razređenoj fazi. Međutim, grupa autora [131] je zaključila da se za materijale iz grupe PC2 sa prečnikom manjim od 1000 μm ne može jasno sagledati mogući režim transporta, odnosno da materijalima koji se nalaze u prelaznoj oblasti između grupa odgovara isključivo razređeni transport.

Jones [131] je korelacijom faktora permeabilnosti i nasipne gustine materijala formirao dijagram (slika 2.32), gde su date smernice za odgovarajući režim transporta. Potencijalne granice su određene empirijski i podložne su korekcijama na osnovu podataka o različitim režimima transporta. Prednost ovog dijagrama je što koristi podatke o nasipnoj gustini, kao i postojanje preporuke za čisto razređeni transport, gde je granica između razređene faze i transporta u vidu čepa definisana oko vrednosti permeabilnosti $20 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/(\text{Pa}\cdot\text{s})$.



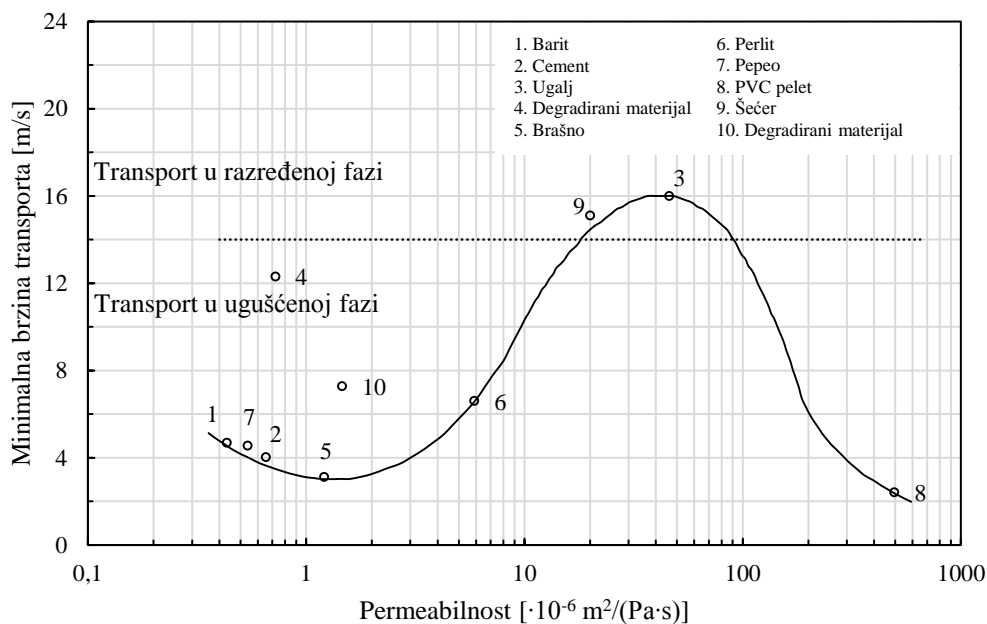
Slika 2.32 Režimi transporta prema Jones-u [131]

Minimalna brzina vazduha svedena na poprečni presek potrebna za transport materijala u formi čepa se prvi put pominje u [132]. Kao rezultat eksperimentalnih istraživanja [94], [133], gde su korelisane vrednosti minimalne brzine vazduha za transport i permeabilnosti za različite materijale u cilju dobijanja smernica za izbor adekvatnog režima transporta, proistekao je Mills-ov dijagram [94] (slika 2.33).

Posmatrajući režime pneumatskog transporta kroz revizione otvore na transportnom cevovodu i upoređujući ih sa dijagramom, utvrđeno je da postoje tri grupe materijala:

- materijali koje odlikuje loša permeabilnost (odnosno dobro zadržavanje vazduha) i koje je moguće transportovati u ugušćenoj fazi u vidu pokretnog sloja, od kojih je neke moguće transportovati i brzinama manjim od 5 m/s,
- grubi i hrapavi materijali (tipični predstavnik je polietilenski pelet), koji imaju veoma dobru permeabilnost, i koje je i moguće transportovati u ugušćenom režimu u vidu čepa pri malim brzinama,
- materijali koje ne odlikuje ni dobra permeabilnost ni dobro zadržavanje vazduha, čija je vrednost permeabilnosti u granicama približno $10 \cdot 10^{-6} - 120 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/(\text{Pa}\cdot\text{s})$,

nemaju prirodno svojstvo za transport u ugušćenoj fazi u konvencionalnim sistemima, već mogu biti transportovani isključivo u razređenoj fazi.



Slika 2.33 Mills-ov dijagram - uticaj permeabilnosti na režim transporta [94]

Dakle, materijali sa dobrom permeabilnošću ili sposobnošću da zadržavaju vazduh su pogodni za ugušćeni režim transporta u vidu čepa pri malim brzinama. Ukoliko materijal ne zadovoljava nijedan od kriterijuma, jedino je moguće transportovati ga u razređenoj fazi. Iako nije u potpunosti dokazano, zbog odstupanja nekih materijala, navodi se da je permeabilnost dominantan faktor koji određuje režime ugušćenog transporta (u vidu pokretnog sloja ili u vidu čepa). Takođe, došlo se i do zaključaka da se materijali koji lako degradiraju tokom transporta, koji imaju široku raspodelu veličine čestica i koji nemaju Gausovu raspodelu veličina čestica ne uklapaju dobro u Mills-ov dijagram, i smatraju se za izuzetno problematične kod izbora vrste pneumatskog transporta.

Veliki trud je uložen u brojna istraživanja uticaja karakteristika materijala na pogodnost za određeni režim transporta [81], [91], [126]–[129], [133], [134], međutim, niti jedna klasifikacija ne daje mogućnost uspostavljanja kritične veze protoka vazduha, protoka materijala i gradijenta pritiska. Još uvek nije jasno definisano kada za neke materijale

primeniti razređenu, a kada ugušćenu fazu, i nijedna klasifikacija ne može sa sigurnošću odrediti ponašanje materijala na granicama između kategorija [87].

Potpuno shvatanje uticaja karakteristika čestica kao što su veličina čestica, raspodela veličine čestica, oblik, gustina, doneće pravo rešenje problema pneumatskog transporta. Do tada, aeracione karakteristike materijala, na prvom mestu permeabilnost, u kombinaciji sa različitim klasifikacijama predstavljaju najbolja kratkoročna sredstva koja u nekoj meri mogu pomoći u izboru vrste pneumatskog transporta.

2.3.5 Pneumatski transport praškastih i abrazivnih materijala - habanje komponenata sistema

Suvi sipkavi materijali, praškasti i zrnasti, razvijaju veliki intenzitet sila trenja u kontaktu sa unutrašnjim zidovima cevi. Habanje cevovoda, kolena i armature je vrlo česta pojava, glavni uzrok problema pri transportu abrazivnih materijala i osnovni razlog zbog koga dolazi do pojave oštećenja instalacija i zastoja radi zamene oštećenih delova. To se naročito odnosi na materijale koji sadrže silicijum-dioksid ili aluminijum-oksidi, što je slučaj i kod letećeg pepela [135], [136]. Ovo ne bi predstavljalo problem da je životni vek komponenata moguće predvideti sa prihvatljivom tačnošću, odnosno da su eksploatacioni troškovi prihvatljivi sa ekonomske tačke gledišta.

Ključni parametri koji utiču na habanje su parametri procesa i svojstva materijala koji se transportuje. Uticaji procesa su režim transporta (ugušćena ili razređena faza), brzina strujanja gasa i brzina čestica, koncentracija čvrstih čestica, temperatura gasa i čestica, dužina transporta, materijal od koga su izgrađene prave deonice cevovoda i kolena, završna obrada površina cevovoda i kolena (koeficijent trenja), broj kolena (promena pravca), geometrija kolena i režim strujanja u kolenu.

Uticaj materijala na habanje potiče od dimenzija čestica, njihovog oblika, tvrdoće, elastičnosti, osipanja i degradacije. Habanje komponenata sistema pneumatskog transporta odvija se mehanizmima erozije i abrazije, ili najčešće kombinacijom oba dejstva [137]. Habanje pod uticajem abrazije nastaje klizanjem ili prevrtanjem sloja materijala pri niskim pritiscima i većim brzinama. Erozija nastaje udarom čestica nošenih strujom gasa u površinu, a najčešće se javlja u kolenima cevovoda uzastopnim udarima čestica koje se kreću velikim brzinama. Stepenn oštećenja zavisi od veličine

čestica iz dva razloga. Kod abrazije i erozije postoji pravilo da se sa smanjenjem veličine čestica smanjuje i oštećenje, iako ovo nije pravilo kada se radi o česticama većim od 100 μm . Sitnije čestice će se kretati bliže zidu cevi, pa će udari nastajati pod manjim uglovima i brzinama nego u slučaju krupnijih čestica.

Delovi cevovoda kao što su kolena, imaju bitnu ulogu u pneumatskim sistemima, cevovodima daju fleksibilnost i omogućuju postizanje željenog položaja i rasporeda. Uprkos njihovoj naizgled jednostavnosti, predstavljaju najveću nepoznanicu i najveći problem inženjerima održavanja u poređenju sa ostalim delovima sistema pneumatskog transporta [135], a pogrešan odabir značajno utiče na ukupan pad pritiska, degradaciju proizvoda, održavanje sistema usled habanja ukoliko se radi o abrazivnom materijalu.

Rezultati različitih istraživanja nisu konzistentni i ne odgovaraju iskustvima iz prakse, a u radu [138] razmatrani su problemi koji se javljaju u kolenima pri pneumatskom transportu, faktori koji ih uzrokuju, različite konstrukcije i preporuke za primenu. Bez obzira na tip transportnog sistema (potisnog ili usisnog) ili režima (ugušćena ili razređena faza), usled smanjenja pritiska ka odredištu, brzina gasa i čestica se proporcionalno povećava zbog čega kolena na kraju cevovoda trpe najveća oštećenja [138].

Razmatranjem mehanizama habanja u cevovodima pri pneumatskom transportu letećeg pepela [135], kao glavni faktori za ozbiljna oštećenja u kritičnim oblastima cevovoda označene su veće i grublje čestice i velika brzina transporta, gde se kao mera prevencije predlažu modifikacije površina cevi i smanjenje količine velikih čestica u sistemu.

2.3.6 Pneumatski transport na velike udaljenosti (Long distance conveying)

Dužina transporta je od izuzetnog značaja za rad sistema pneumatskog transporta. To se u [94] ilustruje primerom gde posmatrani sistem bez problema transportuje 100 t/h na razdaljinu od 100 m sa padom pritiska od 2 bara. Ukoliko se razdaljina poveća na 200 m, a ostali uslovi ostanu nepromenjeni (pritisak, protok materijala, prečnik cevi, protok vazduha, snaga) protok materijala će se smanjiti najmanje za 50%. Sa redukcijom protoka materijala bez promene protoka vazduha, nije moguće postići ugušćen transport zbog nedovoljne količine vazduha za uvećanu dužinu transporta.

U rešavanju problema pneumatskog transporta na velike udaljenosti napravljen je ogroman pomak i tome svedoče brojni uspešni projekti. Cevovodi sa postepenim povećanjem prečnika su nezamenljivi za sisteme velike dužine i velikim protokom materijala. Zato odabir adekvatnog modela pneumatskog transporta mora da prati i pravilan odabir kaskadne promene prečnika duž cevovoda (u određenim slučajevima je neophodno primeniti veći broj različitih prečnika [92]) u cilju ograničavanja porasta brzine strujanja čestica materijala i vazduha (zbog ekspanzije gasne faze) i kako bi se zadržao konstantan Frudov broj (odnos inercijalnih i gravitacionih sila) [92], ne samo zbog problema erozije i degradacije čestica, već i zbog minimizacije gubitka pritiska i bespotrebnog utroška energije [94]. Jedino ovakav pristup pruža mogućnost optimizovanja pneumatskog transporta na dužine i 3 - 4 km [139].

Optimizacija pneumatskog transporta velike dužine ujedno predstavlja i jedan od osnovnih problema ovih sistema. Potreba za kaskadnim povećanjem prečnika cevovoda može dovesti do nesrazmerno velikog povećanja prečnika pojedinih deonica, što ceo sistem i njegovo održavanje čini izuzetno skupim, kako zbog velikih i teških cevi, tako i zbog potrebe za velikim kranovima koji će ih pomerati prilikom održavanja [92].

2.3.6.1 Kolena i krivine u sistemima pneumatskog transporta na velike udaljenosti

Korišćenje kolena i krivina u sistemima pneumatskog transporta je neizbežno, jer ne postoje mogućnosti za sprovođenje idealno horizontalnog ili vertikalnog cevovoda, koji će ujedno biti i dugačak [92]. Kolena i krivine uvode dodatni režim strujanja, koji dalje uzrokuje složene interakcije gasa, čestica i zida cevovoda. Zbog toga je ovaj problem dosta izučavan [138], a razne konstrukcije su primenjivane u sistemima pneumatskog transporta sa težnjom da se smanji erozija cevovoda, atricija čestica i pad pritiska [92].

Kod sistema pneumatskog transporta male dužine, ukupni gubici u cevovodu mogu zavisiti od svega nekoliko krivina. Sa druge strane, kod pneumatskog transporta velike dužine ovi gubici često nemaju značajnijeg uticaja i mogu biti zanemareni [92].

Idealan sistem pneumatskog transporta bi bio onaj koji ne bi sadržao nijednu krivinu. Međutim, zbog krajnje nepraktičnosti takve konfiguracije, potreba za rešavanjem problema kolena u sistemima pneumatskog transporta uvek će biti aktuelna [92].

2.3.7 Određivanje pada pritiska

Jedan od osnovnih parametara za definisanje pneumatskog transporta je ukupni pad pritiska u sistemu, a njegovo precizno određivanje naročito je kritično kod transporta velikog kapaciteta i na velike udaljenosti.

Često korišćena metoda za određivanje pada pritiska je pomoću korelacija za koeficijent trenja u modifikovanoj Darsi-Vajsbahovoj jednačini:

$$\Delta p_f = \frac{f_m \cdot \rho_g \cdot L \cdot u_g^2}{2D}, \quad (2.4)$$

gde su:

- Δp_f , ukupni pad pritiska usled trenja za strujanje čvrste i gasne faze, (Pa),
 - f_m , koeficijent trenja za strujanje mešavine, ili kombinacija koeficijenata trenja za strujanje čvrste faze i gasne faze, (-),
- L , dužina cevovoda na kome se posmatra pad pritiska, (m),
 - u_g , brzina strujanja gasne faze, (m/s),
 - D , prečnik cevi, (m).

U proteklih nekoliko decenija razvijen je veliki broj različitih korelacija i za proračun pada pritiska dvofazne mešavine pri pneumatskom transportu [140]–[158]. Većina ovih korelacija razvijena je koristeći dva osnovna statistička modela [159]. Model A podrazumeva sabiranje doprinosa čvrste i gasne faze u ukupnom koeficijentu trenja, dok se prema modelu B ukupan koeficijent trenja dobija množenjem koeficijenta trenja za strujanje gasne faze različitim konstantama ili funkcijama:

$$\text{Model A: } f_m = f_g + \alpha \cdot f_p, \quad (-), \quad \text{i} \quad (2.5)$$

$$\text{Model B: } f_m = f_g \cdot (\beta + \phi)^n, \quad (-). \quad (2.6)$$

gde su:

- $f_g, f_p, \alpha, \beta, \phi$ i n konstante ili funkcije promenljivih u strujanju čvrste i gasne faze.

Na osnovu 1450 eksperimentalnih podataka 14 različitih autora, u radu [159] je izvršena kritička ocena najčešće korišćenih korelacija (tabela 2.10), koje su sa preporučenim vrednostima parametara prikazane u [160] i [161]. Sve korelacije (osim korelacije iz [151]) su date u bezdimenzionom obliku i formirane tako da odgovaraju Darsijevom izrazu za pad pritiska:

$$f_m = \frac{\Delta p_f / \Delta L}{\rho_g u_g^2 / 2D}, \quad (2.7)$$

Pri formiranju izraza za analizu u [159] su korišćene sledeće veličine:

- d_p , prečnik čestica čvrste faze, (m),
 - m^* , odnos masenog protoka čvrste faze i masenog protoka gasne faze, (-),
- ρ_p , stvarna gustina čvrste faze, (kg/m^3),
- u_p , brzina strujanja čvrste faze, (m/s),
 - Re, Rejnoldsov broj $Re = \rho_g u_g D / \mu_g$, (-),
 - Fr, Frudov broj $Fr = u_g / \sqrt{gD}$, (-),
- f_m , koeficijent trenja za strujanje mešavine $f_m = f_g + f_p$, (-),
- f_g , koeficijent trenja za gasnu fazu, (-),
- f_p , koeficijent trenja za čvrstu fazu, (-).

Veliki broj korelacija iz tabele 2.10 nije jednostavno primeniti zbog parametara koje je teško izmeriti i odrediti, a dodatni problem predstavlja i to što je mali broj autora dao naznaku tačnosti ili ograničenja korelacija, u pogledu masenog odnosa čvrste i gasne faze, veličine čestica i prečnika transportnog cevovoda [159]. Pored toga, brojne korelacije, među kojima su i one date u radovima [145], [146], [148], [149], odbačene su iz analize [159] upravo zbog teške primene na postojeće podatke:

- zahtevaju poznavanje parametara strujanja koje nije moguće utvrditi,
- odnose se na specifični režim strujanja (ugušćeni, razređeni, horizontalni, vertikalni) i važe samo u tim uslovima, i
- prateći parametri i uslovi su predstavljeni grafički i nije ih moguće lako interpretirati.

Tabela 2.10 Korelacije analizirane u radu [159]

Autor	Korelacija	Napomena
Barth [142]	$f_m = f_g + 0,005 \cdot m^* \frac{1 - \frac{1}{Fr}}{1 + 0,00125 \cdot Fr^2}, (-)$	Fr_0^2 , Frudov broj za brzinu taloženja čestica, (-)
Belden & Kassel [158]	$f_m = (1 + m^*) \left[0,049 + 0,22 \frac{m^*}{(1 + m^*)} \right] Re^{-0,2}, (-)$	
Dogin & Lebedev [150]	$f_m = f_g + A \left(\frac{d_p}{D} \right)^{0,1} Re^{0,4} Fr^{-0,5} \frac{\rho_p}{\rho_g} m^*, (-)$	A, konstanta koja zavisi od hrapavosti cevovoda i kreće se u granicama od 10^{-6} do $2 \cdot 10^{-6}$ [160]
Hinkle [157]	$f_m = f_g + m^* \cdot \left(\frac{u_p}{u_g} \right)^2 \cdot f_{mix}, (-)$	f_{mix} , koeficijent koji zavisi od karakteristika čvrste i gasne faze, (-)
Hitchcock & Jones [143]	$f_m = f_g + 0,003 \cdot m^{*0,9} \cdot Fr^{-0,5} \cdot \left(\frac{d_p}{D} \right)^{-0,9}, (-)$	
Konchesky [151]	$\frac{\Delta p_f}{\Delta L} = 0,00454 \cdot m_p^{0,688} \cdot \gamma^{0,410} \cdot \exp\left(\frac{7,833}{D}\right), (\text{in H}_2\text{O}/\text{ft})$	Δp_f , ukupni pad pritiska usled trenja za strujanje čvrste i gasne faze, (in H ₂ O), ΔL , dužina cevovoda, (ft), \dot{m}_p , maseni protok čvrste faze, (t/h), γ , relativna gustina čvrste faze, (-), D , prečnik cevi, (in).
Michaelides [144]	$f_m = f_g + 0,076 \frac{m^*}{\sqrt{Fr}}, (-)$	
Pfeffer [140]	$f_m = f_g \cdot (1 + m^*)^{0,3}, (-)$ $f_m = f_g \cdot (1 + 4 \cdot Re^{-0,32} \cdot m^*), (-)$ $f_m = 7,6 \cdot f_g \cdot m^{*0,45} \cdot Re^{-0,21}, (-)$	
Richardson & McLeman [156]	$f_m = f_g \left(1 + \frac{45000}{V_0 \cdot u_p^2} m_p \right), (-)$	V_0 , brzina taloženja čestica čvrste faze, (ft/s), u_p , brzina strujanja čvrste faze, (ft/s), m_p , maseni protok čvrste faze, (lb/s).
Rose & Barnacle [155]	$f_m = f_g + \frac{\pi}{2} m^* \left(\frac{\rho_p}{\rho_g} \right)^{0,5} \psi, (-)$	ψ , koeficijent u funkciji Rejnoldsovog broja, (-), koji je dat grafički u originalnom radu
Rose & Duckworth [154]	$f_m = f_g + \phi_1(m^*) \phi_2 \left(\frac{d_p}{D_g} \right) \phi_3(Fr) \phi_4 \left(\frac{\rho_p}{\rho_g} \right), (-)$	$\phi_i(x)$, funkcija promenljive x u zagradi, (-)
Shimizu [153]	$f_m = f_g (1 + 0,379 \cdot m^*), (-)$	

Rezultati istraživanja [159] pokazali su da izraz dat u [144] najbolje korelira ispitivane podatke. Izrazi iz [142] i [154] daju zadovoljavajuće rezultate za proračun pada pritiska, korelacija [140] podbacuje, a korelacija [151] nije primenljiva za prečnike manje od 50 mm. Za korelaciju iz [150] se navodi da konzistentno daje veće rezultate, iako adekvatno korelira podatke za ugljenu prašinu za $A = 2 \cdot 10^{-6}$ [160], [162], pokazuje dobro slaganje sa korelacijom datom u [163] za odnos masenih protoka čvrste i gasne faze 6 i odnos njihovih gustina 1000. Za primenu ostalih korelacija nema konkretnijih preporuka u [159].

Korelacija predstavljena u [149] (Izraz 2.8) je kasnije analizirana i uspešno primenjena u radu [164] za proračun ugušćenog pneumatskog transporta spraćenog uglja i letećeg pepela u horizontalnim i vertikalnim cevovodima.

$$\frac{P_{f1}}{P_{f2}} = \exp\left(\frac{\gamma \cdot m^* \cdot g \cdot L \cdot u_g}{R_g \cdot T_g \cdot u_p}\right), (-). \quad (2.8)$$

U radu [165] predstavljena je još nekolicina korelacija za koeficijent trenja [166]–[171]. U korelaciji prema [166] uspostavljena je veza između dve bezdimenzione grupe, modifikovani koeficijent trenja i modifikovani Rejnoldsov broj:

$$f_m = 0,117 \frac{1 - \varepsilon_p}{\varepsilon_p^2} \left[\frac{(1 - \varepsilon_p) u_g \text{Re}_T}{(g \cdot D)^2 \text{Re}_p} \right]^{-1,15}, (-). \quad (2.9)$$

Szikszaj [167] je predložio empirijski metod, koji vrlo podseća na metod predstavljen u [143], za određivanje koeficijenta trenja u funkciji Frudovog broja, odnosa masenog protoka čvrste faze i masenog protoka vazduha (\dot{m}_g), srednjeg prečnika čestica i prečnika cevi, pri čemu se koeficijenti x_i utvrđuju empirijski:

$$f_m = \text{Fr}^{x_1} m^{*x_2} \left(\frac{d_p}{D} \right)^{x_3}, (-). \quad (2.10)$$

Poređenjem pneumatskog i hidrauličkog transporta u cevovodima, formulisan je matematički model [168], [169]:

$$\Delta p_f = \mu \cdot f_p \cdot \rho_g \cdot u_g^2 \frac{L}{D}, \text{ (Pa)}. \quad (2.11)$$

U izrazu (2.11) koeficijent trenja za strujanje čvrste faze se računa prema izrazu datom u [168], [169], pri čemu se vrednosti koeficijenata x_i utvrđuju empirijski i važe samo za jedan materijal, od čega i zavisi tačnost modela:

$$f_p = x_1 \cdot m^{*-0,3} \cdot Fr_g^{-x_2} \cdot Fr_p^{-0,25} \left(\frac{D}{d_p} \right)^{0,1}, \text{ (-)}. \quad (2.12)$$

Isti autor [168], [169] dao je i izraze za određivanje koeficijenata trenja usled strujanja gasne i čvrste faze, a vrednosti koeficijenata x_i koje figurišu se takođe utvrđuju empirijski i važe samo za jedan materijal:

$$f_g = \frac{0,4}{\sqrt[4]{Re}} \frac{1}{1+m^{*2}}, \text{ (-)}, \text{ i} \quad (2.13)$$

$$f_p = x_1 \cdot m^{*2} \cdot Fr^{x_3}, \text{ (-)}. \quad (2.14)$$

Na osnovu razmatranja brojnih parametara, za koje je smatrano da su promenljive od bitnog uticaja na pad pritiska u pravim deonicama cevi i dimenzione analize dat je poluempirijski model [170]:

$$f_p = x_1 m^{*x_2} \cdot Fr_m^{x_3} \cdot \rho_{gm}^{x_4}, \text{ (-)}. \quad (2.15)$$

Vrednosti koeficijenata x_i utvrđuju na osnovu eksperimentalnih podataka duž prave deonice cevi konstantnog prečnika, tako da suma kvadrata grešaka pritisaka bude minimalna.

U radu [171] se navodi da je jedan od najčešćih modela za proračun pada pritiska usled strujanja čvrste faze:

$$\Delta p_f = 2 \cdot f_p \cdot \rho_p (1 - \varepsilon_p) \cdot u_p^2 \frac{\Delta L}{D}, \text{ (Pa)}, \quad (2.16)$$

pri čemu f_p može biti:

$$f_p = 0,003, \text{ prema [172]}, \quad (2.17)$$

$$f_p = 0,46 \cdot u_p^{-1}, \text{ prema [173]}, \quad (2.18)$$

$$f_p = 0,46 \cdot u_p^{-1}, \text{ prema [174]}, \quad (2.19)$$

$$f_p = 0,285 \sqrt{g \cdot D} \cdot u_p^{-1}, \text{ [175]} \quad (2.20)$$

Isti autor je u istraživanju teorije iz [166] dao sledeći izraz za proračun pada pritiska u horizontalnim sistemima pneumatskog transporta, koji zavisi od Blazijusovog koeficijent trenja za strujanje gasa (f_B) (izraz 2.22):

$$\frac{\Delta p_f}{L} = \left(\frac{\Delta p_g}{L} \right) x_1 \cdot m^* \cdot \frac{g \cdot D}{u_g} f_B, \text{ (Pa/m)}, \quad (2.21)$$

$$f_B = \frac{0,316}{\text{Re}^{0,25}}, \text{ (-)}. \quad (2.22)$$

Većina korelacija analiziranih u [165] su nastale modifikacijom korelacija razmatranih u [159], a veliki broj kompleksnih parametara koji figurišu u izrazima je uslovio isti opšti zaključak - da su teško primenjive, iz istih, prethodno opisanih razloga.

Računski pristup pneumatskom transportu omogućio je konstantan napredak na ovom polju, ali problemi na koje se nailazi konstantno podsećaju da osnovni fizički parametri procesa moraju biti dublje shvaćeni, kako bi taj napredak imao smisla [92].

Modeli sa uslovno dobrim rezultatima, u granicama $\pm 30\%$, mogu dovesti do ozbiljnih problema u radu kao što su neadekvatan kapacitet i zagušenja cevovoda, što je opisano u [88] na primeru ispitivanja uzoraka letećeg pepela A1, A2 i B, prečnika čestica 5, 75 i

12 μm , fizičkih gustina 2540, 2500 i 2215 kg/m^3 , nasipnih gustina 670, 1175 i 955 kg/m^3 , koji spadaju u grupe C, A i C prema Geldart-u [81] odnosno C, B i C prema Dixon-u [126], [127]. U sistemu projektovanom za transport 45 t/h pepela A1 (prečnik 69/81 mm, dužina 945 m) proračunom je dobijena duplo veća količina potrebnog vazduha za transport pepela A2, dok je za transport pepela B u istom sistemu pokazana potreba za znatno nižim pritiskom u odnosu na A1. Ukazano je na nedostatak postojećih korelacija zasnovanih na niskim vrednostima gustine vazduha (uticaj na pad pritiska), ograničenost modela definisanjem veličine čestica materijala jednom vrednošću (neizvodljivo za leteći pepeo i slične materijale sa širokim opsegom veličina, 1 - 300 μm), kao i na to da većina modela odgovara čisto razređenom ili čisto ugušćenom transportu.

Kompleksnost problema (veliki prečnici cevi, trenje, oblik čestica, kolena, i dr.) i zahtevi za velikom preciznošću moraju uzeti u razmatranje i empirijske podatke, pa su uspostavljene procedure za projektovanje. Pre svega je potrebno odrediti karakteristike materijala (prečnik čestica, gustina, nasipna gustina, aeracione karakteristike), zatim ga klasifikovati prema [81], [126] radi definisanja režima transporta, koristiti standardizovane procedure i slične instalacije kao u [176], a kada nije moguće ispitati odgovarajuće prečnike i dužine, iskoristiti odgovarajuće procedure za prelazak sa pilot postrojenja na realne parametre [177], [178]. Korišćenje ovih procedura je pokazano na primerima u [177] i [179]. U radu [177] je na pilot postrojenju ispitan pad pritiska sa 38 uzoraka letećeg pepela u različitim uslovima, podaci su iskorišćeni u više izraza za pad pritiska, a rezultati su imali dobro slaganje. Prema ovim procedurama ispitane su različite konfiguracije cevovoda [179], izvršeno je istraživanje uticaja broja kolena na odvijanje transporta i poređenje padova pritiska u horizontalnim i vertikalnim deonicama cevovoda [180], kao određivanje pada pritiska za transport cementa velikog kapaciteta [181].

Horizontalni pneumatski transport u vidu čepa pri malim brzinama i bez uticaja kohezije je razmatran u radu [182] za šta je formirano adekvatno pilot postrojenje. Na osnovu eksperimentalnih rezultata i ravnoteže sila čepova u pokretu razvijen je poluempirijski model za određivanje ukupnog pada pritiska u cevovodu. U eksperimentalnim istraživanjima korišćene su 4 vrste materijala: plastični pelet ($d = 3,12 \text{ mm}$; $\rho_s = 865,1 \text{ kg}/\text{m}^3$; $\rho_b = 493,7 \text{ kg}/\text{m}^3$), plastični pelet ($d = 3,76 \text{ mm}$; $\rho_s = 834,1 \text{ kg}/\text{m}^3$;

$\rho_b = 458,0 \text{ kg/m}^3$), pšenica ($d = 3,47 \text{ mm}$; $\rho_s = 1449,0 \text{ kg/m}^3$; $\rho_b = 811,5 \text{ kg/m}^3$) i ječam ($d = 3,91 \text{ mm}$; $\rho_s = 1350 \text{ kg/m}^3$; $\rho_b = 727,7 \text{ kg/m}^3$). Utvrđeno je dobro slaganje rezultata sa eksperimentalnim podacima dobijenim na horizontalnim cevovodima prečnika 105 i 156 mm, dužine 96 i 52 m, a predstavljen je i metod za optimizaciju rada sistema zasnovan na minimalnoj potrošnji energije.

Nedostatak dovoljno jasnih, jednostavnih i pouzdanih procedura za adekvatan prelazak sa pilot postrojenja na realna, za proračun pada pritiska i za primenu na određeni vid transporta, podstakao je na obimna istraživanja u okviru rada [165]. Cilj je upravo bio definisanje jasnih procedura prelaska sa pilot postrojenja na realne uslove za projektovanje pneumatskog transporta, uzimajući u obzir kompletan cevovod sa dodatnom opremom. Istraživanja su obuhvatila veliki broj testova pneumatskog transporta za 5 različitih materijala i za 5 konfiguracija cevovoda. Mešavina čvrste i gasne faze smatrana je mešavinom sa određenim karakteristikama, a pad pritiska mešavine određivan je modifikovanom Darsi-Vajsbahovom jednačinom. Korišćena su dva modela za proračun pada pritiska, jedan za horizontalne i vertikalne prave deonice, a drugi za kolena, ventile i druge sekcije cevovoda. Dimenzionom analizom je formiran model za prelazak na realno postrojenje sa greškom $\pm 15\%$.

Numerička simulacija vertikalnog pneumatskog transporta gas-čvrsta faza opisana je u [183]. Korišćen je jednodimenzioni model, koji je definisan za uslove stacionarnog strujanja, čestice sfernog oblika, interakcije između čestica su zanemarene, i uvedena je pretpostavka o kretanju čvrste faza u vidu diskretnih čestica. Model ima konzervativan pristup promenljivim veličinama za gasnu fazu, dok se za rešavanje čvrste faze koristi metod Runge-Kuta četvrtog reda. Rezultati dobijeni proračunom su poređeni sa dostupnim eksperimentalnim podacima i rezultatima proračuna Ojler–Lagranžovim pristupom, gde su pokazali dobru preciznost kod vertikalnog transporta. Došlo se do zaključka da porast masenog protoka, prečnika čestica i fizičke gustine dovodi do porasta pada pritiska, a da se prelaz iz režima ugušćenog transporta u razređeni dešava u tački minimalnog pada pritiska.

2.3.8 Pneumatski transport letećeg pepela

Zanemarljiva ili nikakva komercijalna vrednost letećeg pepela kao robe uslovila je da se potpuno zapostavi oblast njegovog upravljanja. Nesaglediva produkcija letećeg pepela beleži konstantan rast, a uz potpuno različite fizičko-hemijske karakteristike širom sveta gotovo da zahteva posebnu industriju koja bi se bavila upravljanjem ovim materijalom [184]. Zbog toga je nužno uspostaviti efikasan sistem upravljanja letećim pepelom radi njegovog pouzdanog uklanjanja iz termoelektrana.

Pneumatski sistemi transporta su izrazito jednostavni i pogodni za transport letećeg pepela u termoelektranama, dajući fleksibilnost i prilagodljivost zahtevima i ograničenjima u postrojenju. Nekoliko studija slučajeva je opisano u [32], čak i primeri transporta 1000 - 2000 m, kako bi se pokazalo da postupak projektovanja sistema za transport finog i grubog pepela nije jednoznačan i da ne postoje fiksni parametri, već neograničen broj kombinacija pritisaka vazduha i prečnika cevovoda koji zadovoljavaju tražene uslove. Kao ograničenja se navode dostupnost standardnih prečnika cevi i problem prilagođavanja visokih pritisaka, a preporučuje se pre svega analiza mogućih varijanti u pogledu kapitalnih i troškova eksploatacije i održavanja.

Stalna je nedoumica za koji režim pneumatskog transporta se opredeliti, razređeni ili ugušćeni, potisni ili vakuumski. Leteći pepeo sastavljen iz krupnih i hrapavih čestica može se transportovati samo u razređenoj fazi i pri velikim brzinama vazduha, dok finiji uglavnom može u ugušćenoj fazi pri znatno nižim brzinama, što opet zavisi od koncentracije pepela, mogućeg pada pritiska i dužine transporta. U poslednje vreme, u oblasti produkata sagorevanja uglja, beleži se konstantan porast zahteva za razređenim pneumatskim transportom [94], [95], [117], [185].

Jedino providni cevovod omogućuje utvrđivanje vida transporta, pa su najčešće merljivi parametri za razgraničenje ugušćene od razređene faze brzine vazduha i pad pritiska [94]. Međutim, česte su i tvrdnje operatera da sistem radi sa brzinama većim od 15 m/s i ukupnim padom pritiska manjim od 1 bar, što je apsurdno s ekonomske strane, jer se brzinama od 15 m/s bez problema može transportovati gvožđe u prahu, a leteći pepeo sa svojim karakteristikama kao što su permeabilnost i zadržavanje vazduha ne bi trebalo da predstavlja problem [184]. Velike brzine strujanja vazduha i čestica materijala uzrokuju bitan porast erozije [32], što je potvrđeno i u radu [96], gde su razmatrani slučajevi

potisnih i usisnih sistema pri različitim režimima strujanja. Kao kritičan parametar za projektovanje pneumatskog transporta u [32] se navodi minimalna ulazna brzina vazduha da bi se materijal priključio struji vazduha.

Brojni su pokušaji modeliranja pneumatskog transporta letećeg pepela i razvoja jedinstvenog koeficijenta trenja za ovu vrstu dvofaznog strujanja, zasnovani na rezultatima različitih eksperimentalnih istraživanja. Međutim, kao što je i ranije navedeno, nijedan leteći pepeo nije isti. Najsitnije razlike u fizičko-hemijskom sastavu mogu potpuno izmeniti njegovo ponašanje u toku strujanja, a time dodatno zakomplikovati proces modelovanja [92].

Česta pojava letećeg pepela sa bitnim razlikama u svojstvima u okviru istog postrojenja dovodi do problema u radu, što zahteva analizu ulaznih parametara za sve slučajeve. Dodatni problem su različite temperature pojedinačnih frakcija u okviru letećeg pepela što zahteva nove uslove i komplikuje proračun. Osim navedenih problema, abrazivnost pepela je još jedan u nizu parametara kome se mora posvetiti pažnja.

Projektovanje ovih sistema je apsolutno nejednoznačno, greške i problemi u svakodnevnom radu su redovna pojava, a česti zastoji dovode do potpune obustave rada termoelektrane i značajnih finansijskih gubitaka. Najčešći razlog problema se ogleda u projektovanju sistema za transport na osnovu iskustava sličnih sistema u eksploataciji, bez osvrta na ključne ulazne parametre i specifičnosti. To predstavlja poreklo osnovnog problema transporta letećeg pepela u realnim radnim uslovima. Neujednačeni kvalitet i sastav uglja daje letećem pepelu promenljive i potpuno nepredvidive fizičko-hemijske karakteristike i svojstva koja stvaraju ozbiljne probleme prilikom pneumatskog transporta. Kada se radi o značajnim, odgovornim i skupim sistemima, polazne osnove za definisanja, pravilan izbor i projektovanje sistema pneumatskog transporta moraju biti obimna istraživanja i detaljne analize svojstava letećeg pepela. Pored toga, sve se više pribegava određivanju njihovog eksploatacionog ponašanja primenom savremenih numeričko-eksperimentalnih metoda.

3 Materijali i metode

Razmatran je rad sistema pneumatskog transporta pepela velikog kapaciteta (maksimalni projektni kapacitet 120 t/h [186]) na bloku termoelektrane snage 620 MWe, u kojoj se kao gorivo koristi lignit Kolubara promenljivog kvaliteta [111], [187]. Pepeo iz procesa sagorevanja se izdvaja u elektrofiltrima i sakuplja u transportne posude, odakle se pneumatski transportuje u silose udaljene oko 600 m. Prilikom sagorevanja uglja lošijeg kvaliteta (niske toplotne moći i povišenog sadržaja pepela) količina pepela koju je potrebno transportovati biva znatno uvećana, uzrokujući taloženje pepela u cevovodima, zastoje i druge probleme u radu sistema pneumatskog transporta.

U cilju formiranja i verifikacije modela za analizu, optimizaciju i određivanje maksimalnog kapaciteta sistema pneumatskog transporta pepela, obavljena su sveobuhvatna eksperimentalna ispitivanja na realnom postrojenju posmatrane termoelektrane pri radnim uslovima. Praćena je promena pritiska duž dva paralelna cevovoda za transport pepela od transportnih posuda u zgradi elektrofiltra do silosa.

Pored eksperimentalnih ispitivanja na realnom postrojenju, obavljena su i laboratorijska ispitivanja velikog broja uzoraka pepela iz posmatranog procesa radi što preciznije karakterizacije i klasifikacije u pogledu izbora režima pneumatskog transporta i dalje upotrebe.

3.1 Laboratorijsko ispitivanje uzoraka pepela

Iz posmatrane termoelektrane je u periodu od 10 meseci, u više navrata, uzeto ukupno 64 uzorka pepela koji nastaje sagorevanjem lignita Kolubara, u cilju utvrđivanja fizičkih, hemijskih i aeracionih karakteristika.

Uzorci su uzimani na mestima izdvajanja iz kanala dimnih gasova, zagrejača vazduha, elektrofiltra, kao i mešavine pepela iz uređaja za pneumatski transport.

Obrada uzoraka je rađena u *Laboratoriji za procesnu tehniku* na Mašinskom fakultetu u Beogradu i u laboratoriji Fabrike cementa *Lafarge* u Beočinu.

3.1.1 Fizičko-hemijske karakteristike pepela

Ispitivanja fizičko-hemijskih karakteristika pepela obuhvatila su određivanje:

- granulometrijskog sastava (srednjeg prečnika pojedinih uzoraka) standardnom metodom prosejavanja na laboratorijskim sitima (slika 3.1) prema SRPS ISO 2591-1:1992 i SRPS ISO 3310-1:2018,
- nasipne gustine i nasipne gustine u zbijenom stanju prema SRPS EN ISO 787-11:2010 i ASTM D7481-18 (slika 3.2),
- stvarne (fizičke) gustine prema internoj Lafarge metodi, zasnovanoj na standardu SRPS B.C8.023,
- gubitka žarenjem prema SRPS EN 196-2,
- udela kvarca i amorfne faze XRD analizom, na uređaju za određivanje mineraloškog sastava *Bruker XRD D4 Endeavor*, i
- hemijskog (oksidnog) sastava XRF analizom, na uređaju za određivanje elementarnog sastava *Bruker WDXRF S8 Tiger*.



Slika 3.1 Aparatura za određivanje granulometrijskog sastava



Slika 3.2 Aparatura za određivanje nasipne gustine i nasipne gustine u zbijenom stanju

Poroznost u nasutom, odnosno zbijenom stanju je određena računski prema izrazu:

$$\varepsilon_0 = 1 - \frac{\rho_\varepsilon}{\rho_s}, (-) \quad (3.1)$$

gde su:

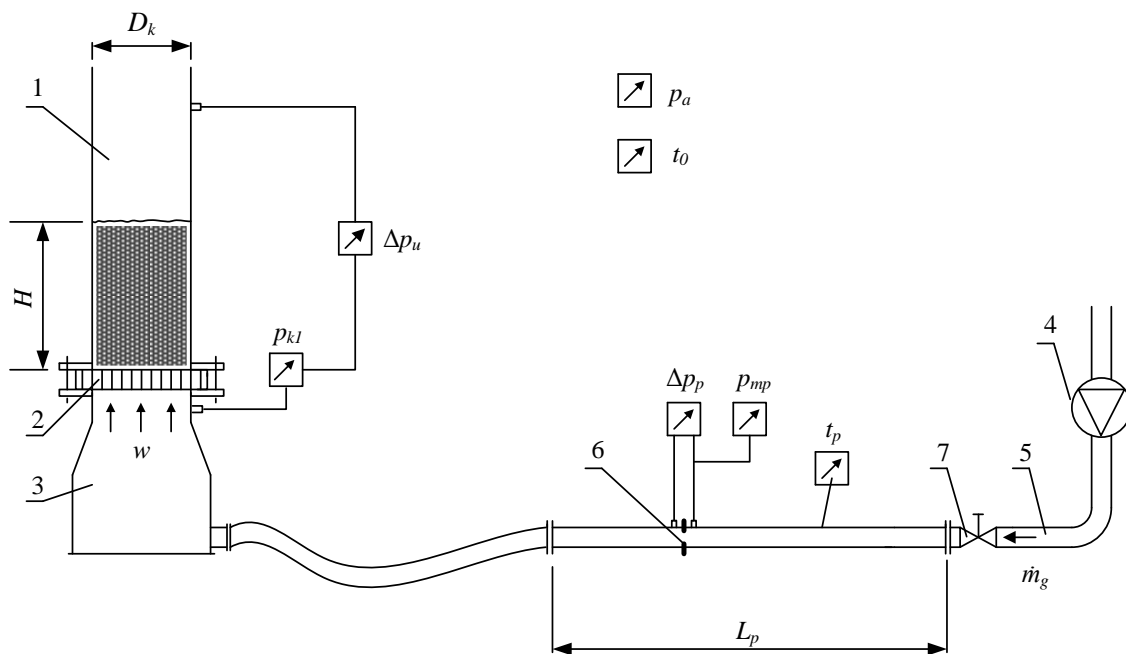
- ρ_ε , nasipna gustina pepela u nasutom (rastresitom) ili zbijenom stanju, (kg/m^3), i
- ρ_s , stvarna gustina pepela, (kg/m^3).

3.1.2 Aeracione karakteristike pepela

Ispitivanje aeracionih karakteristika uzoraka pepela obuhvatilo je određivanje kritične (minimalne) brzine fluidizacije, zavisnosti pada pritiska kroz sloj pepela od brzine fluidizacije i permeabilnosti.

3.1.2.1 Opis instalacije

Šematski prikaz instalacije korišćene za ispitivanje aeracionih karakteristika uzoraka pepela (kolone za fluidizaciju) dat je na slici 3.3.



Slika 3.3 Instalacija za ispitivanje fluidizacionih karakteristika pepela [111]

Osnovni elementi instalacije za ispitivanja aeracionih karakteristika pepela su:

1. kolona od pleksiglasa, prečnika $D_k = 142$ mm i visine $H_c = 1750$ mm,
2. porozna pregrada (postavljena na dnu kolone za fluidizaciju),
3. komora za umirenje struje vazduha,
4. rotaciona klipna duvaljka,
5. sistem cevi za dovod vazduha,
6. prigušnica (merna blenda) ($d_{mb} = 11,7$ mm) za određivanje protoka vazduha za fluidizaciju, postavljena u pravolinijskom delu cevovoda (prečnika $D_p = 52,3$ mm i dužine $L_p = 3$ m), i
7. odgovarajući ventili za regulaciju protoka vazduha.

Na instalaciji (slika 3.3) su u toku ispitivanja merene sledeće veličine:

- p_{kl} , natpritisak vazduha ispod porozne pregrade (U-cev sa vodom), (mm H₂O),
- Δp_u , ukupan pad pritiska kroz sloj i poroznu pregradu (U-cev sa vodom), (mm H₂O),
- H , visina sloja pepela u cevi (metar), (m)

- Δp_p , pad pritiska kroz prigušnicu (kosi manometar sa alkoholom, ugao nagiba između 10° i 40° u zavisnosti od protoka vazduha), (mm alkohola),
- p_{mp} , natpritisak vazduha ispred prigušnice (U-cev sa živom ili vodom, u zavisnosti od protoka vazduha), (mm Hg) ili (mm H₂O),
- p_a , atmosferski pritisak (barometar), (mbar),
- t_p , temperatura vazduha ispred prigušnice (termometar sa živom), ($^\circ\text{C}$), i
- t_0 , temperatura vazduha u prostoriji (termometar sa živom), ($^\circ\text{C}$).

U kolonu za fluidizaciju, sloj materijala (pepela) se postavlja na poroznu pregradu kroz koju se propušta vazduh. Postepeno povećavajući protok vazduha, mere se navedene veličine, pri čemu je posebno potrebno obratiti pažnju na porast visine nasutog sloja materijala i početak fluidizacije. Na osnovu podataka merenja određuje se:

- zavisnost jediničnog pada pritiska po visini sloja pepela ($\Delta p_s / H$),
- zavisnost ukupnog pada pritiska (Δp_s) kroz sloj pepela od brzine vazduha svedene na jedinicu površine poprečnog preseka cevi (w),
- permeabilnost (PE),
- i kritična (minimalna) brzina fluidizacije (w_I^*).

Za svaki uzorak pepela, ispitivanja su rađena prvo u smeru povećanja protoka vazduha, a zatim smeru smanjenja protoka vazduha kroz sloj.

3.1.2.2 Proračun aeracionih karakteristika pepela

Pre ispitivanja fluidizacionih karakteristika pepela određena je zavisnost pada pritiska pri strujanju vazduha kroz poroznu pregradu (Δp_F), od brzine strujanja vazduha (w). S obzirom na male brzine strujanja vazduha, zavisnost $\Delta p_F = f(w)$ smatrana je linearnom:

$$\Delta p_F = \xi_F \cdot w, \text{ (Pa)} \quad (3.2)$$

gde su:

- ξ_F , koeficijent otpora porozne pregrade, (Pa/(m/s)), i

- w , brzina strujanja vazduha svedena na jedinicu površinu porozne pregrade, (m/s) ili (cm/s).

Pad pritiska kroz poroznu pregradu (Δp_F), je određen za uslove kada kolona nije bila ispunjena pepelom, pa je:

$$\Delta p_F = \Delta p_u, \text{ (mm H}_2\text{O)} \quad (3.3)$$

Nakon određivanja svih potrebnih veličina, za uslove kada je kolona ispunjena slojem pepela, pad pritiska kroz sloj se dobija oduzimanjem pada pritiska kroz poroznu pregradu (Δp_F) od ukupnog pada pritiska kroz sloj pepela i poroznu pregradu (Δp_u):

$$\Delta p_s = \Delta p_u - \Delta p_F, \text{ (mm H}_2\text{O)} \quad (3.4)$$

Brzina strujanja vazduha (w), kojim se vrši fluidizacija, definisana je u odnosu na ceo poprečni presek cevi i zavisi od pritiska i temperature, a data je jednačinom:

$$w = \frac{\dot{m}_g}{\rho_g \cdot A}, \text{ (m/s) ili (cm/s)}, \quad (3.5)$$

gde je:

- \dot{m}_g , maseni protok vazduha kojim se vrši fluidizacija, (kg/s),
- A , površina poprečnog preseka kolone, (m²).

Brzina vazduha kojim se vrši fluidizacija, odnosno njegova gustina, određena je u funkciji srednje vrednosti pritiska u sloju:

$$\rho_f = \frac{P_{sr}}{R_g \cdot T_g}, \text{ (kg/m}^3\text{)}, \quad (3.6)$$

gde je:

- p_{sr} , srednja vrednost pritiska u sloju, (Pa).

Srednja vrednost pritiska u sloju određena je prema izrazu:

$$p_{sr} = \frac{1}{2}(p_1 + p_2), \text{ (Pa)}, \quad (3.7)$$

gde su:

- p_1 , pritisak na početku sloja dat jednačinom $p_1 = p_a + p_{k1} - \Delta p_F$, (Pa), i
- p_2 , pritisak na kraju sloja dat jednačinom $p_2 = p_a + p_{k1} - \Delta p_F - \Delta p_u$, (Pa).

Permeabilnost pepela određena je za uslove strujanja vazduha kroz sloj pepela pre dostizanja prve kritične brzine fluidizacije, prema izrazu:

$$PE = \frac{w}{\frac{\Delta p_s}{H_0}}, \text{ (m}^2\text{/(Pa}\cdot\text{s)) ili (m}^3\text{s/kg)}, \quad (3.8)$$

gde je:

- $\Delta p_s / H_0$, jedinični pad pritiska u području fluidizacije pri konstantnoj poroznosti, (Pa/m).

3.2 Modeli za proračun pada pritiska

Na osnovu pregleda literature izdvojene su 4 korelacije za proračun koeficijenta trenja, na osnovu kojih su formirana dva modela za proračun pada pritiska duž cevovoda za slučaj pneumatskog transporta letećeg pepela.

Prvi model je koncipiran tako da koristiti jednu od tri korelacije, empirijsku korelaciju Dogina i Lebedeva [150], Michaelidis-a [144] ili Shimizu-a [153], dok je drugi model je zasnovan na korelaciji Muschelknautz-a i Krambrock-a [149].

3.2.1 Model zasnovan na korelaciji za koeficijent trenja prema Doginu i Lebedevu, Michaelidis-u i Shimizu-u

Promena pritiska dp na rastojanju dx , za slučaj izotermnog strujanja dvofazne mešavine u cevovodu prečnika D , dužine L , čija se geodetska visina od ulaza do izlaza menja za dH , može se predstaviti izrazom [160]:

$$dp = -4f_m \frac{\rho_g u_g^2}{2} \frac{dx}{D} - d(\rho_m u^2) - \rho_m g dH, \text{ (Pa)}. \quad (3.9)$$

gde su:

- ρ_m , gustina mešavine, (kg/m³),
- H , geodezijska visina cevovoda, (m).

Prvi član na desnoj strani jednačine određuje pad pritiska usled trenja, drugi član određuje pad pritiska usled ubrzanja mešavine vazduha i čvrstih čestica, a treći član određuje pad pritiska usled promene geodezijske visine.

U pneumatskom transportu, pad pritiska usled ubrzanja je mali [188], stoga član koji u izrazu 3.9 određuje pad pritiska usled ubrzanja mešavine vazduha i čvrstih čestica nije razmatran. Njegov uticaj na ukupan pad pritiska je za nekoliko redova veličina manji od druga dva člana.

Gustina gasa se određuje iz jednačine stanja idealnog gasa:

$$\rho_g = \frac{P}{R_g \cdot T_g}, \text{ (kg/m}^3\text{)}, \quad (3.10)$$

gde je:

- p , pritisak u posmatranoj tački cevovoda, (Pa).

Temperatura gasa (vazduha) je ista kao temperatura mešavine, određena je na ulazu u cevovod i pretpostavljeno je izotermno strujanje duž cevovoda.

Gustina mešavine vazduha i pepela određuje se prema izrazu:

$$\rho_m = \alpha_p \rho_p + \alpha_g \rho_g, \text{ (kg/m}^3\text{)}, \quad (3.11)$$

gde su:

- α_p , zapreminski udeo pepela u dvofaznoj mešavini, (-), i
- α_g , zapreminski udeo gasa (vazduha) u dvofaznoj mešavini, (-).

Odnos masenog protoka pepela i masenog odnosa vazduha definisan je izrazom:

$$m^* = \frac{\alpha_p \rho_p u_p}{(1 - \alpha_p) \rho_g u_g}, \text{ (kg}_{\text{pepela}}/\text{kg}_{\text{vazduha}}\text{)}. \quad (3.12)$$

Zapreminski udeo pepela u dvofaznoj mešavini određen je iz jednačine (3.12), pod pretpostavkom jednakosti brzina strujanja vazduha i pepela $u_g = u_p$:

$$\alpha_p = \frac{1}{1 + \frac{1}{m^*} \frac{\rho_p}{\rho_g}}, \text{ (m}^3_{\text{pepela}}/\text{m}^3_{\text{mešavine}}\text{)}. \quad (3.13)$$

Zapreminski udeo vazduha u dvofaznoj mešavini se određuje prema izrazu:

$$\alpha_g = 1 - \alpha_p, \text{ (m}^3 \text{ vazduha/m}^3 \text{ mešavine),} \quad (3.14)$$

a brzina strujanja vazduha:

$$u_g = \frac{\dot{m}_g}{\alpha_g \frac{D^2 \pi}{4} \rho_g}, \text{ (m/s).} \quad (3.15)$$

Fanning-ov koeficijent trenja za mešavinu se određuje prema jednoj od korelacija:

Dogina i Lebedeva [150]:

$$f_m = f_g + A \left(\frac{d_p}{D} \right)^{0.1} \text{Re}^{0.4} \text{Fr}^{-0.5} \frac{\rho_p}{\rho_g} m^*, \text{ (-),} \quad (3.16)$$

gde je:

- A, konstanta koja zavisi od hrapavosti cevovoda i kreće se u granicama od 10^{-6} do $2 \cdot 10^{-6}$ [160],

Michaelidis-a [144]:

$$f_m = f_g + 0,076 \frac{m^*}{\sqrt{\text{Fr}}}, \text{ (-), ili} \quad (3.17)$$

Shimizu-a [153]:

$$f_m = f_g (1 + 0,379 \cdot m^*), \text{ (-).} \quad (3.18)$$

Koeficijent trenja u hrapavoj cevi za gasnu fazu se računa prema izrazu predstavljenom u [189]:

$$\frac{1}{\sqrt{f_G}} = -1,8 \log \left[\frac{6,9}{\text{Re}} + \left(\frac{K}{3,7D} \right)^{1,11} \right], (-). \quad (3.19)$$

Rejnoldsov broj je definisan kao:

$$\text{Re} = \frac{\rho_g u_g D}{\mu_g}, (-), \quad (3.20)$$

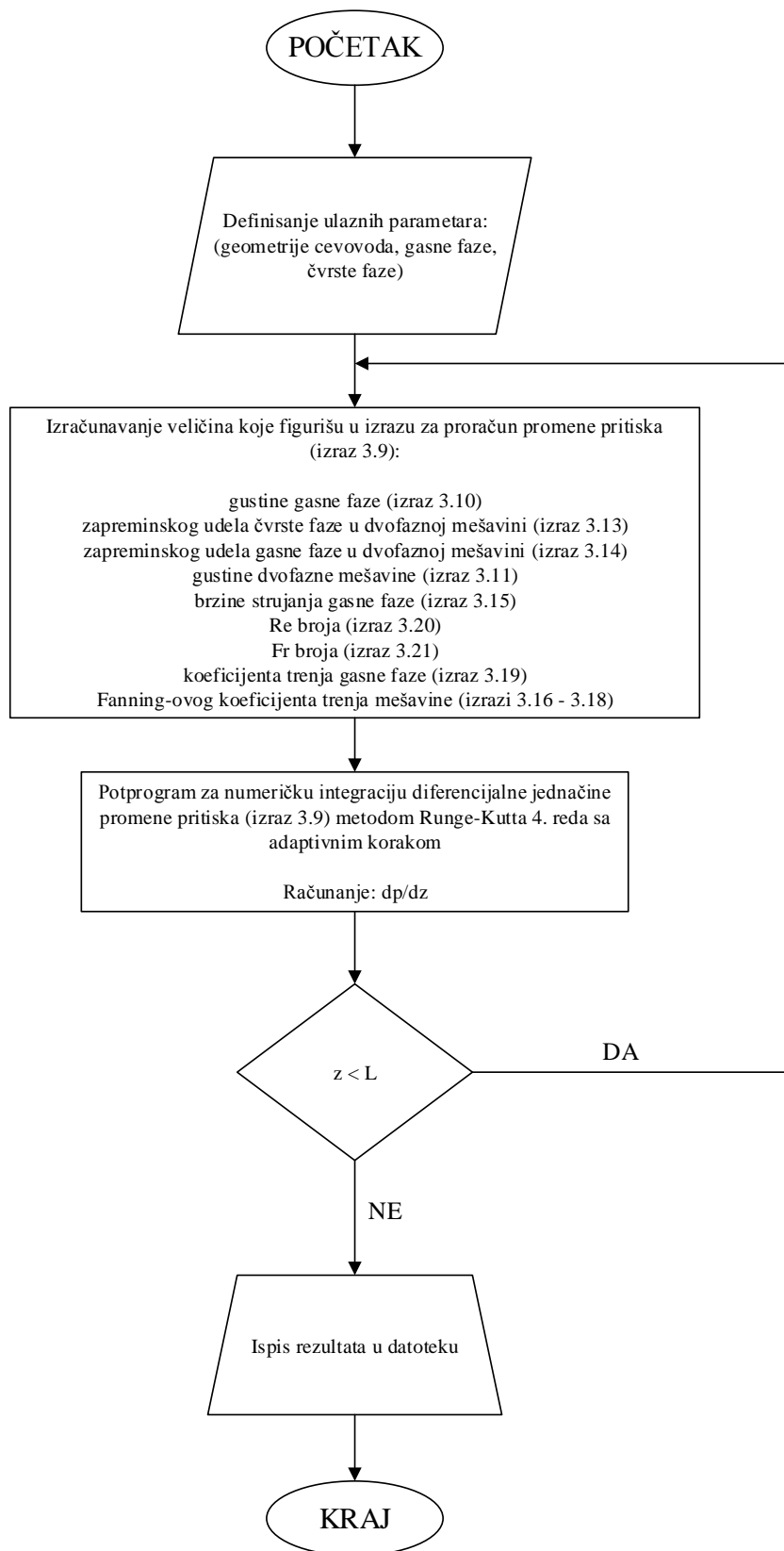
dok se Frudov broj se određuje prema izrazu:

$$\text{Fr} = \frac{u_g}{\sqrt{gD}}, (-). \quad (3.21)$$

Nakon formiranja modela, zasnovanih na osnovnim fizičkim zakonima koji važe u procesu pneumatskog transporta letećeg pepela, opisanih sistemima jednačina, formiran je programski kod za rešavanje problema u programskom jeziku FORTRAN, koji se odvija prema algoritmu prikazanom na slici 3.4.

Diferencijalna jednačina promene pritiska (3.9) rešena je, koristeći potprogram za numeričku integraciju metodom Runge-Kutta 4. reda sa adaptivnim korakom, za zadati početni pritisak, za svaku od deonica teleskopskog cevovoda (početni svake naredne deonice je izračunati pritisak na kraju prethodne deonice).

Pri proračunu, padovi pritiska na mestima promene prečnika cevovoda su zanemareni, s obzirom na njihovu malu vrednost u odnosu na pad pritiska usled trenja duž pravih deonica cevovoda [92].



Slika 3.4 Algoritam kompjuterskog programa za model zasnovan na korelacijama za koeficijent trenja prema Doginu i Lebedevu, Michaelidis-u i Shimizu-u

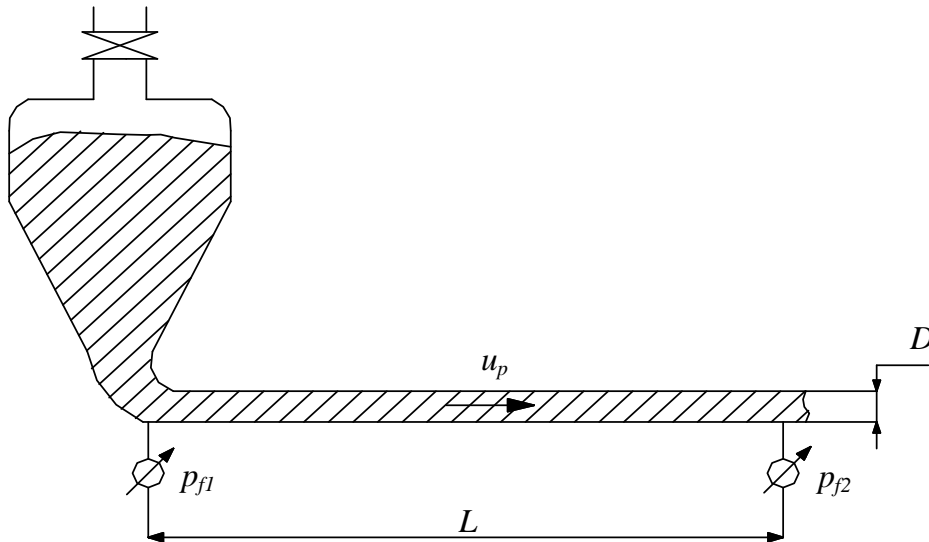
3.2.2 Model zasnovan na korelaciji Muschelknauz-a i Krambrock-a

Model je detaljno predstavljen u radu [164], gde je data metodologija proračuna. Primenljiv je na strujanje u slučajevima kada transportovani materijal ispunjava cevovod, kao što je prikazano na slici 3.5. Pad pritiska na deonici dužine L se određuje prema izrazu:

$$\frac{p_{f1}}{p_{f2}} = \exp\left(\frac{\gamma \cdot m^* \cdot g \cdot L \cdot u_g}{R_g \cdot T_g \cdot u_p}\right), (-), \quad (3.22)$$

gde su:

- p_{f1} , početni apsolutni pritisak u cevi, (Pa),
- p_{f2} , krajnji apsolutni pritisak u cevi, (Pa),
- γ , koeficijent materijala ($\gamma = 0,6$ [164]), (-),
- R_g , gasna konstanta, (J/(kg·K)),
- T_g , temperatura gasne faze (vazduha), (K), i



Slika 3.5 Transportni sistem gde je cevovod ispunjen materijalom [164]

Podaci sa realnih sistema koji rade u ugušćenom režimu transporta pokazuju da postoji veza između odnosa brzina u_p / u_g i bezdimenzionih parametara strujanja ($m^* \cdot \rho^*$) za $\zeta = 0,01$, $\zeta = 0,1$, $\zeta = 1$ i $\zeta = 10$ [164] (slika 3.6), gde se ρ^* određuje prema izrazu:

$$\rho^* = \frac{\rho_{g1} + \rho_{g2}}{2 \cdot \rho_{\varepsilon_0}}, \quad (3.23)$$

gde su:

- ρ_{f1} , početna vrednost gustine gasne faze, (kg/m^3),
- ρ_{f2} , krajnja vrednost gustine gasne faze, (kg/m^3),
- ρ_{ε_0} , nasipna gustina materijala koji se transportuje (pepela), (kg/m^3),

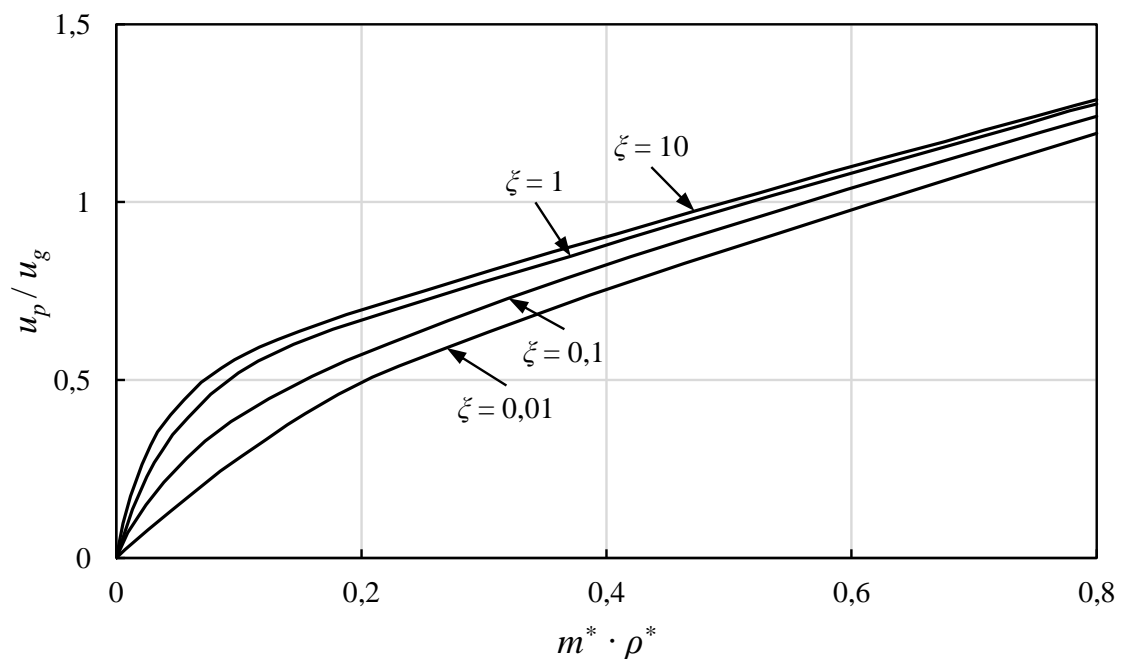
$$\xi = \frac{1,6 \cdot 10^{-3} \cdot \text{Fr}^5 \cdot \rho^*}{\text{Fr}_s}, \quad (3.24)$$

$$\text{Fr} = \frac{u_g}{\sqrt{g \cdot D}}, \text{ i} \quad (3.25)$$

$$\text{Fr}_s = \frac{u_\infty}{\sqrt{g \cdot D}}, \quad (3.26)$$

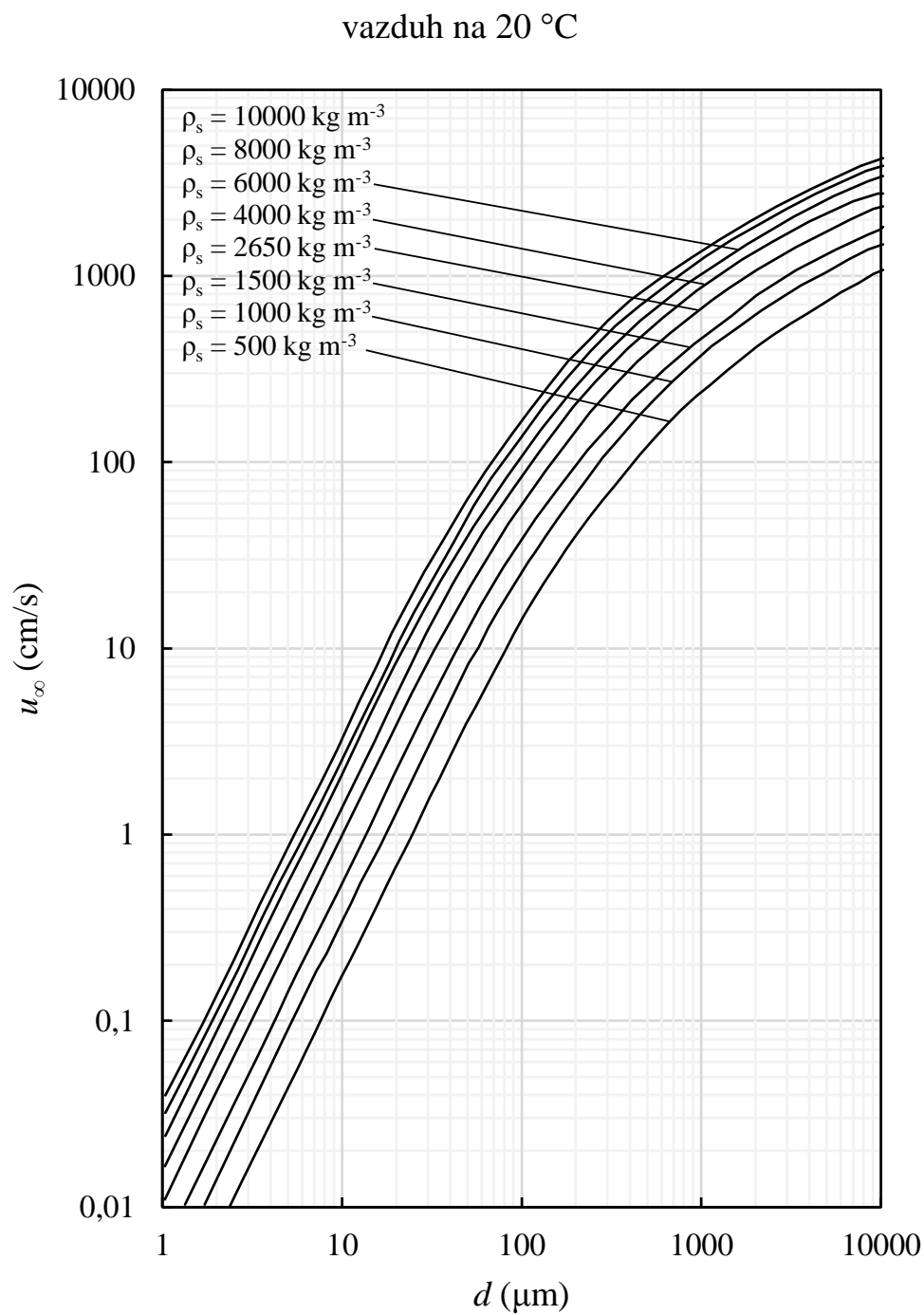
gde je:

- u_∞ , brzina taloženja čestica određena za ρ_{ε_0} , (m/s).



Slika 3.6 Veza između bezdimenzionih parametara pneumatskog transporta [149]

Na slici 3.7 data je veza brzine taloženja (u_{∞}) i veličine čestice prema korelacijama iz rada [190].



Slika 3.7 Veza brzine taloženja i veličine čestice [190]

Kao i u prethodnom slučaju, formiran je programski kod za rešavanje problema u programskom jeziku FORTRAN, koji se odvija prema sledećem algoritmu [164]:

1. Odrediti u_{∞} na osnovu dijagrama (slika 3.7).
2. Odrediti Fr i Fr_s koristeći izraze (3.25) i (3.26).
3. Koristeći jednačine (3.23) i (3.24), odrediti izraze za $(m^* \cdot \rho^*)$ i ζ u funkciji p_{f1} / p_{f2} .
4. Pretpostaviti odnos pritisaka p_{f1} / p_{f2} i izračunati $(m^* \cdot \rho^*)$ i ζ .
5. Odrediti odnos brzina u_p / u_g koristeći dijagram (slika 3.6).
6. Izračunati odnos pritisaka p_{f1} / p_{f2} koristeći izraz (3.22).
7. Uporediti izračunate i pretpostavljene vrednosti odnosa pritisaka p_{f1} / p_{f2} . Ponoviti korake 4 - 6 dok se ne postigne greška manja od 1%.
8. Na osnovu početnog pritiska koji je poznat i tačnog odnosa pritiska p_{f1} / p_{f2} , odrediti pritisak na kraju cevi, tj. ukupan pad pritiska.

3.3 Eksperimentalna ispitivanja pneumatskog transporta u cilju verifikacije modela za proračun pada pritiska

3.3.1 Prikaz sistema pneumatskog transporta pepela

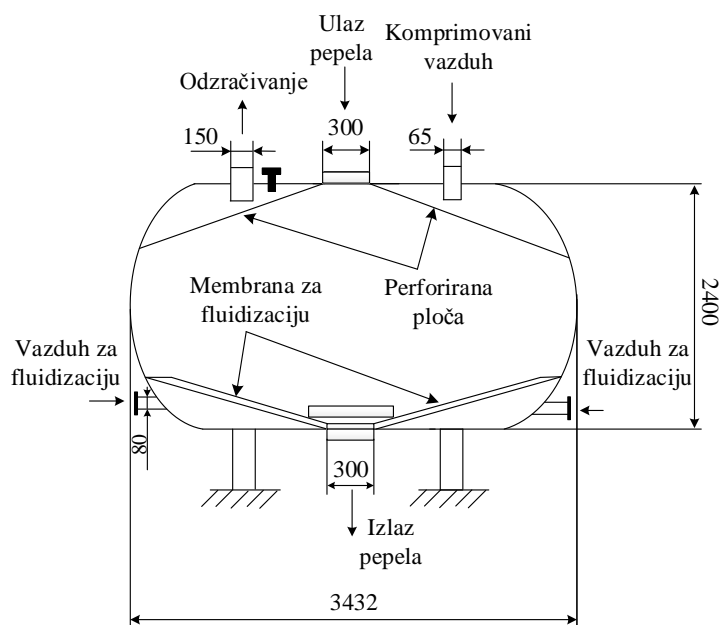
Pepeo izdvojen iz dimnih gasova u elektrofiltru, zajedno sa pepelom izdvojenim u kanalu dimnih gasova i zagrejaču vazduha, sakuplja se u 8 identičnih posuda pod pritiskom i transportuje pomoću dva paralelna cevovoda istih dimenzija, od postrojenja elektrofiltra do silosa.

Za jednu transportnu liniju predviđene su 4 posude, a sakupljeni pepeo istovremeno se prazni iz dve posude u cevovod, tako da se po jednom cevovodu naizmenično prazne po dve posude. Konstrukcija posude je prikazana na slici 3.8.

Dno posude prekriveno je poroznom pregradom za fluidizaciju, koja se sastoji od filtarskog materijala između perforiranih metalnih ploča. Porozna pregrada omogućuje ravnomernu distribuciju vazduha za fluidizaciju pepela radi efikasnijeg pražnjenja posuda. Gornji deo cilindrične posude prekriven je perforiranom pločom koja distribuira komprimovani vazduh u posudu u toku perioda kompresije i sprečava iznošenje pepela iz posude prilikom punjenja. Slobodna zapremina posude za skladištenje pepela je

12 m³. Na dnu posude ne postoji uređaj za kontrolisano pražnjenje, kao što je fluidizacioni konus ili konusni dozirni sistem [88], već se pražnjenje odvija slobodnim padom pepela u cevovod.

Prikaz jedne transportne linije sa dva para transportnih posuda od postrojenja elektrofiltra do silosa za prikupljanje pepela dat je na slici 3.9. Geometrija pojedinih deonica (dužina, prečnik, nagib) prikazanog cevovoda od izlaza iz posuda iza elektrofiltra do silosa data je u tabeli 3.1.

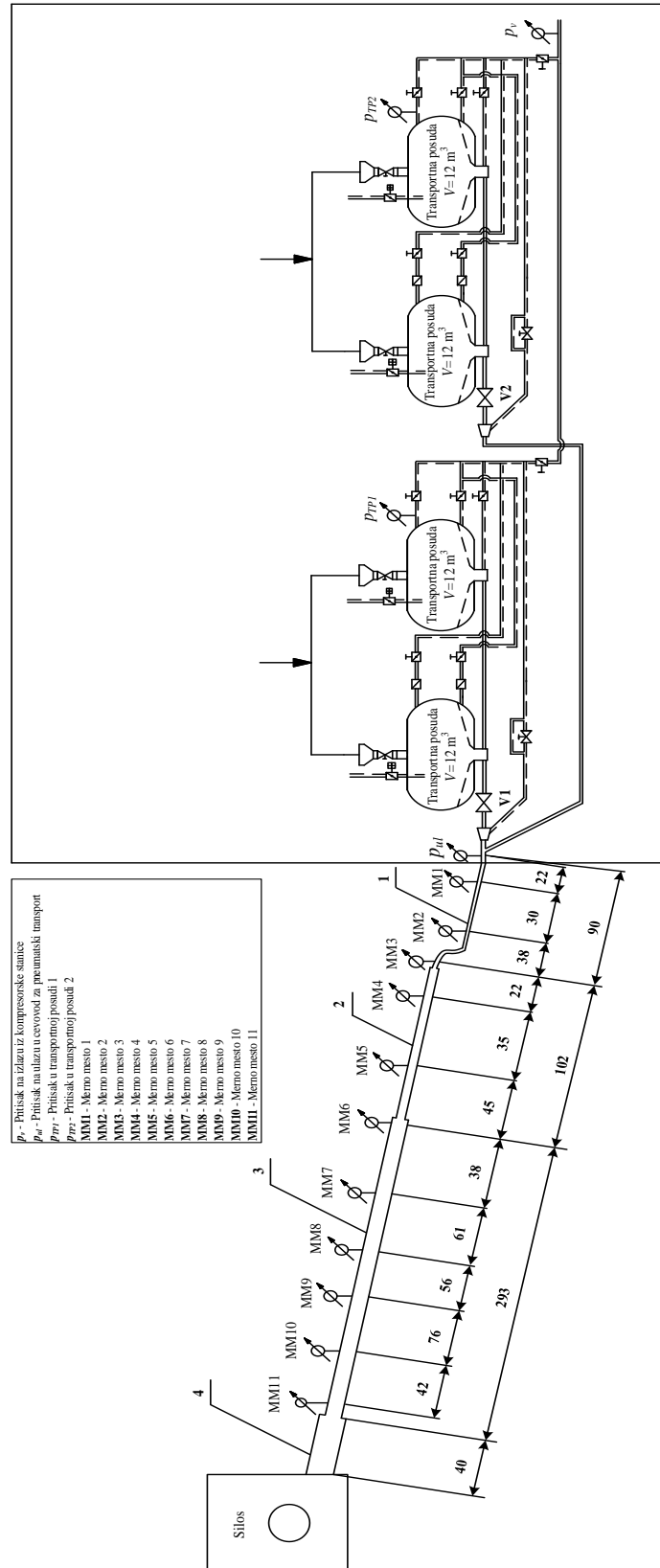


Slika 3.8 Posuda za pneumatski transport pepela [187] (dimenzije su date u mm)

Tabela 3.1 Geometrija cevovoda za pneumatski transport

Deonica	Dužina (m)	Unutrašnji prečnik (m)	Nagib prema horizontali (°)
1	90	0,2604	1,885
2	102	0,3097	2,163
3	293	0,3396	6,073
4	40	0,3888	1,469

Ukupna dužina cevovoda od izlaza iz posuda do silosa je 525 m. Ulazna deonica transportnog cevovoda, od posuda do izlaza iz zgrade, je dužine oko 40 m i prečnika 0,2604 m, i nalazi se pre deonice 1 (slika 3.9). Računajući i ovu deonicu ukupna dužina cevovoda je 565 m.



Slika 3.9 Cevovod za pneumatski transport pepela od elektrofitora do silosa [187]

Cevovodi za pneumatski transport (slika 3.9) su teleskopski, tako da se na mestima povećanja prečnika smanjuje brzina mešavine vazduha i pepela i sprečava prekomerni porast brzine usled smanjenja gustine vazduha pri opadanju pritiska duž trase cevovoda. Pepeo se transportuje u smeši sa komprimovanim vazduhom koji obezbeđuje kompresor kapaciteta 5505 m³/h (što odgovara masenom protoku vazduha od 6622 kg/h za gustinu vazduha 1,204 kg/m³ i pri pritisku od 101,325 kPa i temperaturi 293,15 K) sa maksimalnim natpritiskom od 3,5 bar. Komprimovani vazduh se uvodi u posude nakon njihovog punjenja iz elektrofiltra radi povećanja pritiska što omogućuje pražnjenje pepela u cevovod. Deo vazduha se dovodi u posude u cilju fluidizacije pepela, sprečavajući stvaranje naslaga na zidovima posuda i omogućavajući potpunije pražnjenje. Osnovni vazduh za transport pepela se uvodi na ulazu u cevovod pneumatskog transporta neposredno pre spoja sa posudama pod pritiskom. Dodatna količina vazduha se uvodi u cevovod nakon spoja sa obe posude radi sprečavanja zagušenja u vertikalnim deonicama cevovoda u okviru elektrofiltarske zgrade.

Proces pražnjenja počinje otvaranjem odgovarajućeg ventila V1 ili V2 (slika 3.9). Prilikom punjenja prvog para posuda ventil V1 je zatvoren, dok je ventil V2 otvoren i pepeo iz drugog para posuda se prazni. U sledećem ciklusu ventil V1 je otvoren i prvi par posuda se prazni, a ventil V2 je zatvoren dok se drugi par posuda puni pepelom.

3.3.2 Merna mesta u sistemu pneumatskog transporta

Ispitivanja su obuhvatila merenja promene pritiska duž cevovoda za pneumatski transport. Šema mernih mesta za jednu liniju teleskopskog cevovoda za pneumatski transport, sa lokacijama i rastojanjima između mernih mesta, data je na slici 3.9.

U cilju sagledavanja dinamike transporta pepela analizirana su postojeća pogonska merenja promene pritiska na izlazu iz kompresorske stanice (p_v , slika 3.9) u transportnim posudama za prikupljanje pepela i njegovo pražnjenje u transportni cevovod (p_{TP1} i p_{TP2} , slika 3.9) na ulazu u cevovod za pneumatski transport (p_{ul} , slika 3.9) u toku jednog ciklusa transporta.

Položaj prvog aktivnog mernog mesta, u slučaju cevovoda 1 je merno mesto MM1, udaljeno 22 m od izlaska cevovoda iz elektrofiltarske zgrade, dok je prvo aktivno merno mesto za cevovod 2 MM2 na rastojanju 52 m od elektrofiltarske zgrade (slika 3.9).

3.4 Statističke metode za obradu rezultata

U postupku verifikacije modela, rezultati dobijeni korišćenjem modela i rezultati eksperimentalnih merenja na realnom postrojenju podvrgnuti su metodama statističke analize. Primenjen je metod najmanjih kvadrata, gde je za svaki uređen skup od n parova $(x_i; y_i; za i = 1, 2, \dots, n)$ moguće definisati zavisnost oblika $y_i = f(x_i)$.

Ukoliko je veličina x_i tačna, a y_i slučajna veličina sa normalnom raspodelom, moguće je metodom najmanjih kvadrata odrediti funkcionalnu zavisnost oblika $y^c = f(x_i)$.

Kvalitet funkcionalne zavisnosti dobijene metodom najmanjih kvadrata ocenjen je koristeći statističke pokazatelje, korelacioni odnos i srednje kvadratno odstupanje [191].

Korelacioni odnos je određen prema izrazu:

$$\Theta = \sqrt{1 - \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - y_i^c)^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - y_{sr})^2}}, \quad (3.27)$$

a srednje kvadratno odstupanje prema izrazu:

$$\Delta_{sr} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n \left(\frac{y_i - y_i^c}{y_i} \right)^2}{n}}, \quad (3.28)$$

gde su:

- y_i , eksperimentalna vrednost zavisno promenljive,
- y_i^c , vrednost zavisno promenljive dobijena modelom,
- $y_{sr} = \frac{\sum_{i=1}^n y_i}{n}$, srednja vrednost zavisno promenljive y za n eksperimentalnih vrednosti, i
- n , broj uređenih parova.

4 Rezultati i diskusija

4.1 Uzorci pepela i uglja

Pregled uzoraka pepela obuhvaćenih laboratorijskim ispitivanjima dat je u Prilogu 1. Uzorci su obeleženi brojevima od 1 do 64, a prikazani su i odgovarajući podaci o mestu uzorkovanja i tehničkoj analizi uglja (lignita) koji je sagorevan u periodu uzorkovanja (donja toplotna moć, udeo vlage i udeo pepela).

U tabeli 4.1 dat je zbirni pregled ispitivanih uzoraka, gde se vidi da je bilo 29 uzoraka iz elektrofiltera, 10 iz kanala dimnih gasova, 4 iz zagrejača vazduha i 21 uzorak sa lokacija gde su se nalazili mešoviti uzorci.

Tabela 4.1 Pregled uzoraka pepela

Mesto uzorkovanja	Broj uzoraka	Oznaka uzorka
Elektrofilter	29	2-5, 19, 21, 23, 25-27, 29, 32, 34, 36, 39, 41, 42, 50-55, 58-61, 63, 64
Kanal dimnih gasova	10	1, 6-9, 14-17, 43
Zagrejač vazduha	4	10-13
Elektrofilter i kanal dimnih gasova	13	18, 20, 22, 24, 28, 30, 31, 33, 35, 37, 38, 40, 62
Elektrofilter i zagrejač vazduha	8	44-49, 56, 57

Izvod iz tehničke analize lignita predstavljen je u tabeli 4.2. Donja toplotna moć lignita se kretala u opsegu 5505 - 9355 kJ/kg sa prosečnom vrednošću 6940 kJ/kg, sa udelom vlage 46 - 52,2%, i udelom pepela 8,9 - 25,5%. Svi rezultati su u skladu sa tipičnim vrednostima za lignite.

Tabela 4.2 Izvod iz tehničke analize lignita koji je sagorevan u trenutku uzorkovanja

	Opseg	Srednja vrednost
Donja toplotna moć, H_d (kJ/kg)	5505 - 9355	6940
Vlaga, W (%)	46 - 52,2	48,6
Pepeo, A (%)	8,9 - 25,5	18,7

Za 12 uzoraka (2-13) koji su uzeti u periodu kada su se javljali problemi i zastoji u radu sistema za otpepljivanje, urađena su kompletna ispitivanja, uključujući određivanje

nasipne gustine, fizičke gustine, srednjeg prečnika čestica, poroznosti, hemijskog sastava i aeracionih karakteristika. Za 14 uzoraka (2 - 13, 58 - 59) određene su sve fizičko-hemijske, a za ukupno 17 uzoraka (1 - 13, 45 - 46, 50, 52) aeracione karakteristike. Za sve ostale uzorke određene su pojedine karakteristike, bitne s aspekta definisanja kvaliteta pepela za dalju upotrebu, odnosno za sagledavanje problema u sistemu pneumatskog transporta prisutnih kod postojećih rešenja u eksploataciji i mogućih optimizacija.

4.2 Fizičko-hemijske karakteristika pepela

Rezultati ispitivanja fizičkih i hemijskih karakteristika uzoraka pepela dati su u Prilogu 2. U tabeli P2.1 prikazane su vrednosti srednjeg prečnika, nasipne gustine, nasipne gustine u zbijenom stanju, fizičke gustine i poroznosti, dok tabela P2.2 u Prilogu 2 daje rezultate podatke o sadržaju kvarca i amorfne faze, kao i oksidni sastav pojedinih uzoraka. Kao što je prikazano u tabeli 4.3, gde su dati rezultati laboratorijskih ispitivanja fizičkih karakteristika uzoraka pepela u izvodu, srednji prečnik uzoraka pepela se kretao u oblasti 95 - 290 μm . Za 56% uzoraka bio je između 100 i 200 μm , a prosečna vrednost prečnika svih uzoraka bila je 183 μm . Nasipna gustina se kretala u oblasti između 559 i 1097 kg/m^3 , a za 56% uzoraka ta vrednost je bila u opsegu 600 - 700 kg/m^3 , dok se nasipna gustina u zbijenom stanju nakon protresanja od 60 sekundi u proseku povećavala za 16% (9 - 26%) i kretala se od 636 do 1242 kg/m^3 . Vrednosti fizičke gustine su bile u opsegu 1500 - 2490 kg/m^3 , a za 50% uzoraka je bila 1700 - 1900 kg/m^3 , uz prosečnu vrednost od 1871 kg/m^3 . Poroznost i poroznost u zbijenom stanju su bile 0,55 - 0,67, odnosno 0,49 - 0,61.

Tabela 4.3 Rezultati laboratorijskih ispitivanja fizičkih karakteristika uzoraka pepela

Ispitivana karakteristika	Opseg	Srednja vrednost
Srednji prečnik, (μm)	95 - 290	183
Nasipna gustina, (kg/m^3)	559 - 1097,2	711,5
Nasipna gustina u zbijenom stanju, (kg/m^3)	636,4 - 1242,6	838,1
Fizička gustina, (kg/m^3)	1500 - 2490	1871,7
Poroznost u nasutom (rastresitom) stanju, (-)	0,55 - 0,67	0,62
Poroznost u zbijenom stanju, (-)	0,49 - 0,61	0,55

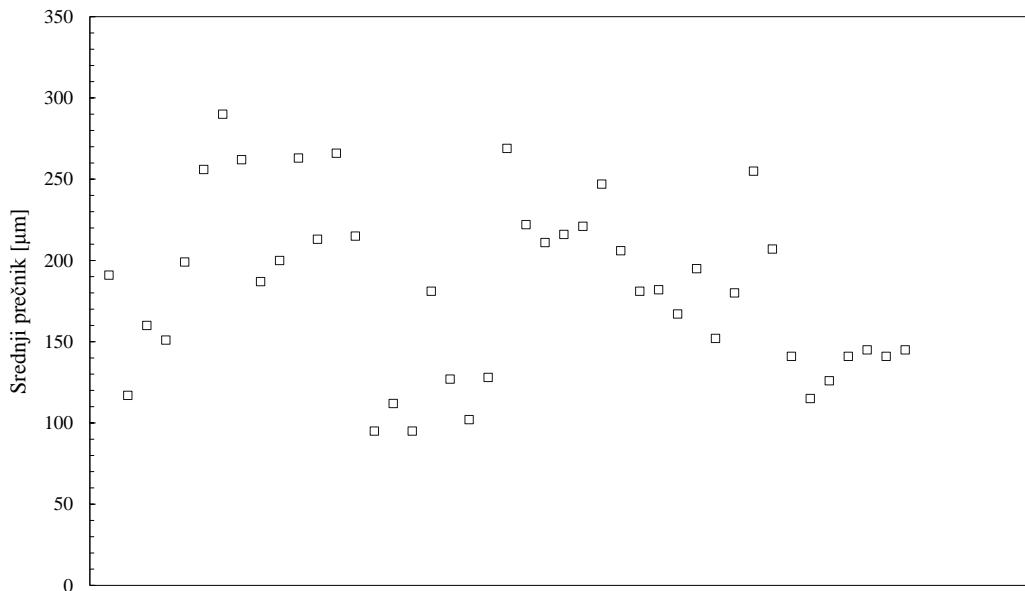
U tabeli 4.4 prikazan je izvod iz rezultata laboratorijskih ispitivanja hemijskih karakteristika uzoraka pepela. Izuzetno visok udeo SiO_2 , u opsegu 52,28 - 65,5%, najviše odgovara sastavu letećeg pepela iz Indije i Australije [38], [44]. Udeo Al_2O_3 bio je 18,57 - 26,88%, Fe_2O_3 4,59 - 6,54%, CaO 2,66 - 7,26% i MgO 1,3 - 2,55% za.

Tabela 4.4 Rezultati laboratorijskih ispitivanja hemijskih karakteristika uzoraka pepela

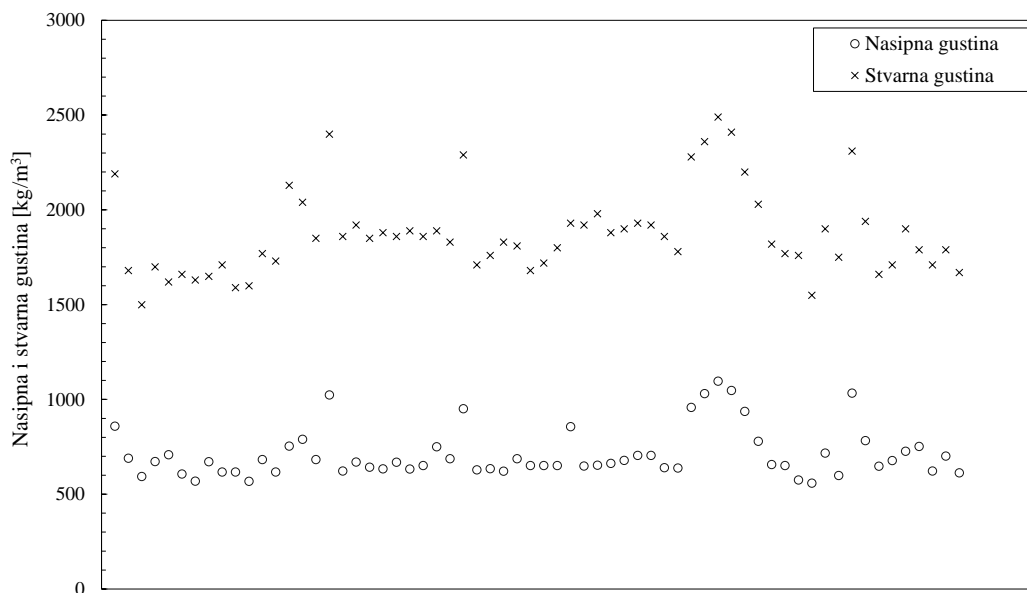
Ispitivana karakteristika	Opseg	Srednja vrednost
SiO_2 , (%)	52,28 - 65,50	58,62
Al_2O_3 , (%)	18,57 - 26,88	23,86
Fe_2O_3 , (%)	4,57 - 6,54	5,70
CaO , (%)	2,66 - 7,26	4,14
MgO , (%)	1,30 - 2,55	1,81
P_2O_5 , (%)	0,04 - 0,07	0,05
SO_3 , (%)	0,15 - 0,51	0,28
K_2O , (%)	1,15 - 1,56	1,40
Na_2O , (%)	0,07 - 0,276	0,162
TiO_2 , (%)	0,649 - 0,852	0,766
Cr_2O_3 , (%)	0,037 - 0,049	0,041
Mn_2O_3 , (%)	0,056 - 0,108	0,073
ZnO , (%)	0,00 - 0,01	0,006
SrO , (%)	0,019 - 0,041	0,026
Kvarc, (%)	10,39 - 72,72	28,25
Amorfna faza, (%)	17,80 - 71,67	48,87
GŽ, (%)	1,54 - 5,27	2,72

Podaci ranijih ispitivanja obavljenih za potrebe dimenzionisanja sistema pneumatskog transporta pepela koji se odnose na fizičko-hemijske karakteristike pepela dati u [83], a koji se odnose se uzorke pepela sa odgovarajućih lokacija u posmatranoj termoelektrani i koji potiču od iste vrste lignita, su u saglasnosti sa dobijenim vrednostima. Ukoliko se poredi udeo najzastupljenijih oksida SiO_2 , Al_2O_3 i Fe_2O_3 , razmatrani pepeo po sastavu najviše odgovara letećem pepelu iz Indije, Turske i Australije koji su obrađeni u [44], [60] i [38].

Na osnovu dobijenih podataka, utvrđena je izrazita heterogenost uzoraka pepela. Ogleda se u neujednačenosti i promenljivosti pepela u pogledu svih ispitivanih svojstava, na šta jasno ukazuju vrednosti srednjeg prečnika (slika 4.1) (koji se kreće u širokom opsegu čak i u okviru jednog uzorka), vrednosti nasipne i stvarne gustine (slika 4.2) i hemijski sastav. Takođe, vizuelno je utvrđena i neujednačenost u obliku čestica.



Slika 4.1 Vrednosti srednjeg prečnika za ispitivane uzorke



4.3 Aeracione karakteristika pepela

Osnovna ispitivanja aeracionih svojstava pepela sprovedena su u cilju analize rada postojećeg sistema pneumatskog transporta. Ispitivanja aeracionih karakteristika pepela obavljena su na uzorcima 1 - 13, 45, 46, 50, 52 koji potiču sa različitih lokacija u termoelektrani (iz sabirnika pepela dimnih gasova, iz sabirnika pepela zagrejača vazduha, iz sabirnika pepela elektrofiltra, kao i mešavine pepela iz sabirnika pepela dimnih gasova, sabirnika pepela zagrejača vazduha i sabirnika pepela elektrofiltra u odnosima koji su definisani za pneumatski transport). Za navedene uzorke određene su prve kritične (minimalne) brzine fluidizacije i vrednosti faktora permeabilnosti, za početnu visinu sloja materijala u koloni 25 cm [111].

Rezultati ispitivanja prikazani su u Prilogu 3, a karakteristični fluidizacioni dijagrami za ispitivane uzorke su predstavljeni u Prilogu 4. Izvod iz rezultata aeracionih ispitivanja uzoraka pepela dat je u tabeli 4.5. Minimalna brzina fluidizacije za ispitivane uzorke bila je u oblasti 1,37 - 3,85 cm/s, dok su se vrednosti permeabilnosti, određene za uslove strujanja vazduha kroz sloj pepela pre dostizanja prve kritične brzine fluidizacije, kretale u oblasti $(1,28 - 6,05) \cdot 10^{-5} \text{ m}^2/(\text{Pa} \cdot \text{s})$ [111].

Tabela 4.5 Rezultati aeracionih ispitivanja uzoraka pepela

	Opseg	Srednja vrednost
Minimalna brzina fluidizacije, (cm/s)	1,37 - 3,85	2,48
Permeabilnost neposredno pre dostizanja minimalne brzine fluidizacije, $(\text{m}^2/(\text{Pa} \cdot \text{s})) \cdot 10^6$	10,01 - 22,61	14,39

Vizuelno je praćena i pojava kad čestice počinju da napuštaju sloj, krećući se vertikalno naviše. Prema podacima merenja uočeno je da se ova pojava događa pri brzinama koje su 10 do 15 puta veće od minimalne brzine fluidizacije (16 - 32 cm/s [111]) i koje predstavljaju drugu brzinu fluidizacije.

Kao što je navedeno u poglavlju 4.2, ispitivani uzorci pepela su vrlo heterogeni po svim fizičko-hemijskim karakteristikama. Ova činjenica bitno utiče na ponašanje pepela prilikom fluidizacije, odnosno prilikom pneumatskog transporta, što ukazuje na važnost sprovođenja detaljnih ispitivanja aeracionih karakteristika radi definisanja uslova za odvijanje pneumatskog transporta.

Fluidizacija pepela pažljivo je praćena vizuelno, jer se obavljala u cevi od pleksiglasa (slika 4.3).



a



b



c



d

*Slika 4.3 Fluidizovanje heterogenog materijala
a, b i c - materijal je delimično fluidizovan,
d - materijal je potpuno fluidizovan.*

Kao posledica fluidizacije pepela nejednolike krupnoće i heterogenog fizičko-hemijskog sastava, pri fluidizaciji ispitivanih uzoraka uočene su različite pojave, kao što su [111]:

- tendencija ka formiranju kanala kroz sloj pepela pri prostrujavanju vazduha pri brzinama oko prve kritične brzine fluidizacije (w_f^*),
- raslojavanje čestica u sloju, odnosno raslojavanje pri početnoj visini sloja (slika 4.3.a i b),
- barbotiranje na vrhu sloja (slika 4.3.a),
- početak vertikalnog pneumatskog transporta, odnosno iznošenja najsitnijih čestica iz sloja (slika 4.3 c i d).

Bitno je naglasiti da minimalna brzina fluidizacije (w_f^*) nije jednoznačno određena, jer je početak vertikalnog pneumatskog transporta (iznošenje najsitnijih čestica iz sloja) uočen i pre dostizanja minimalne brzine fluidizacije (w_f^*) za kompletan uzorak (slika 4.3 c i d), upravo iz razloga velike heterogenosti materijala [111]. To za posledicu ima pojavu raslojavanja sa daljim porastom brzine vazduha, tj. formiranje sloja najsitnijih čestica na površini koje su dobro fluidizovane, dok u donjem delu sloja ostaju nataložene krupnije i teže čestice koje se pri tim brzinama još ne fluidizuju (slika 4.3 c) [111]. Heterogenost ispitivanog pepela dovela je i do formiranja potpuno nekarakterističnih fluidizacionih dijagrama (Prilog 4), sa kojih u većini slučajeva nije bilo moguće pravilno očitati minimalnu brzinu fluidizacije, već je utvrđivana neposrednim opažanjem.

Za vreme ispitivanja temperatura vazduha se zanemarljivo malo menjala. Prema tome, brzina fluidizacije bila je samo zavisna od pritiska i to obrnuto proporcionalno. Međutim, maksimalna vrednost pada pritiska kroz sloj za vreme merenja je bila oko 2 kPa, što znači da je maksimalna razlika brzina na dnu i vrhu sloja materijala oko 2%. Brzina fluidizacije određena je u odnosu na srednju vrednost pritiska u sloju (izraz 3.5), pri čemu je gustina vazduha u funkciji tog pritiska, pa maksimalno odstupanje stvarne brzine (svedene na ceo poprečni presek) od srednje iznosi $\pm 1\%$.

4.4 Karakterizacija i klasifikacija pepela za određeni režim pneumatskog transporta

4.4.1 Klasifikacija pepela

U poglavlju 2.2.2 dat je pregled klasifikacija pepela prema različitim autorima i kriterijumima. Za ispitivane uzorke, kao i za uzorke pepela iz [83], koji potiču od iste vrste uglja, izvršena je klasifikacija prema nekoliko kriterijuma bitnih s aspekta primene u mnogobrojnim industrijskim granama, pre svega cementnoj i građevinskoj.

Prema [29], sagorevanjem ugljeva višeg ranga nastaju pepeli klase F, koje karakteriše zbir udela oksida silicijuma, aluminijuma i gvožđa veći od 70% i pucolanska svojstva. Međutim, iako ispitivani uzorci pepela nastaju sagorevanjem ugljeva niskog ranga, hemijski sastav uzoraka pokazao je da svi uzorci zadovoljavaju posmatrani kriterijum i mogu se svrstati u grupu F prema [29]. Takođe, hemijski sastav uzoraka pepela iz [83] pokazuje saglasnost sa ispitivanim uzorcima. Za 91,7% uzoraka zbir udela posmatranih oksida je veći od 70%.

Kako bi se pepeo klasifikovao prema [30], potrebno je poznavati i podatke o udelima slobodnog CaO, kao i udela hlorida. Ispitivanja uzoraka u okviru ove disertacije to nisu obuhvatila, ali ako se u obzir uzmu rezultati iz [79], većina ispitivanih uzoraka se može svrstati u grupu A, a neznatan deo u grupu B.

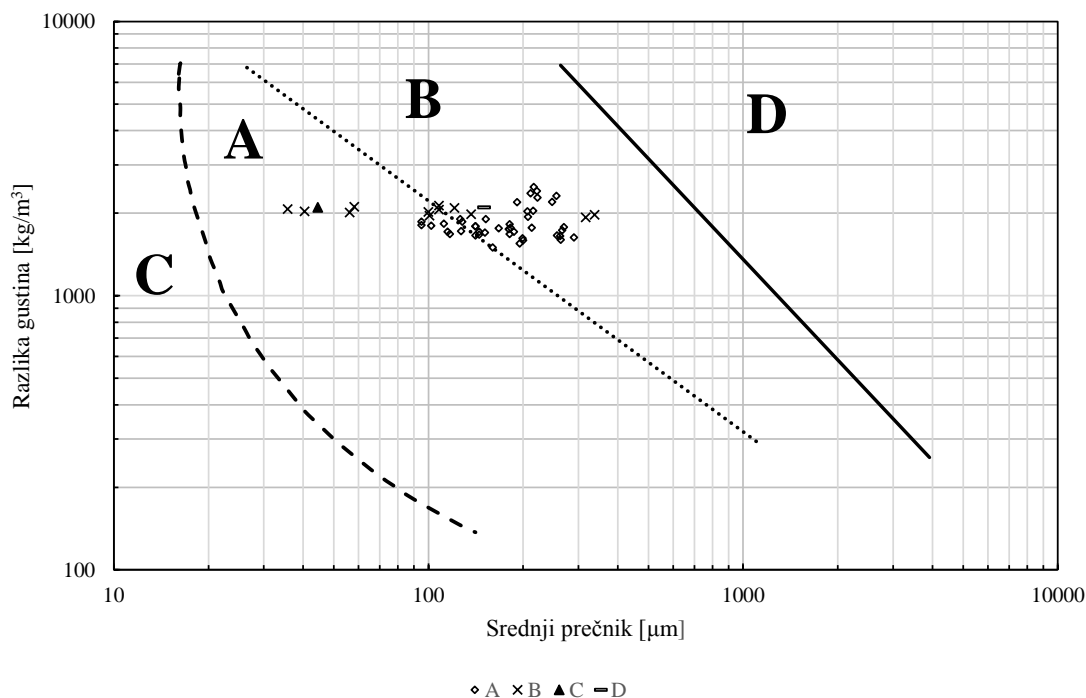
Za klasifikaciju prema indijskom standardu [70], [71], takođe je potrebno poznavati udeo hlorida. Ako se napravi ista pretpostavka, kao za klasifikaciju prema [30] i uzmu u obzir podaci iz [79], ispitivani pepeo se može svrstati u grupu silikatnih primesa, što važi i za uzorke iz studije [83].

Klasifikacija odbora za primenu letećeg pepela pri Ujedinjenim nacijama [59] kao osnovni kriterijum posmatra odnos udela SiO_2 i Al_2O_3 , i udeo oksida kalcijuma. Prema ovom kriterijumu skoro 90% ispitivanih uzoraka i 75% uzoraka iz [83] se može svrstati u grupu siliko-aluminatnih ($\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3 \geq 2$, $\text{CaO} < 8\%$).

Ukoliko se posmatra klasifikacija prema R modulu, ispitivani uzorci, kao i uzorci iz studije [83] spadaju u grupu alumino-silikatnih letećih pepela.

4.4.2 Dijagrami za procenu režima transporta

Na osnovu dijagrama različitih autora izvršena je procena pogodnosti ispitivanih uzoraka pepela u cilju izbora režima i dobijanja smernica za izbor adekvatnog sistema pneumatskog transporta.



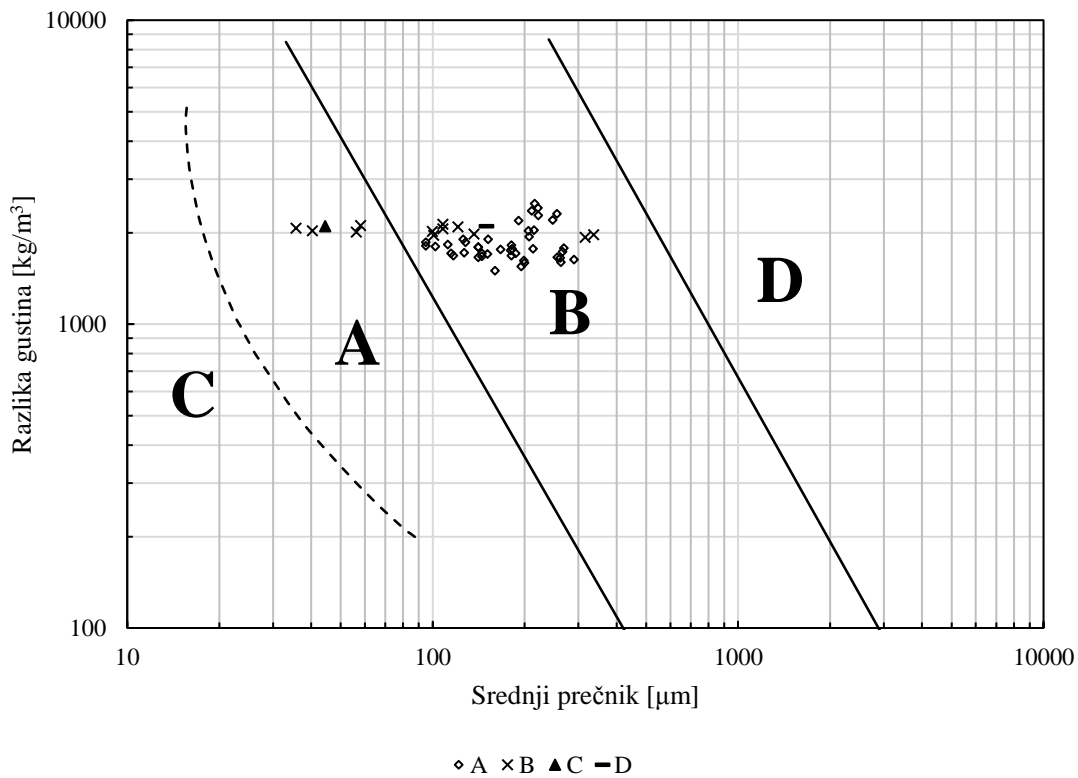
Slika 4.4 Geldart-ov dijagram sa eksperimentalnim tačkama za ispitivane uzorke pepela [81]

A - Ispitivani uzorci; B - [83]; C - [86]; D - [82]

Na slici 4.4 prikazan je Geldart-ov dijagram, gde je predstavljeno ukupno 57 uzoraka pepela iz procesa sagorevanja lignita Kolubara u razmatranoj termoelektrani. Od toga je bilo 43 ispitivana uzorka (1 - 13, 15, 18, 30 - 34, 42 - 64), kao i određeni broj uzoraka pepela istog porekla ispitivanih od strane autora, 12 iz [83] i po 1 iz [86] i [82].

Položaj tačaka za ispitivane uzorke pepela u dijagramu jasno potvrđuje izrazito heterogene karakteristike ispitivanog materijala, srednji prečnik 95 - 290 μm i gustina 1500 - 2490 kg/m³. Uočava se da ispitivani uzorci obuhvataju široko područje grupa A i B, uz evidentno veći broj uzoraka u grupi B, odnosno na samoj granici između grupa.

Na Dixon-ovom dijagramu [126], [127] (slika 4.5) prikazani su isti uzorci kao i u Geldart-ovom dijagramu, gde se uočava još izraženija pripadnost materijala grupi B, koji su grublji i nisu skloni transportu u ugušćenoj fazi u konvencionalnim sistemima.

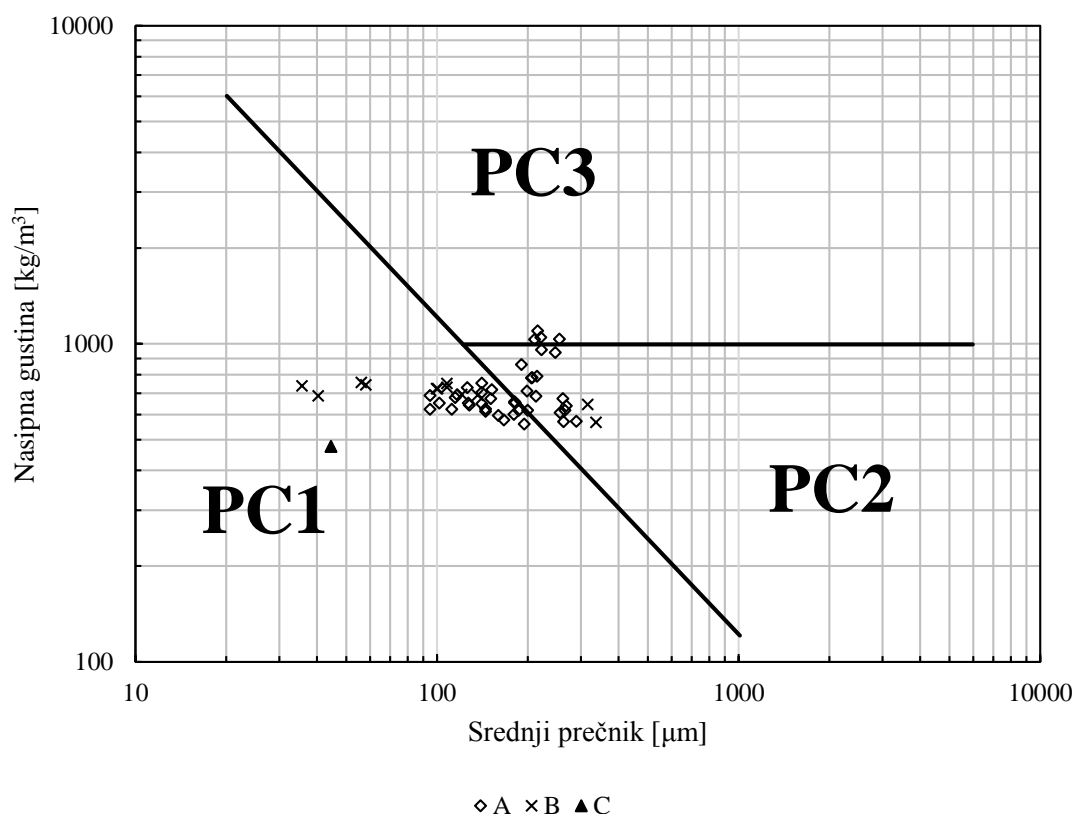


Slika 4.5 Dixon-ov dijagram sa eksperimentalnim tačkama za ispitivane uzorke pepela [126], [127]

A - Ispitivani uzorci; B - [83]; C - [86]; D - [82]

U Pan-ovom dijagramu [91] (slika 4.6) prikazan je položaj tačaka za 43 ispitivana uzorka (1 - 13, 15, 18, 30 - 34, 42 - 64), 12 uzoraka iz [83] i 1 uzorak iz [86], za pepeo iz procesa sagorevanja lignita Kolubara u termoelektrani. Posmatrajući dijagram, uočava se pripadnost uzoraka graničnoj oblasti između režima, što potvrđuje nemogućnost jednoznačnog karakterisanja ispitivanog pepela. Položaj većine tačaka za predstavljene uzorke pokazuje dominantnu pripadnost grupama PC1 i PC2, za koje je preporučen transport u ugušćenoj fazi ili u vidu čepa. Međutim, ukoliko se obrati pažnja na analize rezultata objavljene u radu [131], uzorcima koji se nalaze u prelaznoj oblasti

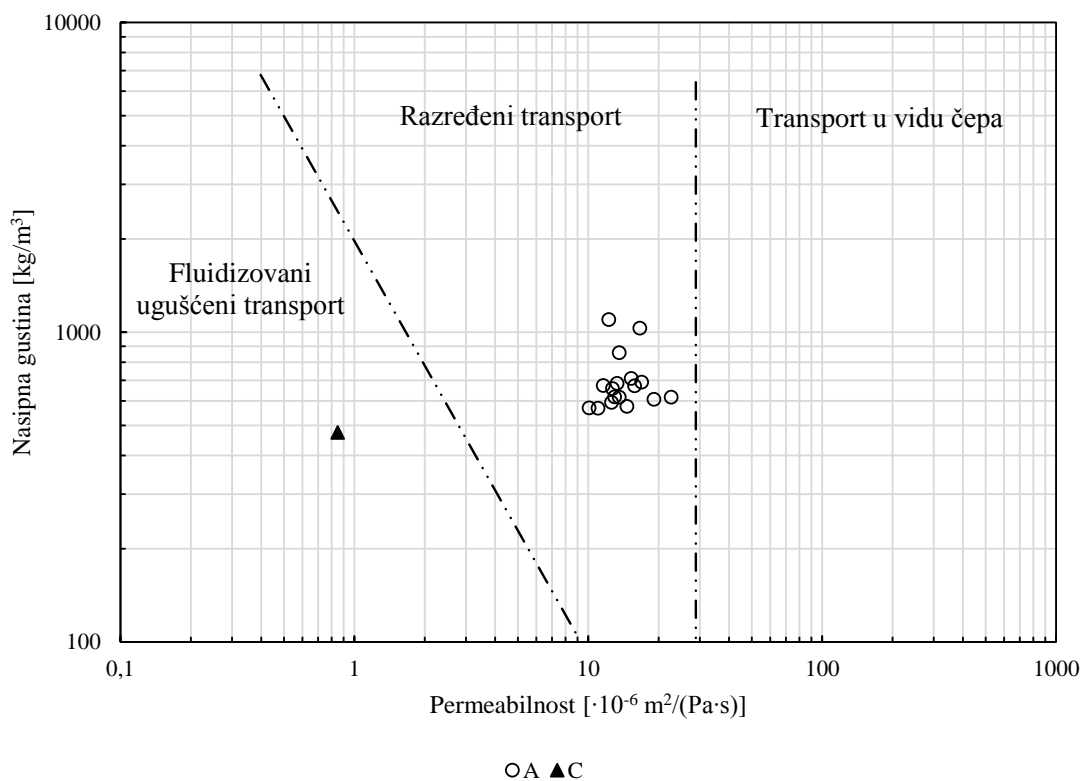
Pan-ovog dijagrama, između grupa PC1, PC2 i PC3, odgovara isključivo razređeni pneumatski transport.



Slika 4.6 Pan-ov dijagram sa eksperimentalnim tačkama za ispitivane uzorke pepela [91]

A - Ispitivani uzorci; B - [83]; C - [86];

U Jones-ovom dijagramu [131] (slika 4.7) predstavljeno je 17 ispitivanih uzoraka (1 - 13, 45 - 46, 50, 52). Takođe, predstavljen je 1 uzorak pepela lignita Kolubara iz [86]. Položaj tačaka na dijagramu pokazuje da ispitivani uzorci pripadaju oblasti razređenog pneumatskog transporta. S druge strane, njihova bliskost graničnom području mogla bi ukazati na afinitet ka znatno poželjnijem režimu ugušćenog transporta u vidu čepa, primenom nekonvencionalnih rešenja, kojim bi se ostvarile znatno manje brzine transporta i smanjilo habanje cevovoda i armature.



Slika 4.7 Režimi transporta prema Jones-u [131]

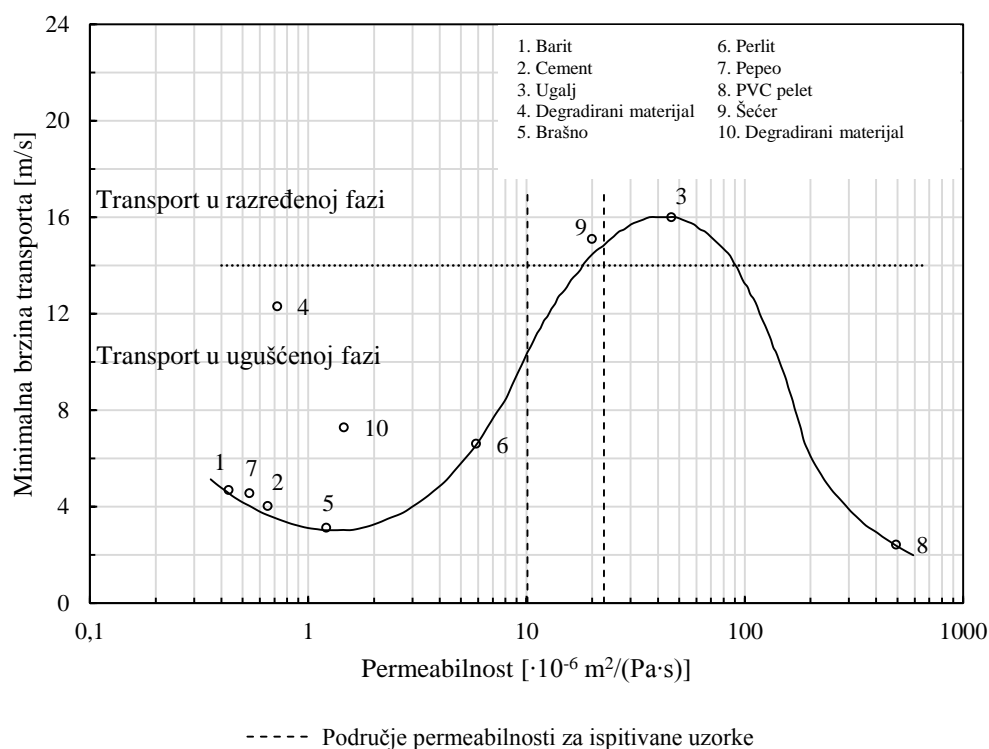
A - Ispitivani uzorci; C - [86];

Na Mills-ovom dijagramu [94] (slika 4.8) prikazana je oblast za 17 ispitivanih uzoraka (1 - 13, 45, 46, 50, 52), koja predstavlja područje permeabilnosti pre dostizanja minimalne brzine fluidizacije.

Razmatrani pepeo potpuno pripada oblasti koju karakteriše niti dobra permeabilnost niti dobro zadržavanje vazduha, i jedino ga je moguće transportovati u razređenoj fazi.

Za oblast permeabilnosti ispitivanih uzoraka pepela sa Mills-ovog dijagrama se može zaključiti sledeće:

- oblast permeabilnosti ispitivanih uzoraka se nalazi na granici pneumatskog transporta u ugušćenoj i razređenoj fazi,
- minimalna brzina transporta ispitivanog pepela se kreće u granicama koje su približno od oko 10,3 do 15 m/s.



Slika 4.8 Uticaj permeabilnosti na režim transporta [94]

4.4.3 Zaključak o mogućem režimu transporta letećeg pepela

Literaturni navodi i razmatrani dijagrami ukazuju na činjenicu da nije moguće jednoznačno odrediti pogodan režim pneumatskog transporta za ispitivani pepeo, što je upravo posledica njegovih vrlo heterogenih karakteristika. Grublji leteći pepeo, kome pripada i razmatrani pepeo lignita Kolubara, karakteriše otežan ugušćen vid pneumatskog transporta, pri kome može doći do formiranja čepova i zagušenja, vibracija cevovoda i dinamičkih promena pritiska. Ispitivani pepeo se može dobro fluidizovati, ali isto tako dolazi do njegove brze deaeracije i sleganja u kompaktne slojeve, koji stvaraju velike sile trenja na zidovima transportnog cevovoda. Navedeni problem je sagledan prilikom ispitivanja fluidizacionih karakteristika, gde je jasno uočeno raslojavanje materijala. Jedan deo čestica istog uzorka izuzetno brzo i lako fluidizuje, i ostaje potpuno aerisan u toku eksperimenta, dok preostali deo materijala može biti u stanju mirovanja i nakon dostizanja minimalne brzine fluidizacije i početka vertikalnog pneumatskog transporta. Stoga, često je potrebno primeniti razređeni transport i obezbediti temeljno pražnjenje cevovoda pre zaustavljanja transporta. [116].

U slučaju da se za transport ispitivanog letećeg pepela izabere režim ugušćenog transporta, a s obzirom na njegovu pripadnost graničnim oblastima na svim razmatranim dijagramima i razmatranja iznesena u [125], neophodno je materijal izložiti visokom pritisku. To znači da se za ugušćeni transport letećeg pepela lignita Kolubara mora primeniti komprimovani vazduh visokog pritiska (značajno iznad 1 bar natpritiska, npr. 3 - 4 bar). Tada bi se leteći pepeo, koji pripada grupi B na Geldart-ovom i Dixon-ovom dijagramu, ponašao kao materijal grupe A, koji je najpogodniji za ugušćeni transport. Druga, mogućnost je primena nekog od nekonvencijalnih pristupa pneumatskog transporta. Važan zaključak sa dijagrama datog na slici 4.8 je podatak o minimalnoj brzini transporta letećeg pepela lignita Kolubara, koja je u granicama oko 10,3 - 15 m/s.

4.5 Ispitivanje radnih uslova termoelektrane i merenje pritiska u sistemu pneumatskog transporta

Rezultati merenja pritiska u sistemu pneumatskog transporta pepela, u okviru razmatranog bloka termoelektrane, dati su u Prilogu 5, u tabeli P5.1 za cevovod 1 i tabeli P5.2 za cevovod 2, pri čemu apsolutna greška merenja pritiska nije prelazila $\pm 0,02$ bar. Grafički prikaz rezultata za cevovod 1 dat je na slici 4.9, dok su rezultati za cevovod 2 predstavljeni na slici 4.10.

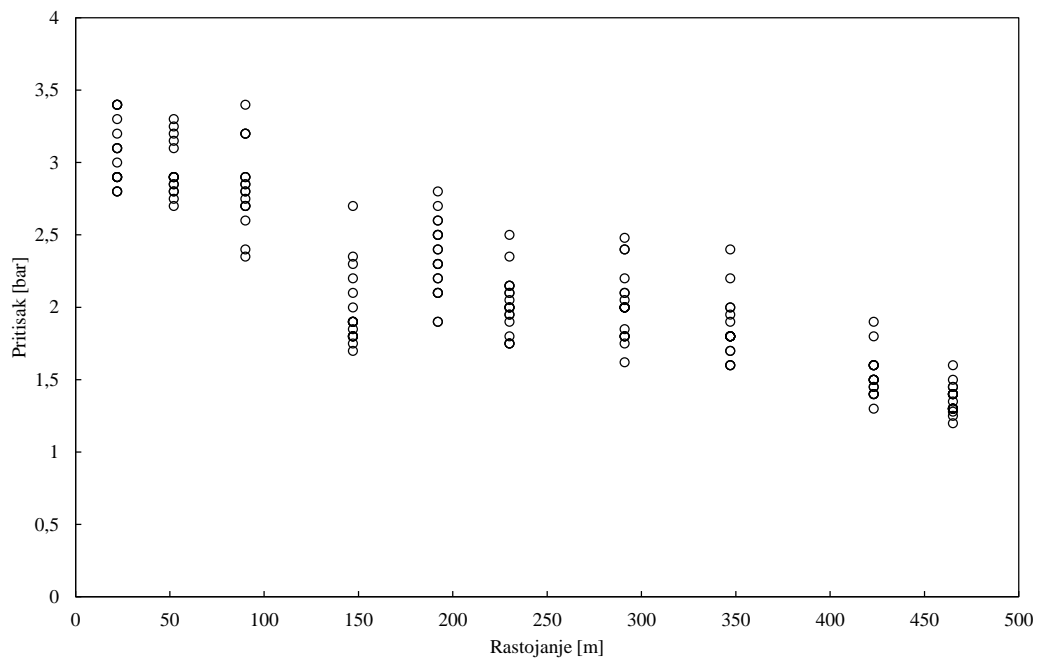
Izmerene maksimalne vrednosti pritiska duž cevovoda su prikazane za veći broj transportnih ciklusa. Određene su minimalne, maksimalne i srednje vrednosti, kao i vrednosti standardne devijacije od srednjih vrednosti za svako merno mesto.

Srednja vrednost pritiska vazduha u početnom preseku je 3,03 bar za cevovod 1, odnosno 3,0 bar za cevovod 2. Maksimalne vrednosti standardne devijacije iznose 0,28 bar za cevovod 1 i 0,34 bar za cevovod 2 i određene su stohastičkim karakterom nestacionarnog transporta pepela.

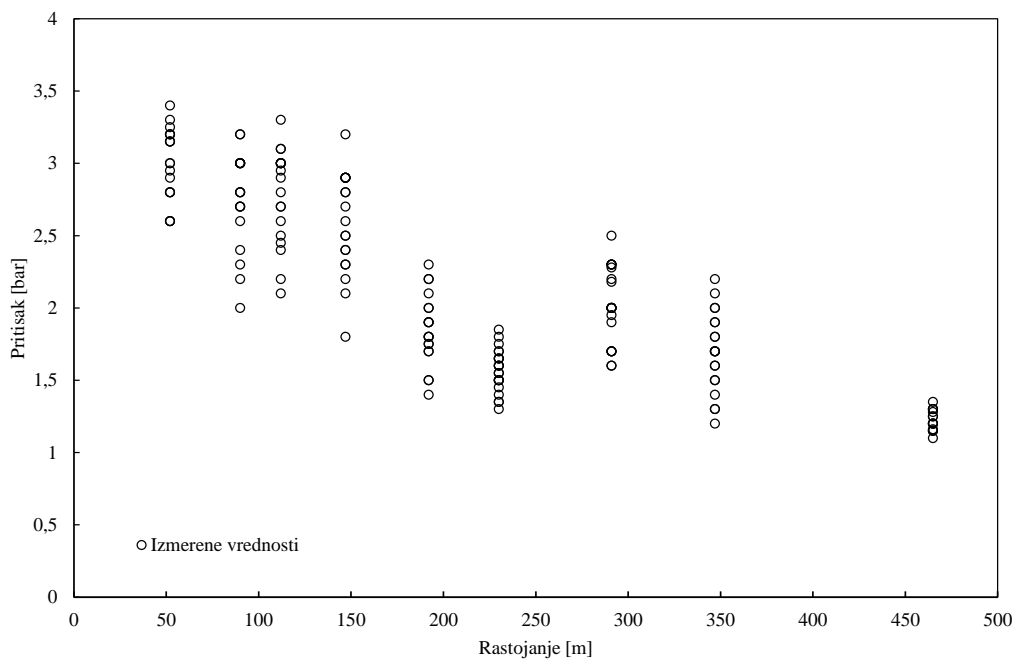
Na slici 4.9 uočava se smanjenja maksimalne vrednosti pritiska na rastojanju od 150 m, u preseku iza spoja prve deonice manjeg prečnika (0,2604 m), sa drugom po redu deonicom većeg prečnika (0,3097 m).

U slučaju cevovoda broj 2 (slika 4.10) do smanjenja pritiska dolazi na oko 230 m, što odgovara približno polovini dužine druge deonice prečnika 0,3097 m, što može biti

posledica taloženja pepela i ubrzavanja struje vazduha usled smanjenja poprečnog preseka slobodnog za njegovo strujanje.



Slika 4.9 Rezultati merenja pritiska u cevovodu 1

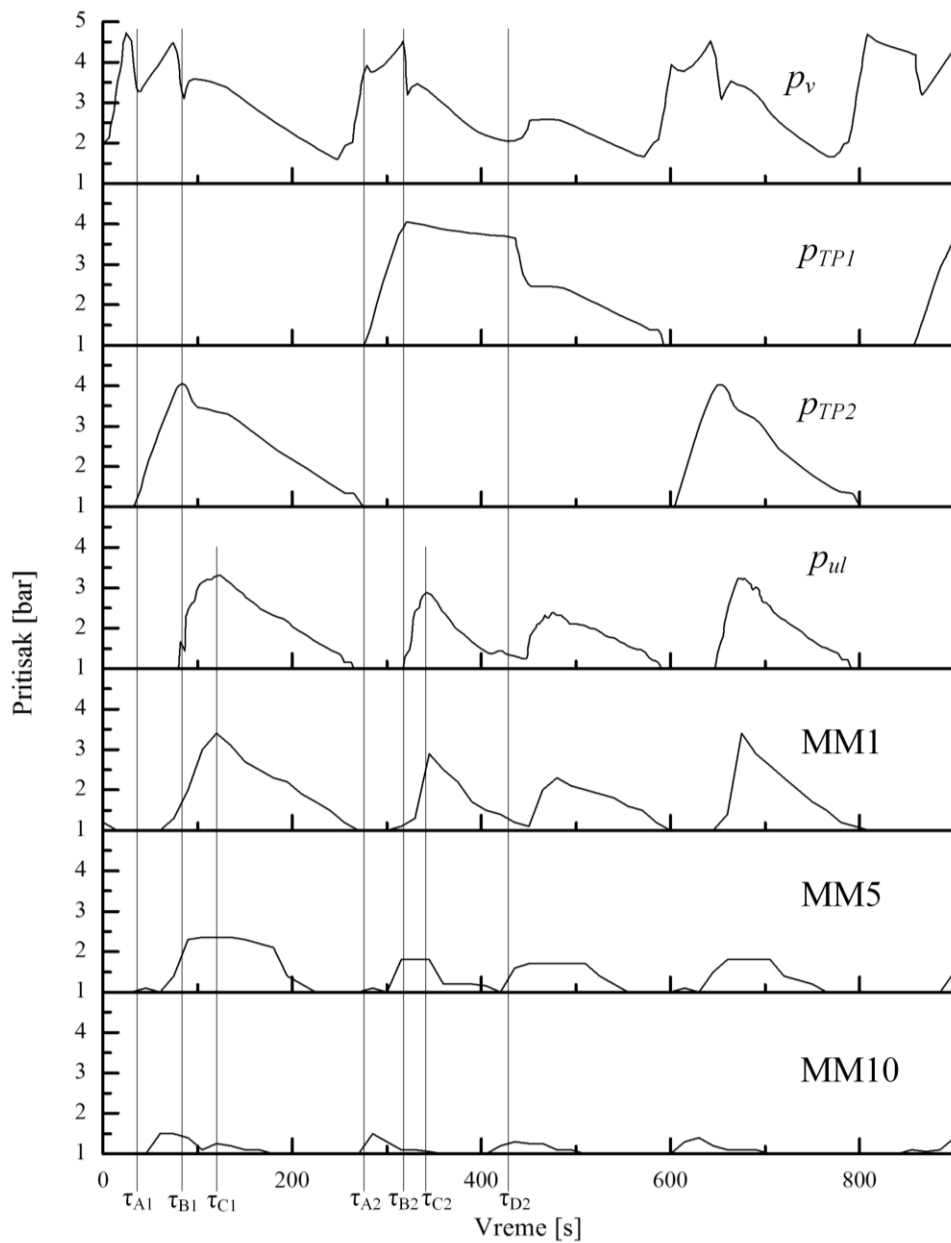


Slika 4.10 Rezultati merenja pritiska u cevovodu 2

Na osnovu raspoloživih pogonskih merenja pritiska na izlazu iz kompresorske stanice, u posudama za prikupljanje pepela i pritisaka duž oba cevovoda, sagledan je izrazito nestacionaran (periodičan) karakter transporta. Nestacionaran karakter transporta je uslovljen pogonskim operacijama punjenja posuda, njihovim pražnjenjem i samim transportom pepela u cevovodima. Pomenuti procesi se ponavljaju periodično, u ciklusima. Takođe, u toku određenih ciklusa uočeni su zastoji u transportu usled zagušenja u cevovodima i pri pražnjenju posuda u transportni cevovod.

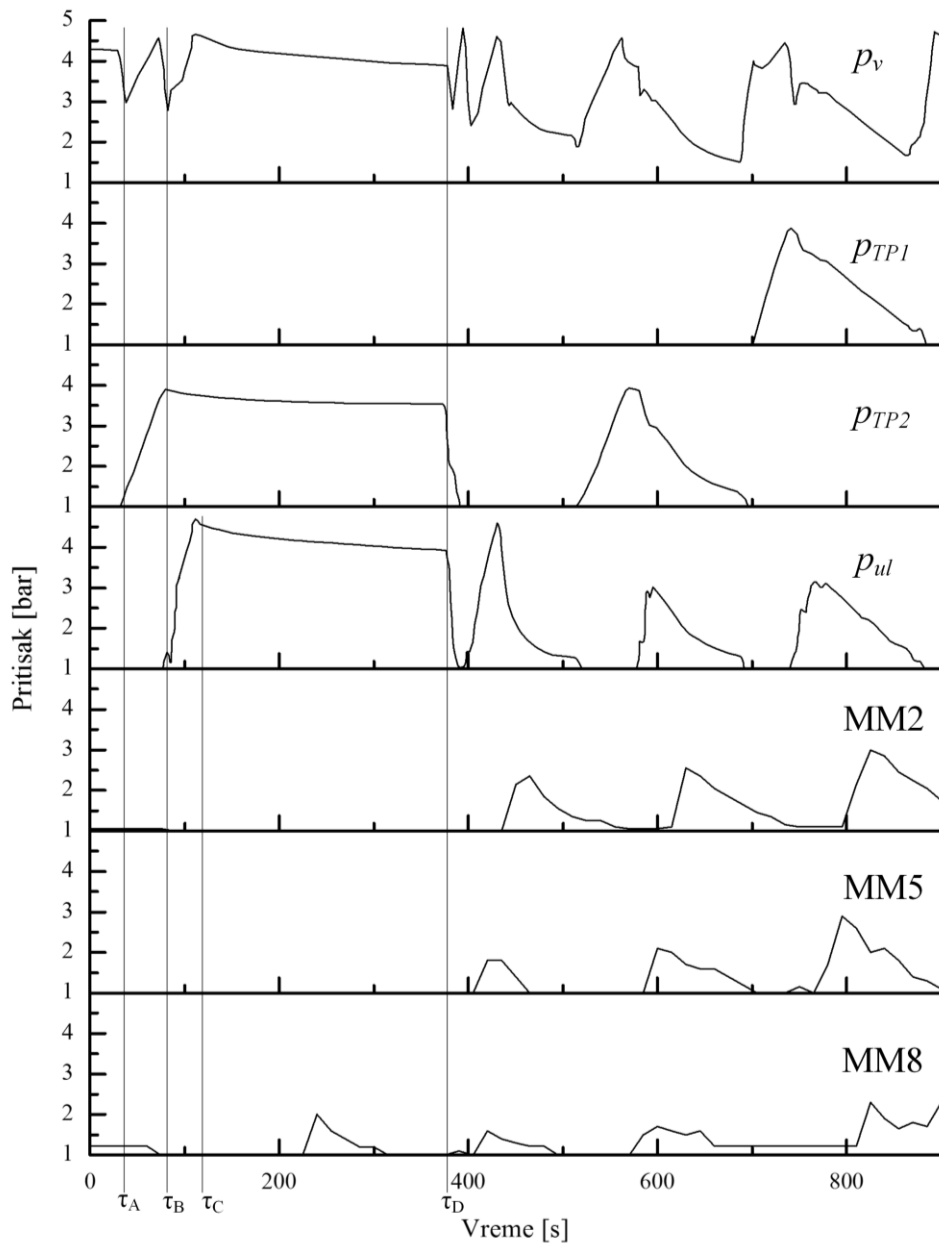
Na dijagramima prikazanim na slikama 4.11 i 4.12 izdvojena su tri karakteristična ciklusa, za koje je izvršena analiza.

- Na slici 4.11 u intervalu 30 - 270 s, prikazan je tipičan ciklus transporta pepela. Nakon punjenja transportnih posuda pepelom, zatvaraju se svi ulazni i izlazni ventili za pepeo, i u njih se dovodi vazduh pod pritiskom. Početak dovođenja vazduha u transportne posude označen je sa τ_{A1} . Pritisak na izlazu iz kompresorske stanice p_v raste do maksimalne vrednosti od 4,5 bar, što dovodi do odgovarajućeg porasta pritiska p_{TP2} . Nakon dostizanja maksimalnog pritiska u transportnim posudama, u trenutku τ_{B1} , otvara se ventil za pražnjenje pepela. Uporedo sa pražnjenjem pepela iz posuda, raste pritisak na ulazu u transportni cevovod p_{ub} kao i na obližnjem mernom mestu MM1, čiji se maksimumi dostižu u trenutku τ_{C1} na kraju procesa pražnjenja posuda. Nakon toga sledi postepeno snižavanje pritiska i završetak transportnog ciklusa u trenutku τ_{A2} , kada vrednost pritiska u posudama i na svim mernim mestima padne na približno 1 bar. Interesantno je istaći da maksimalna vrednost pritiska prvo biva dostignuta u izlaznoj deonici cevovoda (MM10), nakon čega se prenosi u suprotnom smeru, ka središnjem delu (MM5) i ulazu u cevovod (MM1). Dostizanje maksimalne vrednosti pritiska na mernom mestu MM1 kasni za dostizanjem maksimalne vrednosti pritiska na mernom mestu MM10, udaljenom 401 m, za približno 60 s. Ova pojava se može objasniti činjenicom da na početku transportnog ciklusa, celom dužinom cevovoda postoje naslage pepela, akumulirane u toku prethodnih ciklusa, zbog nedovoljne količine vazduha za transport do silosa. Sa početkom novog ciklusa, dolazi do porasta pritiska u na izlazu iz kompresorske stanice p_v , a samim tim i do porasta protoka vazduha koji povlači čestice pepela iz slojeva sa dna cevovoda. Ostvaruje se kvazistacionarno strujanje dvofazne mešavine i pre nego što dođe do pražnjenja nove količine pepela u cevovod.



Slika 4.11 Promene pritiska za liniju 1 [187]

p_v - na izlazu iz kompresorske stanice;
 p_{TP1} i p_{TP2} - u transportnim posudama za prikupljanje pepela i njegovo pražnjenje u
transportni cevovod;
 p_{ul} - na ulazu u cevovod za pneumatski transport.



Slika 4.12 Promene pritiska za liniju 2 [187]

p_v - na izlazu iz kompresorske stanice;
 p_{TP1} i p_{TP2} - u transportnim posudama za prikupljanje pepela i njegovo pražnjenje u
transportni cevovod;
 p_{ul} - na ulazu u cevovod za pneumatski transport.

Maksimalne vrednosti pritiska u izlaznim deonicama bivaju dostignute, dok se na ulazu u cevovod još uvek dešava porast pritiska usled kontinualnog pražnjenja posuda. U periodu od τ_{B2} do τ_{C2} , pritisak na ulazu u cevovod za pneumatski transport p_{ul} dostiže maksimalnu vrednost, nakon čega dolazi do snižavanja pritiska usled zastoja u pražnjenju posuda i pražnjenja pepela iz cevovoda u silos. Po prestanku zastoja i ponovnog pražnjenja posuda u trenutku τ_{D2} , dolazi do bržeg smanjenja pritiska u posudama i do ponovnog porasta pritiska u transportnoj liniji, nakon čega pada na 1 bar na kraju ciklusa, približno 590 s.

- Na slici 4.12 prikazana je pojava zastoja u cevovodu. Posmatrani transportni ciklus počinje u trenutku τ_A , gde se porast pritiska u posudama p_{TP2} odvija do trenutka τ_B . U trenutku τ_B počinje pražnjenje posuda, otvara se ventil i pritisak na ulazu u transportni cevovod p_{ul} raste do trenutka τ_C . Međutim, dolazi do zagušenja u cevovodu, što je nagovešteno sporim opadanjem pritiska na ulazu u cevovod p_{ul} do trenutka τ_D , kao i sporim opadanjem pritiska u paru transportnih posuda koje se prazne p_{TP2} . Budući da nema očitavanja na mernom mestu MM2, može se zaključiti da je zagušenje nastalo između ulaza u transportni cevovod i mernog mesta MM2. Utvrđivanje tačnog mesta nastanka zagušenja, kao i količine pepela, moguće je jedino rastavljanjem cevovoda, što nije prihvatljivo zbog neophodnog zaustavljanja termoelektrane. U trenutku τ_D dolazi do ponovnog uspostavljanja transporta, što pokazuje brže opadanje pritiska, i u cevovodu i u posudama.

U toku merenja, bruto električna snaga bloka termoelektrane se menjala u opsegu 606,4 - 622,6 MW, a potrošnja lignita u opsegu od 756 - 786 t/h, kao što je prikazano u tabeli 4.6, što znači da je blok radio prema projektovanom kapacitetu. Podaci o tehničkoj analizi lignita u toku merenja (tabela 4.7) pokazuju da je maseni udeo pepela bio u opsegu 13,4 - 15%. Na osnovu podataka o donjoj toplotnoj moći i sadržaju pepela u uglju, može se zaključiti da je ugalj u periodu ispitivanja bio prosečnog kvaliteta, nešto bolji od srednjih vrednosti za sve uzorke.

Tabela 4.6 Snaga bloka i potrošnja uglja tokom sprovedenih merenja

Bruto snaga (MW)	Potrošnja lignita (t/h)
622,6	756,0
622,6	760,8
622	771,6
622	774,0
618,14	783,6
613,8	780,0
613,8	781,2
606,4	786,0

Tabela 4.7 Podaci o analizama uglja u toku merenja

Ukupna vlaga (%)	Pepeo (%)	Donja toplotna moć (kJ/kg)
50,3	13,4	7689
50,4	14,7	7343
50,3	15,0	7400

Potreban protok vazduha je obezbeđen radom jednog kompresora, i iznosio je 5500 m³/h (1,5278 m³/s) (pri $p = 1,103$ bar i $T = 273,15$ K), a ukupan broj ciklusa transporta pepela kroz jedan cevovod u toku jednog časa bio je 14, uz srednje vreme trajanja transportnog ciklusa od 197 s [187].

U toku merenja su uzeti uzorci pepela za koje su laboratorijska ispitivanja pokazala da je srednji prečnik čestica pepela bio u opsegu 115 - 141 μm, nasipna gustina 600 kg/m³, a stvarna gustina 1,7 - 2,4 g/cm³ [187].

Minimalna i maksimalna vrednost masenog protoka pepela, za oba transportna cevovoda, može se odrediti prema podacima o potrošnji uglja (tabela 4.6) i masenom udelu pepela (tabela 4.7):

$$756 \text{ t/h} \cdot 0,134 = 101,3 \text{ t/h} \quad (4.1)$$

$$786 \text{ t/h} \cdot 0,15 = 117,9 \text{ t/h} \quad (4.2)$$

Vrednosti masenog protoka u realnim uslovima su bile veće od ovako predstavljanih, odnosno projektnih 120 t/h [186], usled periodičnog karaktera transporta, odnosno vremena čekanja između ciklusa [187], pa se na osnovu pogonskih parametara (usvojena potrošnja lignita 786 t/h) i tehničke analize uglja u toku merenja (usvojena

vrednost masenog udela pepela u uglju 15%), dobija maseni protok pepela za razmatrani blok termoelektrane:

$$\dot{m}_p = 780 \text{ t/h} \cdot 0,15 = 117 \text{ t/h} . \quad (4.3)$$

Deljenjem ukupne produkcije pepela na dva transportna cevovoda po bloku dobija se maseni protok pepela po jednom cevovodu:

$$\dot{m}_{p_1} = \frac{780 \text{ t/h}}{2} = 58,5 \text{ t/h} . \quad (4.4)$$

Uzimajući u obzir broja ciklusa transporta pepela kroz jedan cevovod u toku jednog časa (14) i srednje trajanje jednog transportnog ciklusa (197 s) dobija se stvarni protok pepela po jednom cevovodu:

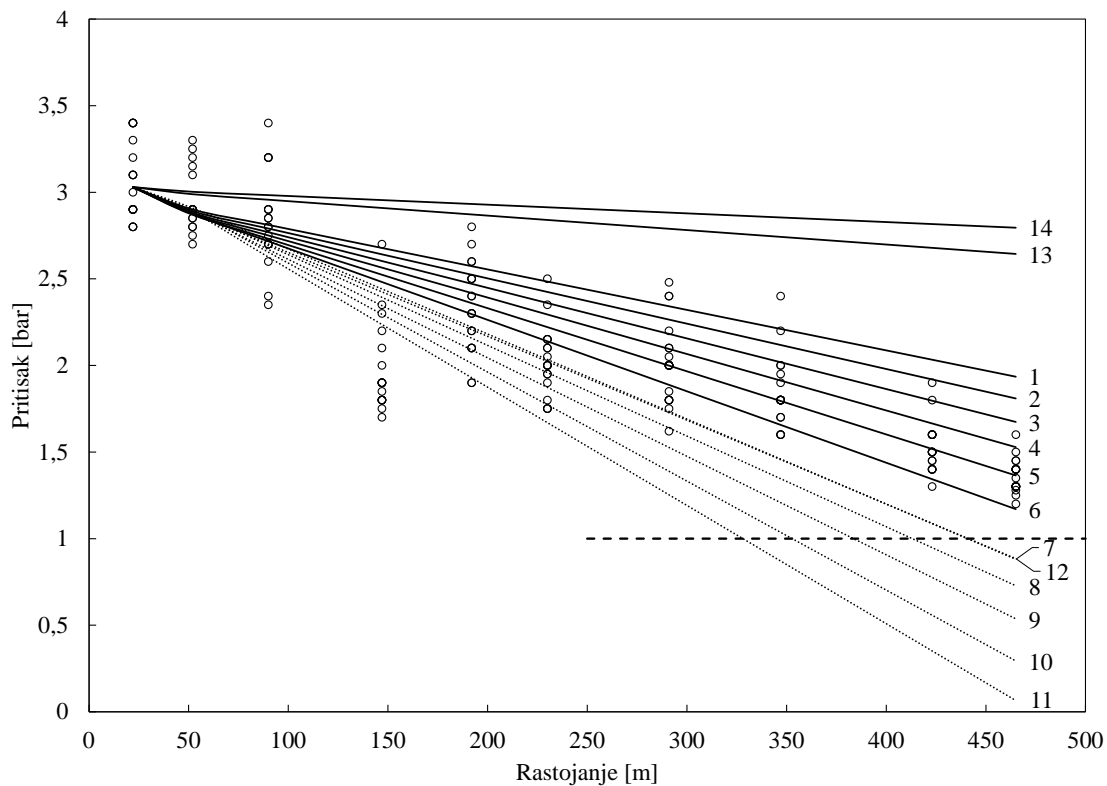
$$\dot{m}_{p_s} = \frac{58,5 \text{ t/h}}{197 \text{ s/ciklus} \cdot 14 \text{ ciklus/h} \cdot 3600 \text{ s/h}} \approx 77 \text{ t/h} (21,4 \text{ kg/s}) . \quad (4.5)$$

4.6 Verifikacija modela - proračun pada pritiska duž cevovoda za pneumatski transport

Proračun pada pritiska duž transportnih cevovoda obavljen je numeričkim simulacijama korišćenjem odgovarajućih modela (poglavlja 3.2.1 i 3.2.2), za pogonsko stanje sistema pneumatskog transporta pri kome su izvršena merenja. Iako je posmatrani transport pepela nestacionaran i periodičan, strujanje vazduha i pepela je posmatrano kao kvazistacionarno sa konstantnim masenim odnosom pepela i vazduha duž transportnih cevovoda, kao što je predstavljeno u [187]. Numeričke simulacije sprovedene su koristeći programski kod razvijen u programskom jeziku FORTRAN, pod pretpostavkom kvazistacionarnog stanja za sledeće uslove [187]:

- 5500 m³/h (1,5278 m³/s) (pri $p = 1,103$ bar i $T = 273,15$ K);
- Protok pepela 77 t/h (21,4 kg/s);
- Sa navedenim protokom vazduha od 5500 m³/h i pepela od 77 t/h uspostavlja se odnos masenih protoka pepela i vazduha od 11,63 kg_{pepela}/kg_{vazduha};
- Pritisak vazduha u početnom preseku za proračun je 3,03 bar za cevovod 1 i 3 bar za cevovod broj 2;
- Temperatura vazduha u transportnom cevovodu 100 °C;
- Prema pogonskim podacima stvarna gustina čestica pepela bila je u opsegu 1800 - 2400 kg/m³ (usvojeno 2100 kg/m³);
- Srednji prečnik čestica pepela se kretao u rasponu 115 - 141 μm (usvojeno 128 μm).
- Budući da se radi o pneumatskom transportu velike dužine, lokalni gubici pritiska su zanemareni [92]

Verifikacija modela podrazumevala je poređenje rezultata numeričkih simulacija sa izmerenim vrednostima pritiska duž cevovoda na realnom postrojenju u radu. Rezultati proračuna pada pritiska za cevovode 1 i 2, za svaki od modela, dati su u Prilogu 6 (tabele P6.1 i P6.2), odnosno njihov uporedni prikaz sa eksperimentalnim podacima na dijagramima (slike 4.13 i 4.14). Srednje kvadratno odstupanje i korelacioni odnos modela od eksperimentalnih vrednosti za razmatrane cevovode su dati u tabelama 4.8 i 4.9.

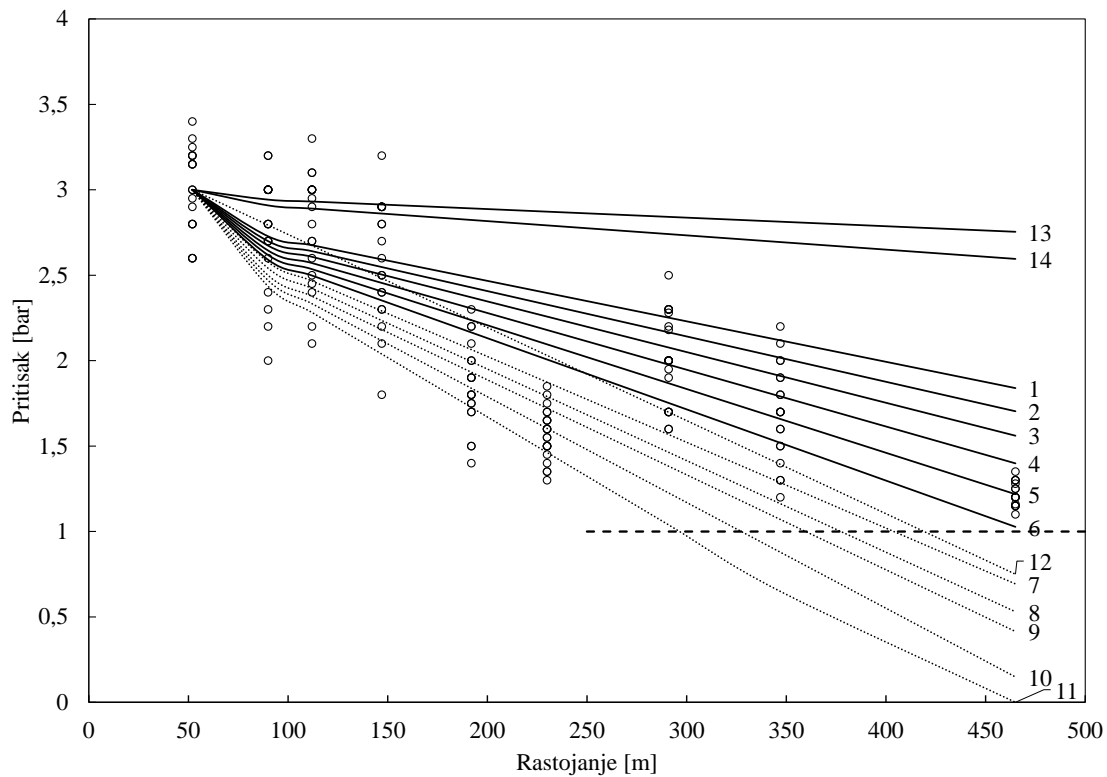


- Izmerene vrednosti
- 1 Dogin i Lebedev (1962) ($A=1 \cdot 10E-06$)
- 2 Dogin i Lebedev (1962) ($A=1,1 \cdot 10E-06$)
- 3 Dogin i Lebedev (1962) ($A=1,2 \cdot 10E-06$)
- 4 Dogin i Lebedev (1962) ($A=1,3 \cdot 10E-06$)
- 5 Dogin i Lebedev (1962) ($A=1,4 \cdot 10E-06$)
- 6 Dogin i Lebedev (1962) ($A=1,5 \cdot 10E-06$)
- 7 Dogin i Lebedev (1962) ($A=1,6 \cdot 10E-06$)
- 8 Dogin i Lebedev (1962) ($A=1,7 \cdot 10E-06$)
- 9 Dogin i Lebedev (1962) ($A=1,8 \cdot 10E-06$)
- 10 Dogin i Lebedev (1962) ($A=1,9 \cdot 10E-06$)
- 11 Dogin i Lebedev (1962) ($A=2 \cdot 10E-06$)
- 12 Muschelknautz i Krambrock (1969)
- 13 Michaelides (1987)
- 14 Shimizu (1978)

Slika 4.13 Rezultati proračuna pada pritiska duž cevovoda 1 za pneumatski transport pepela

Tabela 4.8 Srednje kvadratno odstupanje i korelacioni odnos modela od eksperimentalnih vrednosti za cevovod 1

Model	Srednje kvadratno odstupanje Δ_{sr} , (%)	Korelacioni odnos θ , (%)
Dogin i Lebedev (1962) $A = 1 \cdot 10^{-6}$	23,47	70,09
Dogin i Lebedev (1962) $A = 1,1 \cdot 10^{-6}$	19,46	79,72
Dogin i Lebedev (1962) $A = 1,2 \cdot 10^{-6}$	15,43	86,85
Dogin i Lebedev (1962) $A = 1,3 \cdot 10^{-6}$	11,82	91,58
Dogin i Lebedev (1962) $A = 1,4 \cdot 10^{-6}$	9,58	93,99
Dogin i Lebedev (1962) $A = 1,5 \cdot 10^{-6}$	10,99	93,18
Dogin i Lebedev (1962) $A = 1,6 \cdot 10^{-6}$	18,16	84,73
Dogin i Lebedev (1962) $A = 1,7 \cdot 10^{-6}$	22,84	75,65
Dogin i Lebedev (1962) $A = 1,8 \cdot 10^{-6}$	29,00	57,26
Dogin i Lebedev (1962) $A = 1,9 \cdot 10^{-6}$	37,02	-
Dogin i Lebedev (1962) $A = 2 \cdot 10^{-6}$	44,77	-
Muschelknautz i Krambrock (1969)	18,06	84,79
Michaelidis (1987)	47,99	-
Shimizu (1978)	53,28	-



- Izmerene vrednosti
- 1 Dogin i Lebedev (1962) ($A=1 \cdot 10E-06$)
- 2 Dogin i Lebedev (1962) ($A=1,1 \cdot 10E-06$)
- 3 Dogin i Lebedev (1962) ($A=1,2 \cdot 10E-06$)
- 4 Dogin i Lebedev (1962) ($A=1,3 \cdot 10E-06$)
- 5 Dogin i Lebedev (1962) ($A=1,4 \cdot 10E-06$)
- 6 Dogin i Lebedev (1962) ($A=1,5 \cdot 10E-06$)
- 7 Dogin i Lebedev (1962) ($A=1,6 \cdot 10E-06$)
- 8 Dogin i Lebedev (1962) ($A=1,7 \cdot 10E-06$)
- 9 Dogin i Lebedev (1962) ($A=1,8 \cdot 10E-06$)
- 10 Dogin i Lebedev (1962) ($A=1,9 \cdot 10E-06$)
- 11 Dogin i Lebedev (1962) ($A=2,0 \cdot 10E-06$)
- 12 Muschelknautz i Krambrock (1969)
- 13 Michaelides (1987)
- 14 Shimizu (1978)

Slika 4.14 Rezultati proračuna pada pritiska duž cevovoda 2 za pneumatski transport pepela

Tabela 4.9 Srednje kvadratno odstupanje i korelacioni odnos modela od eksperimentalnih vrednosti za cevovod 2

Model	Srednje kvadratno odstupanje Δ_{sr} , (%)	Korelacioni odnos θ , (%)
Dogin i Lebedev (1962) $A = 1 \cdot 10^{-6}$	28,40	68,14
Dogin i Lebedev (1962) $A = 1,1 \cdot 10^{-6}$	24,20	77,39
Dogin i Lebedev (1962) $A = 1,2 \cdot 10^{-6}$	20,14	84,08
Dogin i Lebedev (1962) $A = 1,3 \cdot 10^{-6}$	16,27	88,88
Dogin i Lebedev (1962) $A = 1,4 \cdot 10^{-6}$	13,66	91,33
Dogin i Lebedev (1962) $A = 1,5 \cdot 10^{-6}$	13,81	90,98
Dogin i Lebedev (1962) $A = 1,6 \cdot 10^{-6}$	20,12	83,82
Dogin i Lebedev (1962) $A = 1,7 \cdot 10^{-6}$	24,70	75,54
Dogin i Lebedev (1962) $A = 1,8 \cdot 10^{-6}$	28,38	66,11
Dogin i Lebedev (1962) $A = 1,9 \cdot 10^{-6}$	36,74	32,12
Dogin i Lebedev (1962) $A = 2 \cdot 10^{-6}$	47,19	-
Muschelknautz i Krambrock (1969)	21,56	94,99
Michaelidis (1987)	54,26	-
Shimizu (1978)	59,80	-

Dijagrami na slikama 4.13 i 4.14 jasno ukazuju da je najbolje slaganje rezultata numeričkih simulacija sa eksperimentalnim za model gde je primenjena korelacija Dogina i Lebedeva [150], i to za vrednost parametra $A = 1,4 \cdot 10^{-6}$. To potvrđuju i rezultati statističke analize, gde se u razmatranom slučaju ostvaruje najbolji korelacioni odnos 93,99% (cevovod 1) i 91,33% (cevovod 2), kao i najbolje srednje kvadratno odstupanje 9,58% (cevovod 1) i 13,66% (cevovod 2).

Model zasnovan na korelaciji [150] pokazuje sasvim zadovoljavajuća slaganja se eksperimentalnim podacima i za vrednosti koeficijenta $A = 1,3 \cdot 10^{-6}$ i $A = 1,5 \cdot 10^{-6}$. Korelacija Muschelknautz-a i Krambrock-a [149] daje nešto veći pad pritiska, u odnosu na korelaciju [150] za $A = 1,4 \cdot 10^{-6}$ i u saglasnosti je sa pomenutom korelacijom za $A = 1,6 \cdot 10^{-6}$. Rezultati dobijeni modelom zasnovanom na korelaciji [150], za vrednosti parametra $A = (1,6 - 2,0) \cdot 10^{-6}$ i korelacijom Muschelknautz-a i Krambrock-a [149], (prikazani linijama 7 - 12), pokazuju da pritisak u cevovodima dostiže atmosferski na rastojanjima znatno kraćim od ukupne dužine cevovoda, zbog čega nisu dalje razmatrane.

Vrednosti promene pritiska duž cevovoda dobijene korišćenjem modela zasnovanog na korelaciji [150], za vrednosti parametra A koje su manje od $1,3 \cdot 10^{-6}$ i veće od $1,6 \cdot 10^{-6}$, znatno podbacuju u odnosu na eksperimentalno dobijene vrednosti, iako se u [162] navodi dobra korelacija za podatke o ugljenoj prašini za $A = 2 \cdot 10^{-6}$.

Modeli zasnovani na korelacijama prema [144] i [153] znatno podbacuju u odnosu na eksperimentalno dobijene vrednosti, pri čemu su srednja kvadratna odstupanja 47,99% i 54,26% za [144], odnosno 53,28% i 59,80% za slučaj [153]. Uzrok se najverovatnije ogleda u nedostatku izraza za koeficijent trenja f_m , jer ne uzimaju u obzir prečnik cevi, srednji prečnik čestica, gustinu gasne i gustinu čvrste faze, kao ni Rejnoldsov broj, već su bazirani prvenstveno na odnosu protoka čvrste i gasne faze m^* .

4.6.1 Vrednost koeficijenta trenja f_m u zavisnosti od usvojenog parametra A za model Dogina i Lebedeva [150]

U radu [160] dat je dijagram, koji sadrži podatke različitih autora [147], [151], [162], i na kojem je prikazana zavisnost eksperimentalnih i izračunatih vrednosti Fanning-ovog

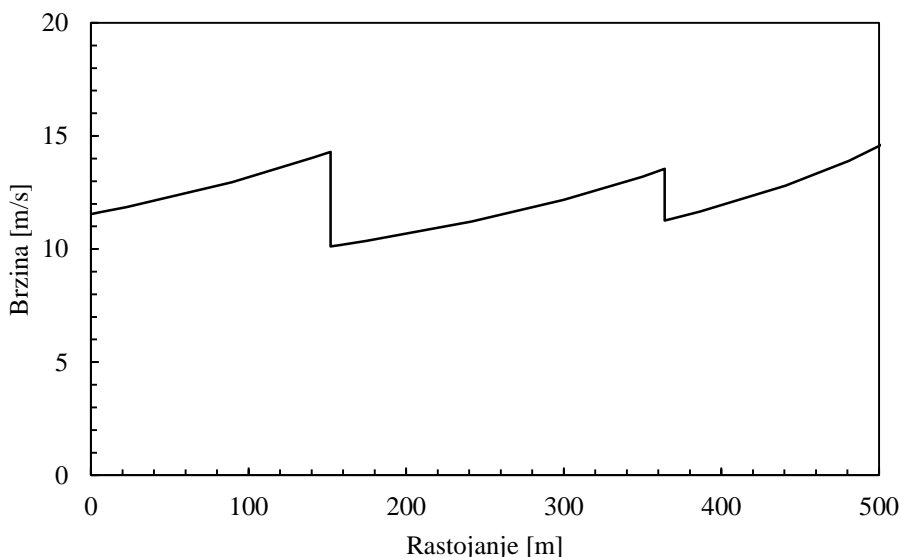
Kako se navodi u [160], vrednosti koeficijenta trenja prema [162] su znatno veće od onih prema [151] zbog nestacionarnog režima transporta.

S obzirom na to da su pojave pri pneumatskom transportu veoma raznovrsne i kompleksne da se izraze jednom korelacijom, njihova primena je još uvek u domenu industrijskog projektovanja u cilju obezbeđivanja isključivo nesmetanog rada. Pokušaji da se empirijska iskustva uopšte i pojednostave još uvek nisu naišla na uspeh, međutim korelacija Dogina i Lebedeva [150] (za $A = 1,4 \cdot 10^{-6}$), daje rezultate koji su u potpunosti u saglasnosti sa ranije ispitivanim slučajevima.

4.6.2 Promena brzine vazduha duž cevovoda dobijena proračunom za model Dogina i Lebedeva

Promena brzine vazduha duž cevovoda, dobijena proračunom za cevovod 1 korišćenjem modela Dogina i Lebedeva [150] (za $A = 1,4 \cdot 10^{-6}$) prikazana je na slici 4.16.

Brzina raste duž pojedinih deonica cevovoda zbog pada pritiska i kompresibilnosti (smanjenja gustine) vazduha, pri čemu na mestima povećanja prečnika cevovoda dolazi do pada brzine zbog povećanja poprečnog preseka.



Slika 4.16 Brzina vazduha duž transportnog cevovoda 1 dobijena korišćenjem modela Dogina i Lebedeva [150] za $A = 1,4 \cdot 10^{-6}$ [187]

Proračunom za cevovod 1 dobijena je minimalna vrednost brzine od 10 m/s na početku deonice, dok maksimalna brzina nije prelazila 14,5 m/s [187].

Pri brzinama manjim od 10 m/s dolazi do taloženja pepela u transportnom cevovodu, odnosno do zastoja i zagušenja [116], što se prostom analizom može odbaciti kao potencijalni problem u razmatranom slučaju. Međutim, uključivanjem Mills-ovog dijagrama (slika 4.8) u analizu, jasno je da je brzina od 10 m/s može uzrokovati probleme prilikom transporta, budući da se minimalna brzina transporta, za razmatrani pepeo lignita Kolubara, kreće u granicama od 10,3 do 15 m/s.

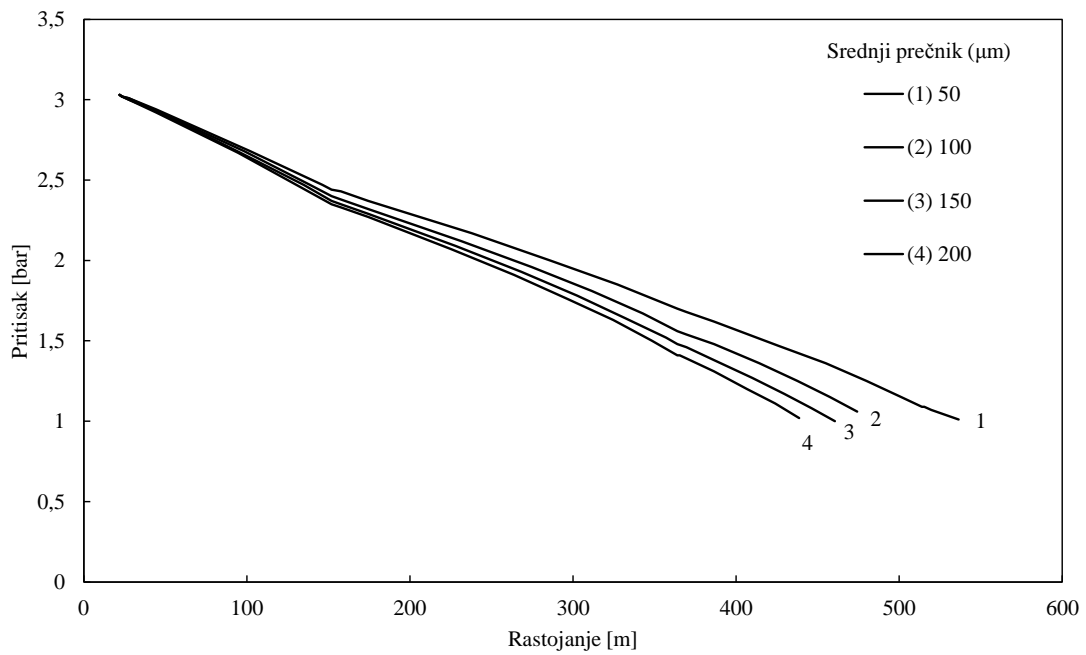
4.7 Uticaj dimenzija i gustine pepela na rad sistema pneumatskog transporta

Osnovni problem u radu sistema pneumatskog transporta u termoelektrani predstavlja promenljivost karakteristika i udela pepela u uglju. Iz tog razloga je korišćenjem formiranog modela zasnovanog na korelaciji Dogina i Lebedeva [150] (za $A = 1,4 \cdot 10^{-6}$) na primeru cevovoda 1 izvršen proračun promene pritiska duž cevovoda i analiziran maksimalno mogući transportni kapacitet sistema u zavisnosti od srednjeg prečnika i fizičke gustine čestica pepela za nekoliko slučajeva. Zavisnost pada pritiska od srednjeg prečnika čestica pepela određena je za fiksiranu vrednost stvarne gustine pepela 2100 kg/m^3 i prikazana je na slici 4.17.

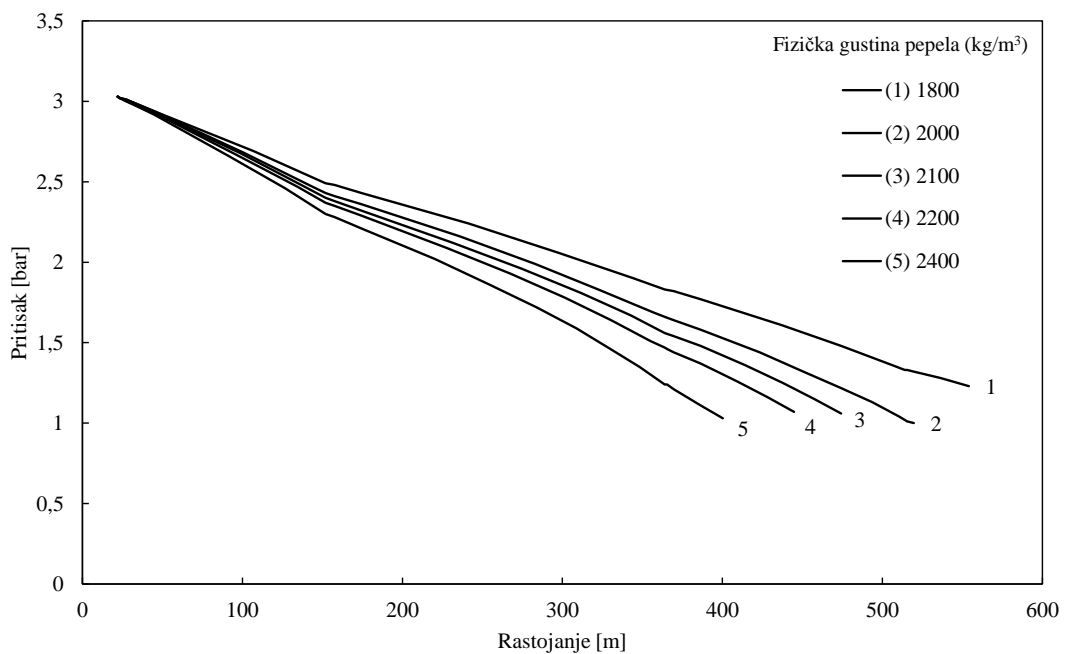
Pokazano je da povećanje prečnika sa $100 \mu\text{m}$ na $200 \mu\text{m}$ smanjuje transportnu dužinu za približno 40 m, dok smanjenje sa $100 \mu\text{m}$ na $50 \mu\text{m}$ povećava za približno 60 m [187].

S druge strane, zavisnost pada pritiska od stvarne gustine čestica pepela određena je za fiksiranu vrednost srednjeg prečnika čestica od $100 \mu\text{m}$ i prikazana je na slici 4.18.

Poređenjem rezultata sa dijagrama (slike 4.17 i 4.18), može se zaključiti da varijacije gustine, koje su veoma izražene kod pepela od lignita, imaju znatno veći uticaj na maksimalno ostvarivu dužinu pneumatskog transporta, nego što je to slučaj kod mogućih promena prečnika čestica.



Slika 4.17 Zavisnost pada pritiska od srednjeg prečnika čestica pepela (proračun primenom modela Dogina i Lebedeva [150] za $A = 1,4 \cdot 10^{-6}$) [187]



Slika 4.18 Zavisnost pada pritiska od stvarne gustine pepela (proračun primenom modela Dogina i Lebedeva [150] za $A = 1,4 \cdot 10^{-6}$) [187]

Izraz za određivanje koeficijenta trenja (3.16), a posledično i pada pritiska, uzima u obzir član $(d_p / D)^{0,1}$, pri čemu je uticaj prečnika čestica smanjen usled eksponenta 0,1. Sa porastom prečnika cevi dolazi do dodatnog smanjenja navedenog uticaja. Nasuprot tome, stvarna gustina ima linearan uticaj na koeficijent trenja [187].

5 Zaključak

Eksperimentalna istraživanja pneumatskog transporta rađena su još davne 1924. godine, međutim pokušaj da se numeričkim modelom izvrši proračun i predviđanje ponašanja pneumatskog transporta prvi put je zabeležen tek 1982. godine.

Iako su sistemi pneumatskog transporta u osnovi vrlo jednostavni, još uvek se nije došlo do opštih i visoko pouzdanih rešenja za njihovo projektovanje, naročito kada je potrebno ostvariti visoko pouzdan transport velikog kapaciteta, koji će biti otporan na sve izazove. Poteškoće u radu ovih sistema su nezaobilazne kada se radi o transportu specifičnih materijala neujednačenog sastava i izuzetno abrazivnih svojstava, kao što je leteći pepeo. Tada nije moguće, odnosno nije ekonomski isplativo, primeniti razređen transport, već se teži dobro optimizovanom sistemu ugušćenog pneumatskog transporta, koji obezbeđuje veći kapacitet uz daleko manje brzine, što direktno utiče na manje habanje opreme i manju degradaciju transportovanog materijala. Zbog toga je neophodno sprovesti detaljna istraživanja za svaki poseban slučaj.

Doktorskom disertacijom sagledan je problem pneumatskog transporta pepela nastalog sagorevanjem lignita Kolubara u termoenergetskim postrojenjima. Ono što posebno izdvaja ovaj rad jeste to, da su za potrebe verifikacije formiranog numeričkog modela za proračun pneumatskog transporta, obavljena sveobuhvatna eksperimentalna ispitivanja realnog sistema pneumatskog transporta velikog kapaciteta u okviru termoelektrane pri radnim uslovima.

Pored toga, detaljnim laboratorijskim ispitivanjima fizičko-hemijskih i aeracionih karakteristika uzoraka pepela, utvrđena je pripadnost graničnom području grupa A i B u Geldart-ovom dijagramu, kojem odgovara otežan ugušćeni transport, tj. nemogućnost pneumatskog transporta u konvencionalnim sistemima. Zbog toga je izvršena i klasifikacija prema novijim, preciznijim i specijalizovanim dijagramima različitih autora, koji se za razliku od Geldart-ovog dijagrama direktno odnose na mogući režim pneumatskog transporta.

Na osnovu sprovedenih istraživanja u okviru disertacije, može se zaključiti sledeće:

- Dostupni literaturni izvori ne pružaju dovoljno podataka o svim relevantnim karakteristikama pepela lignita Kolubara za efikasan proračun i predviđanje ponašanja sistema njegovog pneumatskog transporta, analizu i unapređenje ovih

sistema, kao ni za klasifikaciju u cilju ocene moguće primene u različitim industrijskim granama.

- Ispitivanja fizičkih i hemijskih karakteristika uzoraka pepela lignita Kolubara pokazali su izrazitu heterogenost u pogledu svih ispitivanih svojstava, kako po srednjem prečniku čestica koji se kreće u širokim granicama (95-290 μm), čak i u okviru jednog uzorka, tako i po hemijskom sastavu za sve uzorke (kvarc 10,39-72,72%, SiO_2 52,28-65,5%, Al_2O_3 18,57-26,88%, Fe_2O_3 4,59-6,54%, CaO 2,66-7,26% i MgO 1,3-2,55%), što se odrazilo i na vrednosti fizičke (1500-2490 kg/m^3) i nasipne gustine (559-1097 kg/m^3). Takođe, vizuelno je utvrđena i neujednačenost u obliku čestica. Razlike su posebno izražene prema mestima izdvajanja pepela u okviru termoelektrane, što je važno s aspekta definisanja uslova pneumatskog transporta.
- Poređenjem udela najzastupljenijih oksida (SiO_2 , Al_2O_3 i Fe_2O_3) sa dostupnim literaturnim podacima, razmatrani pepeo po sastavu najviše odgovara letećem pepelu iz Indije, Turske i Australije.
- Potpuna neujednačenost uzoraka pepela došla je do izražaja prilikom eksperimentalnih ispitivanja aeracionih karakteristika, prve kritične (minimalne) brzine fluidizacije i permeabilnosti. Uočeno je formiranje kanala kroz sloj pepela pri prostrujavanju vazduha pri brzinama oko prve kritične brzine fluidizacije, raslojavanje čestica pri početnoj visini sloja, barbotiranje na vrhu sloja i početak vertikalnog pneumatskog transporta za najsitnije čestice, dok krupnije i teže čestice pri tim brzinama još uvek nisu dostigle stanje fluidizacije. Minimalna brzina fluidizacije za ispitivane uzorke bila je u oblasti 1,37 - 3,85 cm/s , dok su se vrednosti permeabilnosti kretale u oblasti $(10,01 - 22,61) \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/(\text{Pa} \cdot \text{s})$.
- Iako nastaje od ugljeva niskog ranga, pepeo lignita Kolubara spada u klasu F prema ASTM standardu, koje odlikuju izražena pucolanska svojstva bitna za cementnu i građevinsku industriju. Prema evropskom standardu dominantan broj uzoraka pripada grupi A, dok neznatan broj grupi B. Indijski standard svrstava ovaj pepeo u grupu silikatnih primesa, klasifikacija odbora za primenu letećeg pepela pri Ujedinjenim nacijama u grupu siliko-aluminatnih, a klasifikacija prema R modulu u grupu alumino-silikatnih letećih pepela.

- Dijagrami različitih autora za procenu režima pneumatskog transporta takođe su potvrdili izrazito heterogene karakteristike pepela nastalog sagorevanjem lignita Kolubara. Geldart-ov dijagram pokazuje pripadnost ispitivanog pepela širokom području grupa A i B. Najveći broj uzoraka je na samoj granici između grupa A i B, ili pripada grupi B, što ukazuje na otežan ugušćeni transport, odnosno da ispitivani materijal nije moguće transportovati u ugušćenoj fazi konvencionalnim sistemima. Karakteristično za ovakve materijale je da se pri transportu u dugačkim cevovodima javlja njihovo razdvajanje prema veličini i gustini, a u ekstremnim situacijama dolazi do stvaranja naslaga u cevovodima, zatvaranja protočnog preseka i potpunog zastoja, što je upravo slučaj koji se javlja u razmatranoj termoelektrani. Dixon-ov dijagram jasno pokazuje većinsku pripadnost materijala grupi B, koji su grublji, što potkrepljuje prethodni zaključak da nisu skloni transportu u ugušćenoj fazi u konvencionalnim sistemima. Na Pan-ovom dijagramu se ponavlja situacija gde svi uzorci pripadaju graničnoj oblasti između režima, što ukazuje na nemogućnost jednoznačnog karakterisanja posmatranog materijala, a literaturni izvori za slučaj prelazne oblasti Pan-ovog dijagrama preporučuju razređeni transport. Dijagram Jones-a, koji koreliše faktor permeabilnosti i nasipnu gustinu materijala, zasigurno je pokazao da pepeo lignita Kolubara ne može biti transportovan u režimu fluidizovanog ugušćenog transporta, već pripada oblasti razređenog transporta. Međutim, bliskost graničnom području bi mogla podstaći na razmatranje potencijalno poželjnijeg režima ugušćenog transporta u vidu čepa, primenom nekonvencionalnih rešenja, kojim bi se ostvarile znatno manje brzine transporta i smanjilo habanje cevovoda i armature. Vrednosti permeabilnosti na Mills-ovom dijagramu, pokazuju da je pepeo lignita Kolubara na granici pneumatskog transporta u ugušćenoj i razređenoj fazi, kao i da su neophodne minimalne brzine transporta u granicama koje su približno od 10,3 do 15 m/s. Grublji leteći pepeo, kome pripada i razmatrani pepeo, transportuje u obliku otežanog ugušćenog transporta, pri kome može doći do formiranja čepova pepela i zagušenja, vibracija cevovoda i dinamičkih promena pritiska. Ovakav pepeo se može dobro fluidizovati, ali isto tako dolazi do njegove brze deaeracije i sleganja u kompaktne slojeve koji stvaraju velike sile trenja na

- zidovima transportnog cevovoda, pa je često potrebno primeniti razređeni transport i obezbediti temeljno pražnjenje cevovoda pre zaustavljanja transporta.
- Veliki trud i brojna istraživanja uticaja karakteristika materijala na pogodnost za određeni režim transporta, nisu doveli do klasifikacije koja bi dala mogućnost za uspostavljanja kritične veze protoka vazduha, protoka materijala i gradijenta pritiska. Još uvek nije jasno definisano kada za neke materijale primeniti razređenu, a kada ugušćenu fazu, i nijedna klasifikacija ne može sa sigurnošću odrediti ponašanje materijala na granicama između kategorija.
 - Verifikacijom ispitivanih modela utvrđeno je da model zasnovan na korelaciji Dogina i Lebedeva, i to za vrednost parametra $A = 1,4 \cdot 10^{-6}$, pokazuje najbolje slaganje sa eksperimentalnim rezultatima. Statističkom analizom dobijen je korelacioni odnos 93,99% za cevovod 1 i 91,33% za cevovod 2, odnosno srednje kvadratno odstupanje 9,58% za cevovod 1 i 13,66% za cevovod 2. Korelacija Dogina i Lebedeva ($A = 1,4 \cdot 10^{-6}$), dala je vrednosti Fanning-ovog koeficijenta trenja f_m u potpunosti saglasne sa ranije ispitivanim slučajevima dostupnim u literaturi.
 - Numeričkim proračunom industrijskog postrojenja za pneumatski transport u okviru razmatrane termoelektrane, zasnovanom na korelaciji Dogina i Lebedava, dobijena je minimalna vrednost brzine strujanja mešavine vazduha i pepela od 10 m/s, dok maksimalna vrednost nije prelazila 14,5 m/s. Ukoliko se u analizu uključi i Mills-ov dijagram, gde su za ispitivani pepeo utvrđene brzine od približno 10,3 do 15 m/s, kao jedan od osnovnih uzroka problema u razmatranom sistemu se mogu označiti upravo neodgovarajuće brzine strujanja.
 - Analiza uticaja dimenzija i gustine pepela na rad sistema pneumatskog transporta pokazala je da varijacije gustine, koje su veoma izražene kod pepela od lignita Kolubara (što pokazuje i varijacija gustina pojedinih frakcija u okviru istog uzorka), imaju znatno veći uticaj na maksimalno ostvarivu dužinu pneumatskog transporta od mogućih promena prečnika čestica.

Istraživanja sprovedena u okviru izrade disertacije dovela su do značajnih rezultata i doprinosa, kako s naučne, tako i sa praktične tačke gledišta:

- Potpuno je sagledana izrazita heterogenost pepela lignita Kolubara, u pogledu svih ispitivanih svojstava, i zaključeno da ne postoji mogućnost njegovog jednoznačnog definisanja.
- Nepotpuni podaci o karakteristikama pepela lignita Kolubara dopunjeni su neophodnim parametrima za efikasno predviđanje ponašanja sistema pneumatskog transporta i klasifikaciju, i formirana je baza podataka koja će biti dobra osnova za dalja istraživanja.
- Prvi put je izvršena klasifikacija lignita pepela Kolubara prema indijskom standardu, koji svrstava ovaj pepeo u grupu silikatnih primesa, odnosno prema klasifikaciji odbora za primenu letećeg pepela pri Ujedinjenim nacijama, gde spada u grupu siliko-aluminatnih, ovaj doprinos omogućuje buduće poređenje i preuzimanje dobre prakse za primenu ispitivanog pepela iz različitih izvora.
- Istraživanjima prikazanim u disertaciji, detaljno su ispitana svojstva pepela nastalog sagorevanjem spršenog lignita Kolubara u termoelektrani, koja su od značaja za predviđanje ponašanja sistema pneumatskog transporta, njegovu analizu i moguća unapređenja rada. Ranija istraživanja nisu uzimala u obzir faktor permeabilnosti, zbog čega se sa velikom pažnjom pristupilo ispitivanju aeracionih svojstava uzoraka pepela, pre svega kroz sagledavanje pojava koje prate proces fluidizacije. Vrlo je važan zaključak disertacije, što je i bila polazna pretpostavka, da se permeabilnost pokazala kao nezaobilazan parametar prilikom analize rada i definisanja pneumatskog transporta pepela lignita Kolubara.
- Još jedan od doprinosa rada predstavlja analiza mogućeg režima pneumatskog transporta za pepeo lignita Kolubara koristeći specijalizovane dijagrame različitih autora. Zaključeno je da smernice za projektovanje ovih sistema i njihovo upravljanje, kao i uzroke problema u postojećim, prvo treba tražiti u aeracionim svojstvima (permeabilnosti) u kombinaciji sa različitim klasifikacijama materijala, kao što su Geldartov-a, Dixon-ova i Pan-ova.
- Dugotrajna i iscrpna istraživanja još uvek nisu dovela do visoko pouzdanih rešenja za projektovanje sistema pneumatskog transporta velikog kapaciteta

otpornog na sve izazove, pri transportu specifičnog materijala kao što je leteći pepeo neujednačenog sastava. Većina modela za proračun pneumatskog transporta zasnovana je na numeričkim simulacijama ili ispitivanjima na pilot postrojenjima, dok su pojave pri pneumatskom transportu veoma raznovrsne i kompleksne. Pokušaji da se empirijska iskustva uopšte, pojednostave i izraze jednom korelacijom još uvek nisu naišla na uspeh, a njihova primena je i dalje u domenu obezbeđivanja isključivo nesmetanog rada industrijskih postrojenja. U tom smislu, doprinos ovog rada ogleda se i u sprovođenju opsežnih eksperimentalnih ispitivanja na realnom postrojenju pri radnim uslovima, kako bi se formirao pouzdan model za proračun i analizu rada sistema za pneumatski transport pepela lignita Kolubara velikog kapaciteta i velike dužine. Analizirano je nekoliko korelacija različitih autora i primenjena dva modela, pri čemu je formiran model koji daje rezultate u potpunosti u saglasnosti sa eksperimentalnim merenjima.

- Koristeći razvijeni model izvedena je analiza uticaja dimenzija i gustine pepela na rad sistema pneumatskog transporta. Pokazano je da varijacija gustine ima daleko veći uticaj na maksimalno ostvarivu dužinu pneumatskog transporta pepela lignita Kolubara, od mogućih promena prečnika čestica, što je izuzetno bitan podatak za buduća istraživanja.
- Na kraju, treba istaći da je na osnovu usvojenog modela za proračun pneumatskog transporta, verifikovanog rezultatima merenja na industrijskom postrojenju, razvijen softverski paket u programskom jeziku FORTRAN, koji se može koristiti za predviđanje ponašanja, projektovanje parametara ovog i sličnih sistema pneumatskog transporta.

Do sada je izveden veliki broj numeričkih simulacija pneumatskog transporta, zahvaljujući manjim troškovima i dostupnosti računarskih paketa velikom broju istraživača. Nažalost, većina istraživača često nije svesna stvarnih izazova eksperimentalnih ispitivanja i problema koji se javljaju u realnom postrojenju u toku pneumatskog transporta. Ukoliko se pažljivo sagledaju sve činjenice, biće jasno da postoji velika potreba za ozbiljnim eksperimentalnim istraživanjima u svim oblastima koje se tiču pneumatskog transporta, kojima će verifikovati ili opovrgnuti brojne

simulacije. Ovo je naročito bitno kada se radi o materijalima neujednačenih i promenljivih karakteristika, što je slučaj sa pepelom lignita Kolubara. Kao što je više puta istaknuto u radu, nedorečenosti u oblasti pneumatskog transporta je mnogo, neodgovorenih pitanja još više, a previše ozbiljnih izazova je pred nama da bismo potpuno odgonetnuli problem pneumatskog transporta.

Dalji istraživački rad se mora usmeriti ka dugotrajnim eksperimentalnim ispitivanjima realnih postrojenja i transportovanih materijala, kako bi se dublje i temeljnije sagledale i razumele pretpostavke uvršćene u postojeće korelacije i modele. Novi eksperimenti moraju biti usavršeni tako da je fokus na svega jednom ili dva ključna parametra, kako bi osnovni fizički zakoni bili potkrepljeni, i da bi se osigurala valjana primena osnovnih fizičkih zakona procesa u modelu, naročito trenja čestica o zid cevi. Jedan od parametara koji bi trebalo pratiti je Frudov broj, čija konstantna vrednost obezbeđuje minimizaciju gubitka pritiska i bespotrebnog utroška energije, odnosno utiče na smanjenje erozije i degradacije čestica.

Da bi se sve ovo sprovelo u delo, pre svega moraju biti istražene oblasti koje na prvi pogled nemaju direktne veze sa pneumatskim transportom i pokušati ih uklopiti ih u razmatranja. Zbog toga je od suštinske važnosti istraživanje i karakterizacija letećeg pepela u cilju efikasnijeg upravljanja, transporta, što će svakako poslužiti kao pokazatelj mogućnosti za dalju primenu, a za sagledavanje samog procesa sagorevanja lignita.

Klinzing, veteran u ovoj oblasti, predviđa da ćemo tek za 30 do 40 godina uspeti da napravimo ozbiljniji korak ka tom cilju. Do tada, preostaje nam veliki izazov i motiv, puno marljivog rada, brojna eksperimentalna ispitivanja, često uzorkovanje, stvaranje ozbiljne baze podataka i nada da ćemo uspeti da pronađemo baš taj ključni parametar koji će doprineti rešavanju problema upravljanja letećim pepelom. Uporedo sa rešavanjem ovog problema, mora se raditi na razvoju novih, ekonomski i ekološki opravdanih alternativnih primena ovog nusproizvoda.

6 Literatura

- [1] R. Sikka and B. D. Kansal, "Characterization of thermal power-plant fly ash for agronomic purposes and to identify pollution hazards," *Bioresour. Technol.*, vol. 50, no. 3, pp. 269–273, 1994.
- [2] K. S. Sajwan, A. K. Alva, T. Punshon, and I. Twardowska, *Coal combustion byproducts and environmental issues*, vol. 81. Springer, 2006.
- [3] H. Nalbandian, "Trace element emissions from coal," *Profiles*, p. 89, 2012.
- [4] T. Wang and J. Watson, "Scenario analysis of China's emissions pathways in the 21st century for low carbon transition," *Energy Policy*, vol. 38, no. 7, pp. 3537–3546, 2010.
- [5] S. K. Guttikunda and P. Jawahar, "Atmospheric emissions and pollution from the coal-fired thermal power plants in India," *Atmos. Environ.*, vol. 92, pp. 449–460, 2014.
- [6] F. Birol, "Key World energy statistics." IEA Publications, International Energy Agency, rue de la Federation, Paris, France, p. 51, 2018.
- [7] U.S. Energy Information Administration (EIA), "International Energy Outlook 2017 Washington, DC: US Energy Information Administration, Report Number: DOE/EIA-0484(2017)," Washington, DC 20585, 2017.
- [8] Y. Singh, "Fly Ash utilization in India," 2011. [Online]. Available: <http://www.wealthywaste.com/fly-ash-utilization-in-india>. [Accessed: 31-Jul-2018].
- [9] D. Matić and Z. Čolić, "Ugalj strateški energent," *Kolubarski Sind.*, vol. 168, 2018.
- [10] EPS (Elektroprivreda Srbije), "Tehnički godišnjak." 2015.
- [11] M. O. Obradović, "Istraživanje i komparacija uticaja karakteristika ugljeva niske toplotne vrednosti na njihovu meljivost i parametre procesa mlevenja," University of Belgrade, Faculty of Mechanical Engineering, 2015.
- [12] J. Groppo, "1 - An introduction to the nature of coal," in *Coal Combustion Products (CCP's)*, T. Robl, A. Oberlink, and R. Jones, Eds. Woodhead Publishing, 2017, pp. 3–20.
- [13] J. Nelson, "Assessment of mineral species associated with coal," *BCURA Mon.*

- Bull.*, vol. 17, pp. 43–55, 1953.
- [14] W. Spackman and R. G. Moses, “Nature and occurrence of ash forming minerals in anthracite,” 1960.
- [15] D. Osborne, *The Coal Handbook: Towards Cleaner Production: Volume 2: Coal Utilisation*. Elsevier, 2013.
- [16] M. Izquierdo and X. Querol, “Leaching behaviour of elements from coal combustion fly ash: An overview,” *Int. J. Coal Geol.*, vol. 94, pp. 54–66, 2012.
- [17] S. C. Tsai, *Fundamentals of coal beneficiation and utilization*. Elsevier Science & Technology, 1982.
- [18] S. Fiscor, “US preparation plant census 2015,” *Coal Age*, vol. 120, no. 10, pp. 26–30, 2015.
- [19] M. rudarstva i energetike Vlada Republike Srbije, *Strategija razvoja energetike Republike Srbije do 2015. godine*. Serbia: („Službeni glasnik RS” br. 57/11, 80/11 - ispravka, 93/12 i 124/12, 2015, pp. 1–87.
- [20] World Energy Council, “World energy resources 2016,” 2016.
- [21] D. M. Kisić, S. R. Miletić, V. D. Radonjić, S. B. Radanović, J. Z. Filipovic, and I. A. Gržetić, “Prirodna radioaktivnost uglja i letećeg pepela u termoelektrani ‘Nikola Tesla B,’” *Hem. Ind.*, vol. 67, no. 5, pp. 729–738, 2013.
- [22] European Association for Coal and Lignite (EURACOAL), “Serbia.” [Online]. Available: <https://euracoal.eu/info/country-profiles/serbia/>.
- [23] D. Životić *et al.*, “Petrological and geochemical composition of lignite from the D field, Kolubara basin (Serbia),” *Int. J. Coal Geol.*, vol. 111, pp. 5–22, 2013.
- [24] JP “Elektroprivreda Srbije,” “Proizvodnja uglja.” [Online]. Available: <http://eps.rs/Poslovanje-ugalj>.
- [25] Energy Mining Watch South & East Europe, “SEE, energy scenarios 2050 and coal fired power plants - Environment Energy Mining Watch Balkans,” 2015. [Online]. Available: <https://www.esiasee.eu/see-energy-scenarios-2050-and-coal-fired-power-plants/>. [Accessed: 08-Jan-2018].
- [26] JP “Elektroprivreda Srbije,” “Kopovi.” [Online]. Available: <http://eps.rs/lat/Poslovanje-ugalj/Pages/Kopovi.aspx>.
- [27] M. Ercegovac, D. Životić, and A. Kostić, “Genetic-industrial classification of brown coals in Serbia,” *Int. J. Coal Geol.*, vol. 68, no. 1–2 SPEC. ISS., pp. 39–

- 56, 2006.
- [28] S. V Vassilev, R. Menendez, D. Alvarez, M. Diaz-Somoano, and M. R. Martinez-Tarazona, "Phase-mineral and chemical composition of coal fly ashes as a basis for their multicomponent utilization. 1. Characterization of feed coals and fly ashes," *Fuel*, vol. 82, no. 14, pp. 1793–1811, 2003.
- [29] ASTM, "ASTM C618-17 Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete," *ASTM*, 2017.
- [30] "EN 450-1: Fly Ash for Concrete-Part 1: Definitions, specifications and conformity criteria," 2012.
- [31] B. S. EN, "197-1: 2011," *Cem. Compos. Specif. Conform. Criteria Common Cem. London, Engl. Br. Stand. Inst.*, 2011.
- [32] D. Mills and V. K. Agarwal, *Pneumatic Conveying Systems: Design, Selection, Operation and Troubleshooting with Particular Reference to Pulverised Fuel Ash*. Trans Tech Publications, 2001.
- [33] A. L. Page, A. A. Elsewi, and I. R. Straughan, "Physical and chemical properties of fly ash from coal-fired power plants with reference to environmental impacts," in *Residue Reviews*, vol. 124, New York, NY: Springer New York, 1979, pp. 83–120.
- [34] D. C. Adriano, A. L. Page, A. A. Elsewi, A. C. Chang, and I. Straughan, "Utilization and Disposal of Fly Ash and Other Coal Residues in Terrestrial Ecosystems: A Review 1," *J. Environ. Qual.*, vol. 9, no. 3, pp. 333–344, 1980.
- [35] S. Đurić, P. Stanojević, D. Đaković, and A. Jovović, "The study on the effect of fractional composition and ash particle diameter on the ash collection efficiency at the electrostatic precipitator," *Chem. Ind. Chem. Eng. Quarterly/CICEQ*, vol. 16, no. 3, pp. 229–236, 2010.
- [36] R. C. Joshi and R. . Lohita, *Fly ash in concrete: production, properties and uses*. 1997.
- [37] C. Heidrich, H. Feuerborn, and A. Weir, "Coal Combustion Products : a Global Perspective," *World Coal Ash*, p. 17, 2013.
- [38] R. S. Blissett and N. A. Rowson, "A review of the multi-component utilisation of coal fly ash," *Fuel*, vol. 97, pp. 1–23, 2012.
- [39] S. Jala and D. Goyal, "Fly ash as a soil ameliorant for improving crop

- production--a review,” *Bioresour. Technol.*, vol. 97, no. 9, pp. 1136–1147, 2006.
- [40] American Coal Ash Association (ACAA), “Fly Ash.” .
- [41] J. Tomeczek and H. Palugniok, “Kinetics of mineral matter transformation during coal combustion,” *Fuel*, vol. 81, no. 10, pp. 1251–1258, 2002.
- [42] M. Ahmaruzzaman, “A review on the utilization of fly ash,” *Prog. Energy Combust. Sci.*, vol. 36, no. 3, pp. 327–363, 2010.
- [43] W. R. Roy, R. G. Thiery, R. M. Schuller, and J. J. Suloway, “Coal fly ash: a review of the literature and proposed classification system with emphasis on environmental impacts,” *Environ. Geol. Notes*, pp. 1–78, 1981.
- [44] A. Sarkar, R. Rano, G. Udaybhanu, and A. K. Basu, “A comprehensive characterisation of fly ash from a thermal power plant in Eastern India,” *Fuel Process. Technol.*, vol. 87, no. 3, pp. 259–277, 2006.
- [45] İ. Acar, “Characterization and utilization potential of class F fly ashes,” Middle East Technical University, 2013.
- [46] M. Životić, D. Stojiljković, A. Jovović, and V. Čudić, “Potential usage of fly and bottom ash from thermal power plant ”Nikola Tesla” landfill, Serbia,” *Hem. Ind.*, vol. 66, no. 3, pp. 403–412, 2012.
- [47] G. L. Fisher *et al.*, “Physical and Morphological Studies of Size-Classified Coal Fly Ash,” *Environ. Sci. Technol.*, vol. 12, no. 4, pp. 447–451, 1978.
- [48] A. Georgakopoulos, A. Filippidis, and A. Kassoli-Fournaraki, “Morphology and trace element contents of the fly ash from Main and Northern lignite fields, Ptolemais, Greece,” *Fuel*, vol. 73, no. 11, pp. 1802–1804, 1994.
- [49] M. Šešlija, A. Rosić, N. Radović, M. Vasić, M. Đogo, and M. Jotić, “Properties of fly ash and slag from the power plants,” *Geol. Croat.*, vol. 69, no. 3, pp. 317–324, 2016.
- [50] L. L. Baxter, “The Evolution of Mineral Particle-Size Distributions During Early Stages of Coal Combustion,” *Prog. Energy Combust. Sci.*, vol. 16, no. 4, pp. 261–266, 1990.
- [51] D. Dunn-Rankin, “Kinetic Model for Simulating the Evolution of Particle Size Distributions During Char Combustion,” *Combust. Sci. Technol.*, vol. 58, no. 4–6, pp. 297–314, 1988.
- [52] D. Dunn-Rankin and A. R. Kerstein, “Influence of ash on particle size

- distribution evolution during coal combustion,” *Combust. Flame*, vol. 74, no. 2, pp. 207–218, 1988.
- [53] D. J. Holve, “In Situ Measurements of Flyash Formation from Pulverized Coalt,” *Combust. Sci. Technol.*, vol. 44, no. 5–6, pp. 269–288, 1986.
- [54] S. G. Kang, J. J. Helble, A. F. Sarofim, J. M. Bei, A. F. Sarofim, and J. M. Beér, “Time-resolved evolution of fly ash during pulverized coal combustion,” *Symp. Combust.*, no. small D, pp. 231–238, 1989.
- [55] M. Neville, R. J. Quann, B. S. Haynes, and A. F. Sarofim, “Vaporization and condensation of mineral matter during pulverized coal combustion,” *Eighteenth Symp. Combust.*, pp. 1267–1274, 1981.
- [56] P. Taylor, L. J. Wibberley, and T. F. Wall, “An Investigation of Factors Affecting the Physical Characteristics of Flyash Formed in a Laboratory Scale Combustor An Investigation of Factors Affecting the Physical,” *Combust. Sci. Technol.*, no. April 2013, pp. 37–41, 1986.
- [57] M. Neville and A. F. Sarofim, “The fate of sodium during pulverized coal combustion,” *Fuel*, vol. 64, no. 3, pp. 384–390, 1985.
- [58] L. L. Baxter, “Char fragmentation and fly ash formation during pulverized-coal combustion,” *Combust. Flame*, vol. 90, no. 2, pp. 174–184, 1992.
- [59] S. V Vassilev and C. G. Vassileva, “A new approach for the classification of coal fly ashes based on their origin, composition, properties, and behaviour,” *Fuel*, vol. 86, no. 10, pp. 1490–1512, 2007.
- [60] O. Bayat, “Characterisation of Turkish fly ashes,” *Fuel*, vol. 77, no. 9–10, pp. 1059–1066, 1998.
- [61] S. V. Vassilev and C. G. Vassileva, “Mineralogy of combustion wastes from coal-fired power stations,” *Fuel Process. Technol.*, vol. 47, no. 3, pp. 261–280, 1996.
- [62] D. N. Singh and P. K. Kolay, “Simulation of ash-water interaction and its influence on ash characteristics,” *Prog. Energy Combust. Sci.*, vol. 28, no. 3, pp. 267–299, 2002.
- [63] R. P. Gupta, T. F. Wall, I. Kajigaya, S. Miyamae, and Y. Tsumita, “Computer-controlled scanning electron microscopy of minerals in coal - Implications for ash deposition,” *Prog. Energy Combust. Sci.*, vol. 24, no. 6, pp. 523–543, 1998.

- [64] A. H. Miguel, "Studies of Gas-Solid Reactions of Environmental Significance: I. Pyrene Adsorption Onto Fly Ash. Ii. Thiol Oxidation and Adsorption by Activated Carbon," University of Illinois at Urbana-Champaign, 1976.
- [65] D. F. S. Natusch *et al.*, "Characterization of trace elements in fly ash," in *Proceedings, International Conference on Trace Metals in the Environment. Toronto, Canada, 1975*, vol. 2, no. Part 2, p. 535.
- [66] M. Ilic, C. Cheeseman, C. Sollars, and J. Knight, "Mineralogy and microstructure of sintered lignite coal fly ash," *Fuel*, vol. 82, no. 3, pp. 331–336, 2003.
- [67] V. Sakorafá, K. Michailidis, and F. Burragato, "Mineralogy, geochemistry and physical properties of fly ash from the Megalopolis lignite fields, Peloponnese, Southern Greece," *Fuel*, vol. 75, no. 4, pp. 419–423, 1996.
- [68] R. P. Kelly, "Parallels and Nonconformities in Worldwide Fly Ash Classification: The Need for a Robust, Universal Classification System for Fly Ash," in *2015 World of Coal Ash (WOCA) Conference*, 2015.
- [69] T. U. of K. C. for A. E. (CAER), "Kentucky Ash Education Site." [Online]. Available: <http://www.caer.uky.edu/kyasheducation/glossary.shtml>.
- [70] The National Standards Body of India, "IS 3812-1, Pulverized Fuel Ash - Part 1 : For Use as Pozzolana in Cement, Cement Mortar and Concrete," *Bur. Indian Stand.*, 2013.
- [71] The National Standards Body of India, "IS 3812-2, Pulverized Fuel Ash - Part 2 : For Use as Admixture in Cement Mortar and Concrete," *Bur. Indian Stand.*, 2013.
- [72] ECOBA, "Production and Utilisation of CCPs in 2010 in Europe (EU 15)," no. Eu 15, p. 103932, 2010.
- [73] A. C. A. A. (ACAA), "2016 Coal Combustion Product (CCP) Production & Use Survey Report." 2016.
- [74] Central Electricity Authority (CEA), "Report on Fly Ash Generation at Coal/Lignite Based Thermal Power Stations and its Utilization in the Country for the year 2016-17," no. December, pp. 1–63, 2017.
- [75] R. Sommerville, R. Blissett, N. Rowson, and S. Blackburn, "Producing a synthetic zeolite from improved fly ash residue," *Int. J. Miner. Process.*, vol. 124, pp. 20–25, 2013.

- [76] B. E. Scheetz and R. Earle, "Utilization of fly ash," *Curr. Opin. Solid State Mater. Sci.*, vol. 3, no. 5, pp. 510–520, 1998.
- [77] Serbia Energy Magazine, "Leteći pepeo minimalno iskorišćen u Srbiji," 2011. [Online]. Available: <https://serbia-energy.eu/sr/letei-pepeo-minimalno-iskorien-u-srbiji/>.
- [78] D. Alkaya, "The investigation of fly ash use in soil improvement," *Electron. J. Constr. Technol.*, vol. 5, no. 1, pp. 61–72, 2009.
- [79] Institut za ispitivanje materijala, "Pepeli u Srbiji," Beograd, 2006.
- [80] STAG AG, "CE Thermal Power Plant Nicola Tesla B: Analysis of the existing pneumatic conveyor systems for various flue dusts (Airpreheater LUV / Flue gas duct hoppers KDG / Electrofiltre EF)," 2012.
- [81] D. Geldart, "Types of gas fluidization," *Powder Technol.*, vol. 7, no. 5, pp. 285–292, 1973.
- [82] Energoprojekt Entel, "Idejni projekat, Sveska 1.1, Unutrašnji transport pepela i šljake," in *Studija opravdanosti i idejni projekat rekonstrukcije sistema za transport i odlaganje pepela i šljake TE Nikola Tesla B, .*
- [83] Rudarski institut, "Izveštaj o ispitivanjima karakteristika pepela i šljake termoelektrane Nikola Tesla B – Obrenovac," Beograd, 2007.
- [84] M. Stanojević, D. Radić, A. Jovović, M. Pavlović, and V. Karamarković, "The influence of variable operating conditions on the design and exploitation of fly ash pneumatic transport systems in thermal power plants," *Brazilian J. Chem. Eng.*, vol. 25, no. 4, pp. 789–797, 2008.
- [85] Rudarski Institut, "Izveštaj o ispitivanju letećeg pepela i uglja iz TE Kolubara, Vel. Crljeni," Beograd, 1978.
- [86] B. Jaćimović, S. Genić, N. Budimir, and M. Jarić, "Laboratorijska ispitivanja aeracionih svojstava pepela iz kotlarnice Kolubara – Prerada," 2006.
- [87] G. E. Klinzing, "Historical Review of Pneumatic Conveying," *KONA Powder Part. J.*, no. July, pp. 1–10, 2017.
- [88] P. W. Wypych, "Pneumatic conveying of powders over long distances and at large capacities," *Powder Technol.*, vol. 104, no. 3, pp. 278–286, 1999.
- [89] J. Gasterstadt, "Die Experimentelle Unterschung des Pneumatischen fosterorgays," *Forsch. Arb. Ingeunear Wes.*, vol. 68, pp. 265–280, 1924.

- [90] L. Sanchez, N. Vasquez, G. E. Klinzing, and S. Dhodapkar, "Characterization of bulk solids to assess dense phase pneumatic conveying," *Powder Technol.*, vol. 138, no. 2–3, pp. 93–117, 2003.
- [91] R. Pan, "Material properties and flow modes in pneumatic conveying," *Powder Technol.*, vol. 104, no. 2, pp. 157–163, 1999.
- [92] G. E. Klinzing, "A review of pneumatic conveying status, advances and projections," *Powder Technol.*, vol. 333, pp. 78–90, 2018.
- [93] T. Deng and M. S. A. Bradley, "Determination of a particle size distribution criterion for predicting dense phase pneumatic conveying behaviour of granular and powder materials," *Powder Technol.*, vol. 304, pp. 32–40, 2016.
- [94] D. Mills, "Pneumatic Conveying Design Guide," p. 637, 2004.
- [95] C. T. Crowe, *Multiphase Flow Handbook*, vol. 1218, no. 36. 2006.
- [96] G. E. Klinzing, F. Rizk, R. Marcus, and L. S. Leung, *Pneumatic conveying of solids: a theoretical and practical approach*, vol. 8. Springer Science & Business Media, 2011.
- [97] S. N. Oka, *Sagorevanje u fluidizovanom sloju: Procesi i primena*. Institut za nuklearne nauke VINČA, 1993.
- [98] M. Šašić, *Transport fluida i čvrstih materijala cevima*. Naučna knjiga, 1990.
- [99] J. Klintworth and D. Marcus, R, "A review of low-velocity pneumatic conveying systems," 1985.
- [100] C. Crnojević, *Transport čvrstih materijala fluidima*. Mašinski fakultet, 2002.
- [101] M. Horio, "Fluidization science, its development and future," *Particuology*, vol. 8, no. 6, pp. 514–524, 2010.
- [102] C. E. Jahnig, D. L. Campbell, and H. Z. Martin, "History of fluidized solids development at EXXON," in *Fluidization*, Springer, 1980, pp. 3–24.
- [103] R. D. Toomey, "Gaseous fluidization of solid particles," *Chem. Eng. Progr.*, vol. 48, pp. 220–226, 1952.
- [104] J. F. Davidson, "Symposium on fluidization-discussion," *Trans. Inst. Chem. Eng.*, vol. 39, pp. 223–240, 1961.
- [105] T. B. Anderson and R. Jackson, "Fluid mechanical description of fluidized beds. Equations of motion," *Ind. Eng. Chem. Fundam.*, vol. 6, no. 4, pp. 527–539, 1967.

- [106] L. Reh, "Fluidized bed processing," *Chem. Eng. Prog.*, vol. 67, no. 2, p. 58, 1971.
- [107] Y. Li and M. Kwauk, "The dynamics of fast fluidization," in *Fluidization*, Springer, 1980, pp. 537–544.
- [108] D. Harrison, J. F. Davidson, and R. Clift, *Fluidization*. Academic Press, 1985.
- [109] D. Schulze, *Powders and Bulk Solids: Behavior, Characterization, Storage and Flow*. Springer Science+Business Media, 2007.
- [110] M. Stanojevic, P. Marjanovic, B. Todorovic, and A. Vljacic, "The influence of variable operating conditions on the design and exploitation of air-slide systems in thermo-power stations," in *Conference Proceedings of Reliable Flow of Particulate Solids II (Relpowflo II)*, 1993, pp. 659–671.
- [111] N. Karlicic, A. Jovovic, D. Radic, M. Obradovic, D. Todorovic, and M. Stanojevic, "The Effect of Permeability on Lignite Fly Ash Pneumatic Conveying System Design," *Rev. Chim.*, vol. 69, no. 2, pp. 341–345, 2018.
- [112] R. J. Hitt, "An investigation into the low velocity pneumatic conveying of bulk solids," Thames Polytechnic, 1985.
- [113] S. Ergun, "Fluid flow through packed columns," *Chem. Eng. Prog.*, vol. 48, pp. 89–94, 1952.
- [114] British Materials Handling Board, *Bulk Solids Physical Property Test Guide*. British Materials Handling Board, 1983.
- [115] D. Mills, *Pneumatic Conveying Design Guide*, 3rd ed. 2015.
- [116] B. P. Wypych, "Modes of pneumatic conveying: which one is best?," *Food, Powder, Pneum.*, no. June, pp. 52–55, 2011.
- [117] K. Konrad, "Dense-phase pneumatic conveying: A review," *Powder Technol.*, vol. 49, no. 1, pp. 1–35, 1986.
- [118] Mactenn, "Dense Phase Conveying," 2015. [Online]. Available: <http://www.mactenn.com/blog/dense-phase-conveying-14/>. [Accessed: 06-Aug-2018].
- [119] A. Bhatia, "Pneumatic Conveying Systems." Continuing Education and Development, Inc., Stony Point, NY 10980, p. 57.
- [120] P. W. Wypych and P. C. Arnold, "Minimising wear and particle damage in pneumatic conveying," *Powder Handl. Process.*, vol. 5, p. 129, 1993.

- [121] T. Krull, "Slug flow pneumatic conveying: Stress field analysis and pressure drop prediction," University of Newcastle, 2005.
- [122] B. Schultz, "How to determine if your abrasive material can be pneumatically conveyed," *Powder Bulk Eng.*, vol. 5, 2014.
- [123] H. Masuda, K. Higashitani, and H. Yoshida, "Powder Technology: Handling and Operations, Process Instrumentation, and Working Hazards," 2006.
- [124] C. G. Philippsen, A. C. F. Vilela, and L. D. Zen, "Fluidized bed modeling applied to the analysis of processes: Review and state of the art," *J. Mater. Res. Technol.*, vol. 4, no. 2, pp. 208–216, 2015.
- [125] R. Cocco, S. B. R. Karri, and T. Knowlton, "Introduction to fluidization," *Chem. Eng. Prog.*, vol. 110, no. 11, pp. 21–29, 2014.
- [126] G. Dixon, "The impact of powder properties on dense phase flow," in *Proceedings of the international conference on pneumatic conveying*, 1979.
- [127] G. Butters, *Plastics pneumatic conveying and bulk storage*. London: Applied Science Publishers, 1981.
- [128] N. J. Mainwaring and A. R. Reed, "Permeability and air retention characteristics of bulk solid materials in relation to modes of dense phase pneumatic conveying," *Bulk Solids Handl.*, vol. 7, no. 3, pp. 415–425, 1987.
- [129] M. G. Jones and D. Mills, "Product classification for pneumatic conveying," in *Powder Handling and Processing*, 1990, vol. 2, no. 2, pp. 117–122.
- [130] C. Fargette, M. G. Jones, and N. G., "Bench scale tests for the assessment of pneumatic conveying behaviour of powders," in *Powder Handling & Processing* 9, 1997, p. 103.
- [131] M. G. Jones and K. C. Williams, "Predicting the mode of flow in pneumatic conveying systems-A review," *Particuology*, vol. 6, no. 5, pp. 289–300, 2008.
- [132] Pan, Renhu, and Others, "Minimum Superficial Air Velocity in Low-velocity Slug-flow Pneumatic Conveying of Bulk Solid Materials," in *5th International Conference on Bulk Materials Storage, Handling and Transportation: Proceedings*, 1995, p. 239.
- [133] M. G. Jones, "The influence of bulk particulate properties on pneumatic conveying performance," Thames Polytechnic, 1988.
- [134] O. Molerus, "Interpretation of Geldart's type A, B, C and D powders by taking

- into account interparticle cohesion forces,” *Powder Technol.*, vol. 33, no. 1, pp. 81–87, 1982.
- [135] A. A. Cenna, K. C. Williams, M. G. Jones, and W. Robinson, “Analysis of wear mechanisms in pneumatic conveying pipelines of fly ash,” in *Engineering Asset Management 2011*, Springer, 2014, pp. 539–547.
- [136] J. Lee, J. Ni, J. Sarangapani, and J. Mathew, *Engineering asset management 2011*. Springer, 2014.
- [137] I. M. Hutchings, “Wear by particulates,” *Chem. Eng. Sci.*, vol. 42, no. 4, pp. 869–878, 1987.
- [138] S. Dhodapkar, P. Solt, and G. Klinzing, “Understanding bends in pneumatic conveying systems,” *Chem. Eng.*, vol. 116, no. 4, pp. 46–52, 2009.
- [139] P. W. Wypych and A. R. Reed, “The advantages of stepping pipelines for the pneumatic transport of bulk solids,” *Powder Handl. Process.*, vol. 2, no. 3, pp. 217–221, 1990.
- [140] R. Pfeffer, S. Rosetti, and S. Licklein, “Analysis and correlation of heat transfer coefficient and heat transfer data for dilute gas-solid suspensions,” *NASA TN-D*, vol. 3603, 1966.
- [141] O. H. Hariu and M. C. Molstad, “Pressure drop in vertical tubes in transport of solids by gases,” *Ind. Eng. Chem.*, vol. 41, no. 6, pp. 1148–1160, 1949.
- [142] W. Barth, “Flow patterns during the conveyance of solid particles and droplets in gases,” *Chem. Ing. Tech*, vol. 30, pp. 171–180, 1958.
- [143] J. A. Hitchcock and C. Jones, “The pneumatic conveying of spheres through straight pipes,” *Br. J. Appl. Phys.*, vol. 9, no. 6, p. 218, 1958.
- [144] E. E. Michaelides, “Motion of particles in gases: average velocity and pressure loss,” *J. Fluids Eng.*, vol. 109, no. 2, pp. 172–178, 1987.
- [145] J. S. Mason and R. G. Boothroyd, “Comparison of friction factors in pneumatically conveyed suspensions using different-sized particles in pipes of varying size,” in *1st Intern. Conf. on the Pneumatic Transport of Solids in Pipes*, 1971.
- [146] K. E. Wirth and O. Molerus, “Prediction of pressure drop with pneumatic conveying of solids in horizontal pipes,” *Proc. Pneumatech*, vol. 1, 1983.
- [147] J. C. Sproson, W. A. Gray, and J. Haynes, “Pneumatic conveying of coal,”

- Pneumotransport*, vol. 2, pp. 15–32, 1973.
- [148] P. Schuchart, “Pneumatic conveying,” *Chem. Process Eng.*, vol. 51, no. 5, p. 76–+, 1970.
- [149] E. Muschelknautz and W. Krambrock, “Vereinfachte Berechnung horizontaler pneumatischer Förderleitungen bei hoher Gutbeladung mit feinkörnigen Produkten,” *Chemie Ing. Tech.*, vol. 41, no. 21, pp. 1164–1172, 1969.
- [150] M. E. Dogin and V. P. Lebedev, “Dependence of the resistance in pneumatic conveying pipelines on the fundamental parameter of the two-phase flow,” *Ind. Eng. Chem*, vol. 2, pp. 64–69, 1962.
- [151] J. L. Konchesky, T. J. George, and J. G. Craig, “Air and power requirements for the pneumatic transport of crushed coal in horizontal pipelines,” *J. Eng. Ind.*, vol. 97, no. 1, pp. 94–100, 1975.
- [152] E. G. Vogt and R. R. White, “Friction in the flow of suspension,” *Ind. Engg. Chem*, vol. 40, p. 1731, 1948.
- [153] A. Shimizu, R. Echigo, S. Hasegawa, and M. Hishida, “Experimental study on the pressure drop and the entry length of the gas-solid suspension flow in a circular tube,” *Int. J. Multiph. Flow*, vol. 4, no. 1, pp. 53–64, 1978.
- [154] H. E. Rose and R. A. Duckworth, “Transport of solid particles in liquid and gases,” *Engineer*, vol. 227, no. 5905, pp. 478–483, 1969.
- [155] H. E. Rose and H. E. Barnacle, “Flow of suspensions of non-cohesive spherical particles in pipes,” *Engineer*, vol. 203, no. 5290, pp. 898–901, 1957.
- [156] J. F. Richardson and M. McLeman, “Pneumatic Conveying--Part II: Solids Velocities and Pressure Gradients in a One-Inch Horizontal Pipe,” *Trans. Instn. Chem. Engrs*, vol. 38, pp. 257–266, 1960.
- [157] B. L. Hinkle, “Acceleration of particles and pressure drops encountered in horizontal pneumatic conveying,” Georgia Institute of Technology, 1953.
- [158] D. H. Belden and L. S. Kassel, “Pressure drops encountered in conveying particles of large diameter in vertical transfer lines,” *Ind. Eng. Chem.*, vol. 41, no. 6, pp. 1174–1178, 1949.
- [159] E. E. Michaelides and I. Roy, “Evaluation of several correlations used for the prediction of pressure drop in particulate flows,” *Int. J. Multiph. flow*, vol. 13, no. 3, pp. 433–442, 1987.

- [160] G. Hetsroni, *Handbook of multiphase systems*. McGraw-Hill Book Co., New York, NY, 1982.
- [161] G. W. Govier and K. Aziz, "The Flow of Complex Mixtures in Pipe. Robert E." Kreiger Publishing Co., Huntington, New York, 1977.
- [162] L. A. Panek, *The combined effects of friction and suspension in bolting bedded mine roof*, vol. 6139. US Department of the Interior, Bureau of Mines, 1962.
- [163] E. E. Michaelides, "A model for the flow of solid particles in gases," *Int. J. Multiph. flow*, vol. 10, no. 1, pp. 61–77, 1983.
- [164] P. W. Wypych, "Pneumatic conveying of bulk solids," University of Wollongong, 1989.
- [165] C. Ratnayake, "A Comprehensive Scaling Up Technique for Pneumatic Transport Systems," The Norwegian University of Science and Technology (NTNU), 2005.
- [166] W.-C. Yang, "Correlations for solid friction factors in vertical and horizontal pneumatic conveyings," *AIChE J.*, vol. 20, no. 3, pp. 605–607, 1974.
- [167] G. Szikszay, "Friction factor for dilute phase pneumatic conveying," *Bulk Solids Handl.*, vol. 8, no. 4, pp. 395–399, 1988.
- [168] M. Weber, "Correlation analyses in the design of pneumatic transport plant," *Bulk Solids Handl.*, vol. 2, no. 2, pp. 231–233, 1982.
- [169] M. Weber, "Friction of the air and the air/solid mixture in pneumatic conveying," *Bulk solids Handl.*, vol. 11, pp. 99–102, 1991.
- [170] R. Pan, P. W. Wypych, and others, "Pressure drop due to solids-air flow in horizontal and vertical pipes," in *4th International Conference on Bulk Materials, Storage, Handling and Transportation: 7th International Symposium on Freight Pipelines; Preprints of Papers*, 1992, p. 35.
- [171] G. E. Klinzing, N. D. Rohatgi, A. Zaltash, and C. A. Myler, "Pneumatic transport--a review (generalized phase diagram approach to pneumatic transport)," *Powder Technol.*, vol. 51, no. 2, pp. 135–149, 1987.
- [172] S. Stemerding, "The pneumatic transport of cracking catalyst in vertical risers," *Chem. Eng. Sci.*, vol. 17, no. 8, pp. 599–608, 1962.
- [173] K. V. S. Reddy and D. C. T. Pei, "Particle dynamics in solids-gas flows in vertical pipe," *Ind. Eng. Chem. Fundam.*, vol. 8, no. 3, pp. 490–497, 1969.

- [174] C. E. Capes and K. Nakamura, "Vertical pneumatic conveying: an experimental study with particles in the intermediate and turbulent flow regimes," *Can. J. Chem. Eng.*, vol. 51, no. 1, pp. 31–38, 1973.
- [175] H. Kanno and S. Saito, "Pneumatic conveying of solids through straight pipes," *J. Chem. Eng. Japan*, vol. 2, no. 2, pp. 211–217, 1969.
- [176] P. W. Wypych and P. C. Arnold, "A standardised-test procedure for pneumatic conveying design," *Bulk Solids Handl.*, vol. 5, no. 4, pp. 755–763, 1985.
- [177] R. Pan and P. W. Wypych, "Scale-up procedures for pneumatic conveying design," *Powder Handl. Process.*, vol. 4, p. 167, 1992.
- [178] P. W. Wypych and P. C. Arnold, "On improving scale-up procedures for pneumatic conveying design," *Powder Technol.*, vol. 50, no. 3, pp. 281–294, 1987.
- [179] R. Pan, B. Mi, and P. Wypych, "Pneumatic conveying characteristics of fine and granular bulk solids," *KONA Powder Part. J.*, vol. 12, pp. 77–85, 1994.
- [180] P. W. Wypych and R. Pan, "Pressure drop due to solids-air flow in straight pipes and bends," in *Freight Pipelines: A Selection of Papers Presented at the 7th International Symposium on Freight Pipelines. New York: Elsevier*, 1993, pp. 49–67.
- [181] P. W. Wypych, "Pressure drop in cement pneumatic conveying systems," in *Proceedings of the Technical Program. International Powder and Bulk Solids Handling and Processing*, 1992, vol. 17, p. 467.
- [182] B. Mi and P. W. Wypych, "Pressure drop prediction in low-velocity pneumatic conveying," *Powder Technol.*, vol. 81, no. 2, pp. 125–137, 1994.
- [183] S. M. El-Behery, A. A. El-Haroun, and M. R. Abuhegazy, "Prediction of pressure drop in vertical pneumatic conveyors," *J. Appl. Fluid Mech.*, vol. 10, no. 2, pp. 519–527, 2017.
- [184] K. W. Smajstrla, "Efficient Pneumatic Conveying Dense Phase vs . Dilute Phase : How Being Accurate is More Cost Effective Than Being Conservative," 2013.
- [185] C. R. Woodcock and J. S. Mason, *Bulk solids handling: an introduction to the practice and technology*. Springer Science & Business Media, 2012.
- [186] Rudarski institut, "Glavni projekat rekonstrukcije sistema opepeljavanja TE Nikola Tesla B," Beograd, 2008.

- [187] V. D. Stevanovic, M. M. Stanojevic, A. Jovovic, D. B. Radic, M. M. Petrovic, and N. V. Karlicic, "Analysis of transient ash pneumatic conveying over long distance and prediction of transport capacity," *Powder Technol.*, vol. 254, pp. 281–290, 2014.
- [188] H. Zhang, J. Wei, Y. Wang, Z. Wen, and B. Yao, "Application of Sampling Method Based on Negative Pressure Pneumatic Conveying in Soft Coal Seam," *Int. J. Heat Technol.*, vol. 34, no. 3, pp. 473–478, 2016.
- [189] S. E. Haaland, "Simple and explicit formulas for the friction factor in turbulent pipe flow," *J. Fluids Eng.*, vol. 105, no. 1, pp. 89–90, 1983.
- [190] R. Clift, J. R. Grace, and M. E. Weber, "Bubbles, Drops and Particles, Academic Press, New York, 1978," *Vol. 5. Nos. 1-4, 1988 Model. Three Phase Sparged Catal. React.*
- [191] M. Stamenić, "Istraživanje radnih parametara keramičkog gorionika sa poroznom ispunom za sagorevanje gasovitih goriva i otpadnih tehnoloških gasova niske toplotne moći," 2014.

PRILOG 1 - Podaci o uzorcima pepela sa tehničkom analizom uglja

Tabela P.1. Uzorci pepela sa podacima o pogonskim analizama uglja

Oznaka uzorka	Mesto uzorkovanja	Ugalj		
		Donja toplotna moć H_d (kJ/kg)	Vlaga W (%)	Pepeo A (%)
1	KDG	-	-	-
2	EF	6699	48,1	20,2
3	EF	-	-	-
4	EF	-	-	-
5	EF	7742	49	15,5
6	KDG	6699	48,1	20,2
7	KDG	-	-	-
8	KDG	-	-	-
9	KDG	7742	49	15,5
10	LUV	6699	48,1	20,2
11	LUV	-	-	-
12	LUV	-	-	-
13	LUV	7742	49	15,5
14	KDG	5879	46	25,5
15	KDG	5505	48	24
16	KDG	6579	47	23
17	KDG	7412	50	16
18	EF+ KDG	5505	48	24
19	EF	5505	48	24
20	EF+ KDG	5505	48	24
21	EF	5505	48	24
22	EF+ KDG	5879	46	25,5
23	EF	5879	46	25,5
24	EF+ KDG	5879	46	25,5
25	EF	5879	46	25,5
26	EF	5879	46	25,5
27	EF	5879	46	25,5
28	EF+ KDG	5879	46	25,5
29	EF	5879	46	25,5
30	EF+ KDG	5879	46	25,5
31	EF+ KDG	5505	48	24
32	EF	5505	48	24
33	EF+ KDG	5505	48	24
34	EF	5505	48	24
35	EF+ KDG	6579	47	23
36	EF	6579	47	23

Oznaka uzorka	Mesto uzorkovanja	Ugalj		
		Donja toplotna moć H_d (kJ/kg)	Vlaga W (%)	Pepeo A (%)
37	EF+ KDG	6579	47	23
38	EF+ KDG	7412	50	16
39	EF	7412	50	16
40	EF+ KDG	7412	50	16
41	EF	7412	50	16
42	EF	5775	46,6	23,7
43	KDG	5775	46,6	23,7
44	EF+LUV	7245	51,2	14,3
45	EF+LUV	7245	51,2	14,3
46	EF+LUV	7514	49	16,2
47	EF+LUV	7514	49	16,2
48	EF+LUV	7824	49,4	14,3
49	EF+LUV	7824	49,4	14,3
50	EF	8138	49,4	14,4
51	EF	8138	49,4	14,4
52	EF	9355	50,8	9,1
53	EF	9355	50,8	9,1
54	EF	8118	52,2	11
55	EF	8118	52,2	11
56	EF+LUV	8051	49,8	13,5
57	EF+LUV	8051	49,8	13,5
58	EF	7689	50,3	13,4
59	EF	7343	50,4	14,7
60	EF	8072	50	12,9
61	EF	8213	49,4	13,1
62	EF+KDG	8608	51,4	9,2
63	EF	8616	52,2	8,9
64	EF	7983	50,8	12,1
	Minimum	5505	46	8,9
	Maksimum	9355	52,2	25,5
	Srednja vrednost	6940	48,6	18,7

KDG –kanal dimnih gasova

LUV - zagrejač vazduha

EF – elektrofilar

PRILOG 2 - Fizičko-hemijske karakteristike uzoraka pepela

Tabela P2.1 Rezultati laboratorijskih ispitivanja fizičkih karakteristika uzoraka pepela

Oznaka uzorka	Srednji prečnik (μm)	Nasipna gustina (kg/m^3)	Nasipna gustina u zbijenom stanju (kg/m^3)	Fizička gustina (kg/m^3)	Poroznost u nasutom (rastresitom) stanju (-)	Poroznost u zbijenom stanju (-)
1	191	859,3	941,6	2190	0,61	0,57
2	117	690,6	817,3	1680	0,59	0,51
3	160	594,1	690,8	1500	0,6	0,54
4	151	672,7	805,6	1700	0,6	0,53
5	199	709,1	790,1	1620	0,56	0,51
6	256	607,4	686,3	1660	0,63	0,59
7	290	569,6	636,4	1630	0,65	0,61
8	262	671,9	744,5	1650	0,59	0,55
9	187	617,3	699,4	1710	0,64	0,59
10	200	617,5	688	1590	0,61	0,57
11	263	568,5	640,6	1600	0,64	0,6
12	213	683	752,6	1770	0,61	0,57
13	266	617,8	696,1	1730	0,64	0,6
14	-	754,1	-	2130	0,65	-
15	215	790,2	-	2040	0,61	-
16	-	683	-	1850	0,63	-
17	-	1023,9	-	2400	0,57	-
18	95	622,4	-	1860	0,67	-
19	-	670,5	-	1920	0,65	-
20	-	643	-	1850	0,65	-
21	-	634,1	-	1880	0,66	-

Oznaka uzorka	Srednji prečnik (μm)	Nasipna gustina (kg/m ³)	Nasipna gustina u zbijenom stanju (kg/m ³)	Fizička gustina (kg/m ³)	Poroznost u nasutom (rastresitom) stanju (-)	Poroznost u zbijenom stanju (-)
22	-	669,6	-	1860	0,64	-
23	-	633	-	1890	0,67	-
24	-	651,6	-	1860	0,65	-
25	-	751,1	-	1890	0,6	-
26	-	687,6	-	1830	0,62	-
27	-	951	-	2290	0,58	-
28	-	628,6	-	1710	0,63	-
29	-	635,1	-	1760	0,64	-
30	112	621,8	-	1830	0,66	-
31	95	687,4	-	1810	0,62	-
32	181	651,7	-	1680	0,61	-
33	127	651,4	-	1720	0,62	-
34	102	651,3	-	1800	0,64	-
35	-	856,6	-	1930	0,56	-
36	-	648,9	-	1920	0,66	-
37	-	653,9	-	1980	0,67	-
38	-	663	-	1880	0,65	-
39	-	678,7	-	1900	0,64	-
40	-	705,5	-	1930	0,63	-
41	-	705,5	-	1920	0,63	-
42	128	640,3	810,5	1860	0,66	0,56
43	269	638,3	742,2	1780	0,64	0,58
44	222	958	1101,1	2280	0,58	0,52
45	211	1031,5	1172,2	2360	0,56	0,5
46	216	1097,2	1242,6	2490	0,56	0,5

Oznaka uzorka	Srednji prečnik (μm)	Nasipna gustina (kg/m ³)	Nasipna gustina u zbijenom stanju (kg/m ³)	Fizička gustina (kg/m ³)	Poroznost u nasutom (rastresitom) stanju (-)	Poroznost u zbijenom stanju (-)
47	221	1048	1190,9	2410	0,57	0,51
48	247	937,7	1056	2200	0,57	0,52
49	206	779,5	928	2030	0,62	0,54
50	181	657,2	801,5	1820	0,64	0,56
51	182	651,5	789,7	1770	0,63	0,55
52	167	575,8	702,2	1760	0,67	0,6
53	195	559	673,5	1550	0,64	0,57
54	152	717,3	875,8	1900	0,62	0,54
55	180	599,2	735,2	1750	0,66	0,58
56	255	1033,4	1174,3	2310	0,55	0,49
57	207	783,2	921,4	1940	0,6	0,53
58	141	648,1	780,8	1660	0,61	0,53
59	115	677,6	836,5	1710	0,6	0,51
60	126	727,5	866,1	1900	0,62	0,54
61	141	752,4	880	1790	0,58	0,51
62	145	623,2	746,3	1710	0,64	0,56
63	141	702	825,9	1790	0,61	0,54
64	145	613,1	729,9	1670	0,63	0,56
Minimum	95	559	636,4	1500	0,55	0,49
Maksimum	290	1097,2	1242,6	2490	0,67	0,61
Srednja vrednost	183	711,5	838,1	1871,7	0,62	0,55

Oznaka uzorka	Kvarc (%)	Amorfna faza (%)	GŽ (%)	SiO ₂ (%)	Al ₂ O ₃ (%)	Fe ₂ O ₃ (%)	CaO (%)	MgO (%)	P ₂ O ₅ (%)	SO ₃ (%)	K ₂ O (%)	Na ₂ O (%)	TiO ₂ (%)	Cr ₂ O ₃ (%)	Mn ₂ O ₃ (%)	ZnO (%)	SrO (%)
52	12,05	66,20	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
53	12,00	65,57	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
54	22,51	51,55	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
55	22,61	53,84	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
56	56,23	24,98	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
57	35,5	44,848	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
58	10,39	59,98	2,84	52,28	26,75	6,22	6,68	2,45	0,07	0,38	1,40	0,260	0,839	0,039	0,094	0,004	0,039
59	11,65	58,59	1,8	52,33	26,37	6,54	7,26	2,55	0,07	0,51	1,37	0,218	0,852	0,039	0,108	0,006	0,041
60	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
61	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
62	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
63	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
64	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Minimum	10,39	17,80	1,54	52,28	18,57	4,59	2,66	1,30	0,04	0,15	1,15	0,07	0,649	0,037	0,056	0,001	0,019
Maksimum	72,72	71,67	5,27	65,50	26,88	6,54	7,26	2,55	0,07	0,51	1,56	0,276	0,852	0,049	0,108	0,01	0,041
Srednja vrednost	28,25	48,87	2,72	58,62	23,86	5,70	4,14	1,81	0,05	0,28	1,40	0,162	0,766	0,041	0,073	0,006	0,026

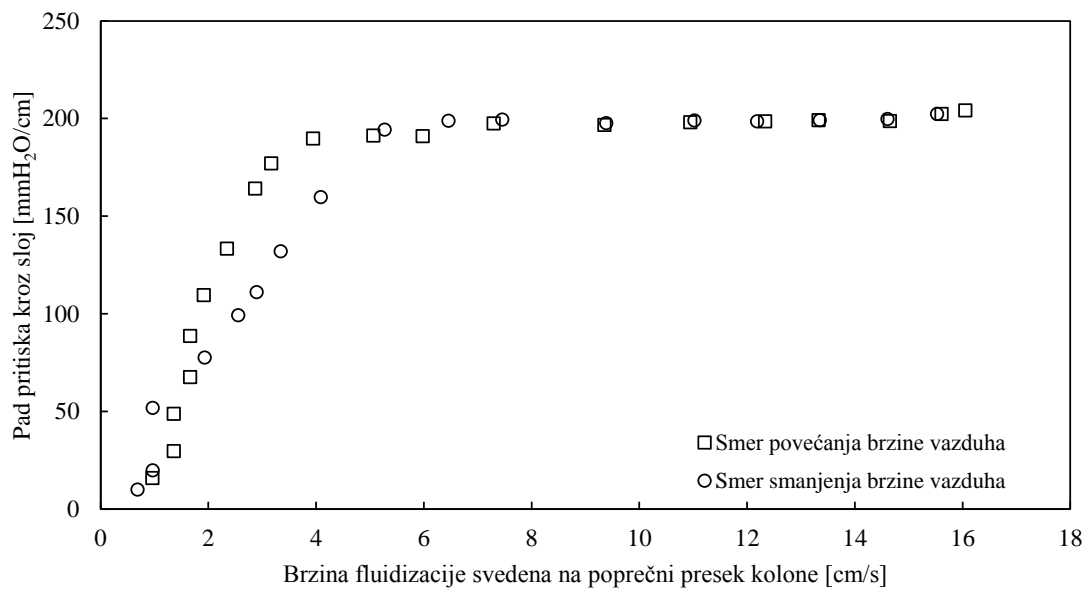
GŽ – gubitak žarenjem

PRILOG 3 – Aeracione karakteristike istpitivanih uzoraka pepela

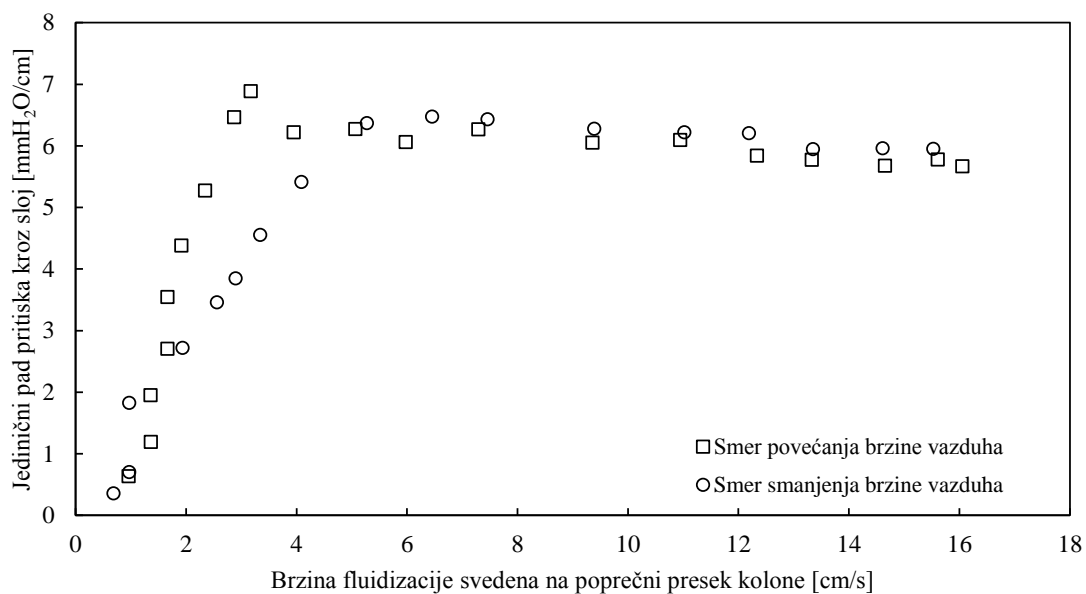
Tabela P3.1 Aeracione karakteristike istpitivanih uzoraka pepela

Oznaka uzorka	Minimalna brzina fluidizacije, w_f^* (cm/s)	Minimalna brzina fluidizacije očitana sa dijagrama, w_f^* (cm/s)	Permeabilnost ($m^2/(Pa \cdot s)$) $\cdot 10^6$
1	3,17	5,03	13,56
2	1,37	2,86	16,95
3	1,67	3,12	12,57
4	1,68	-	11,58
5	1,68	3,90	15,26
6	2,91	2,93	19,09
7	2,38	-	10,09
8	2,57	-	15,78
9	2,17	-	22,61
10	2,37	-	13,59
11	1,94	-	11,02
12	2,91	5,96	13,28
13	3,22	6,87	12,97
45	3,20	5,10	16,64
46	3,06	-	12,23
50	2,04	3,69	12,70
52	3,85	5,92	14,65
Minimum	1,37		10,01
Maksimum	3,85		22,61
Srednja vrednost	2,48		14,39

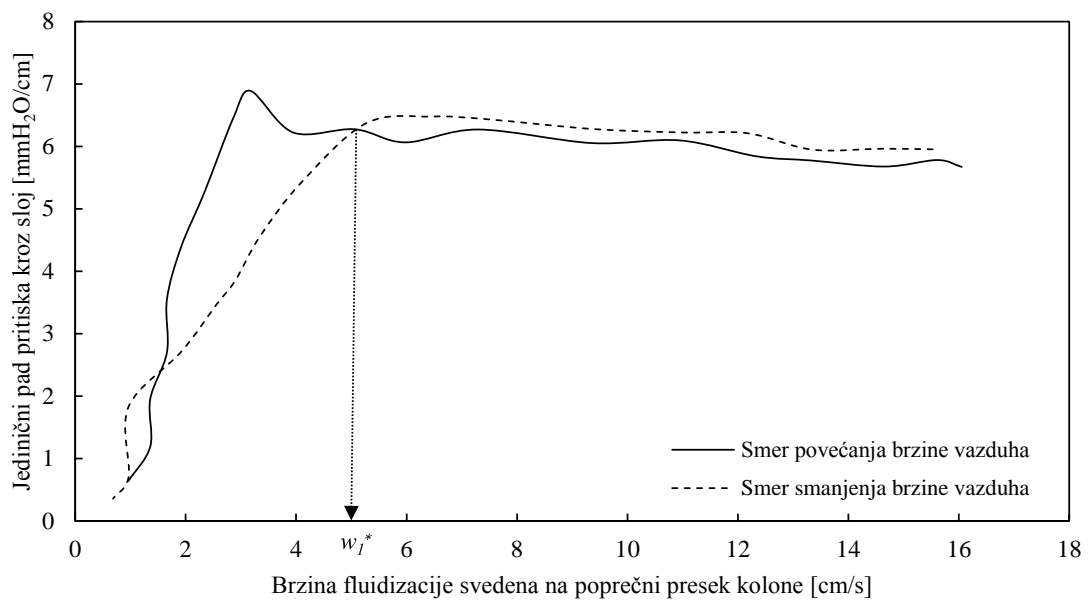
PRILOG 4 - Fluidizacioni dijagrami za ispitivane uzorke pepela



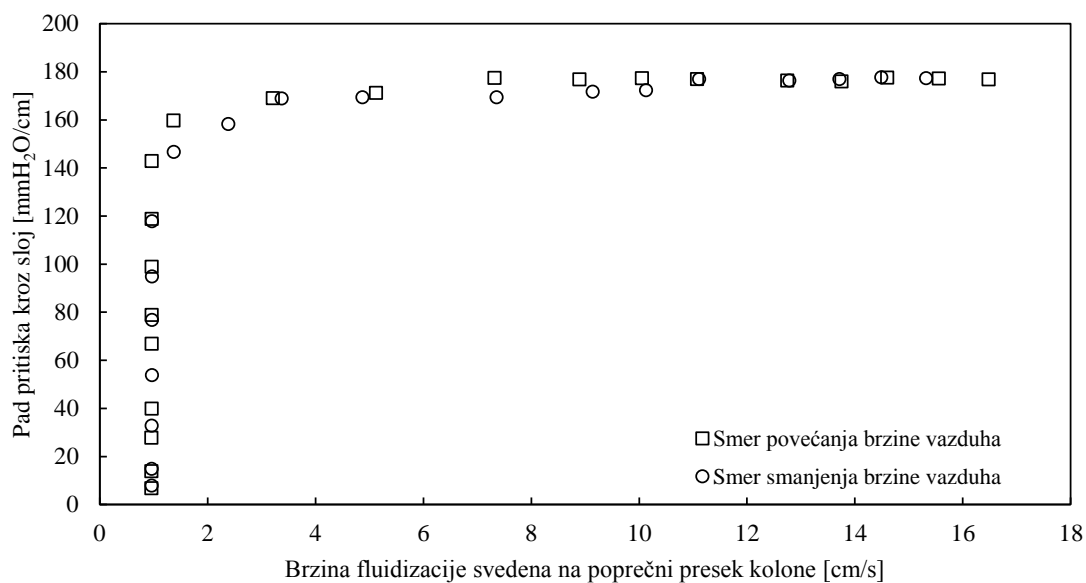
Slika P4.1 Zavisnost pada pritiska od brzine fluidizacije za uzorak 1



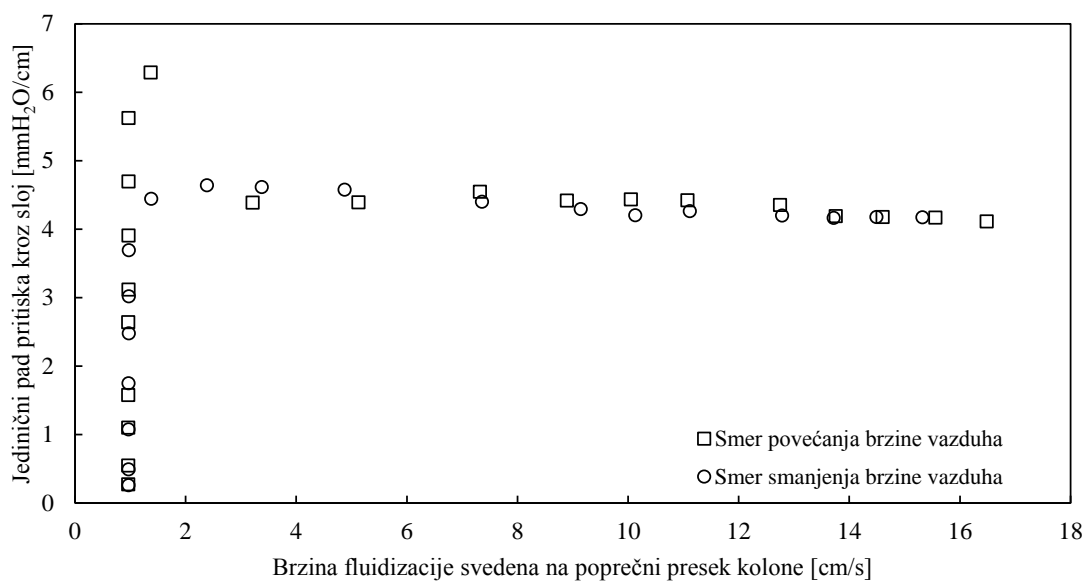
Slika P4.2 Zavisnost jediničnog pada pritiska od brzine fluidizacije za uzorak 1



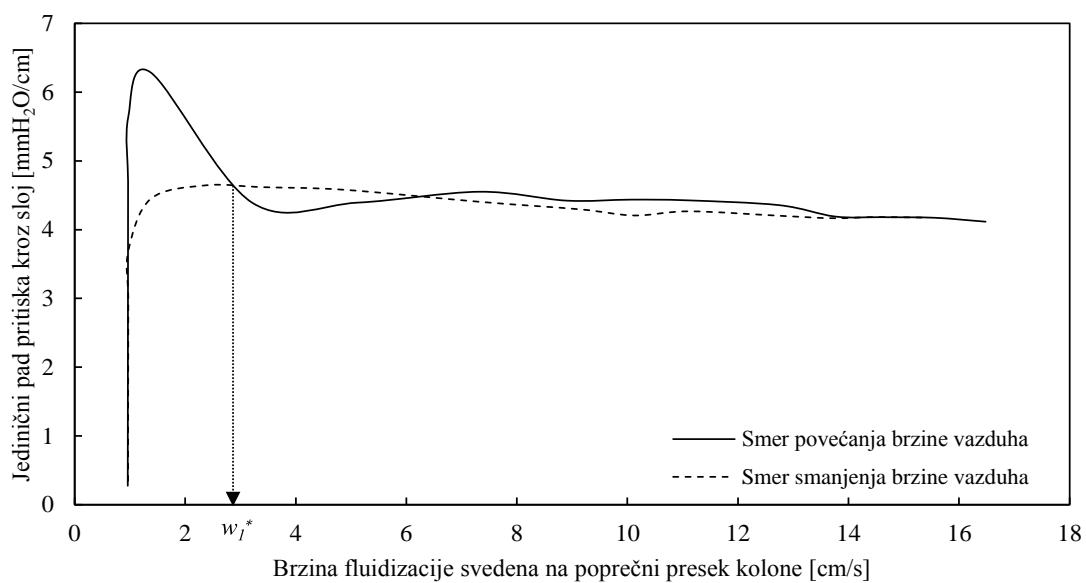
Slika P4.3 Očitavanje minimalne brzine fluidizacije za uzorak 1



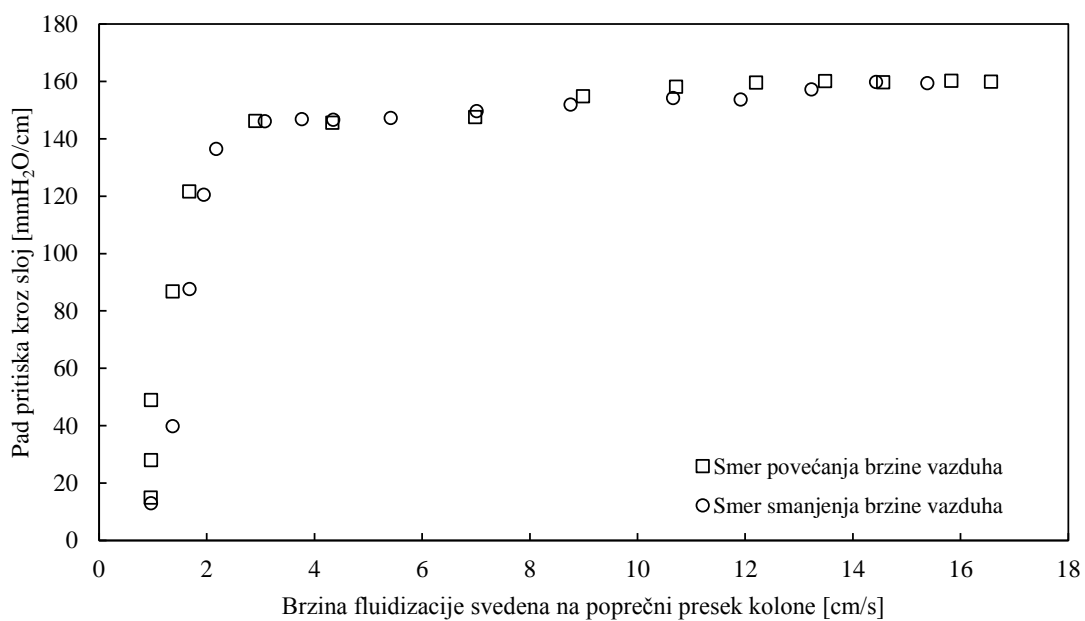
Slika P4.4 Zavisnost pada pritiska od brzine fluidizacije za uzorak 2



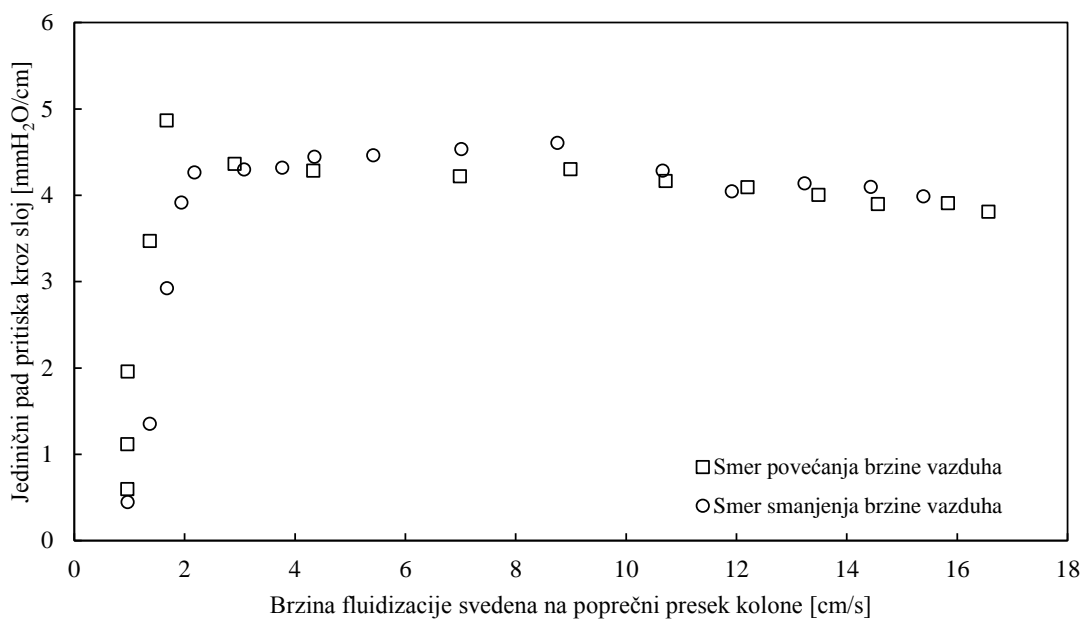
Slika P4.5 Zavisnost jediničnog pada pritiska od brzine fluidizacije za uzorak 2



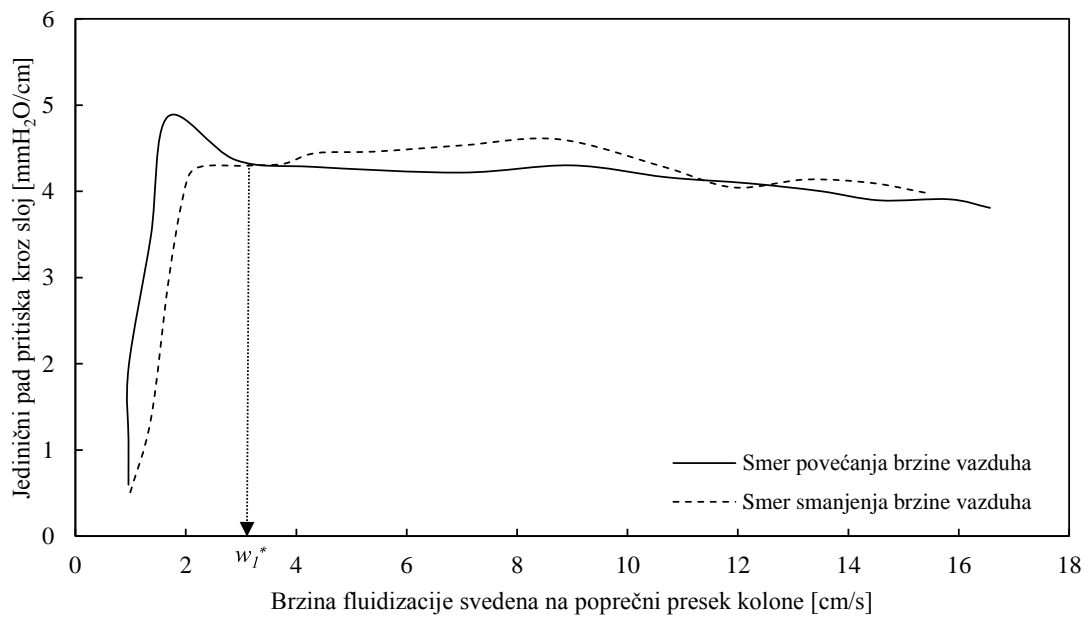
Slika P4.6 Očitavanje minimalne brzine fluidizacije za uzorak 2



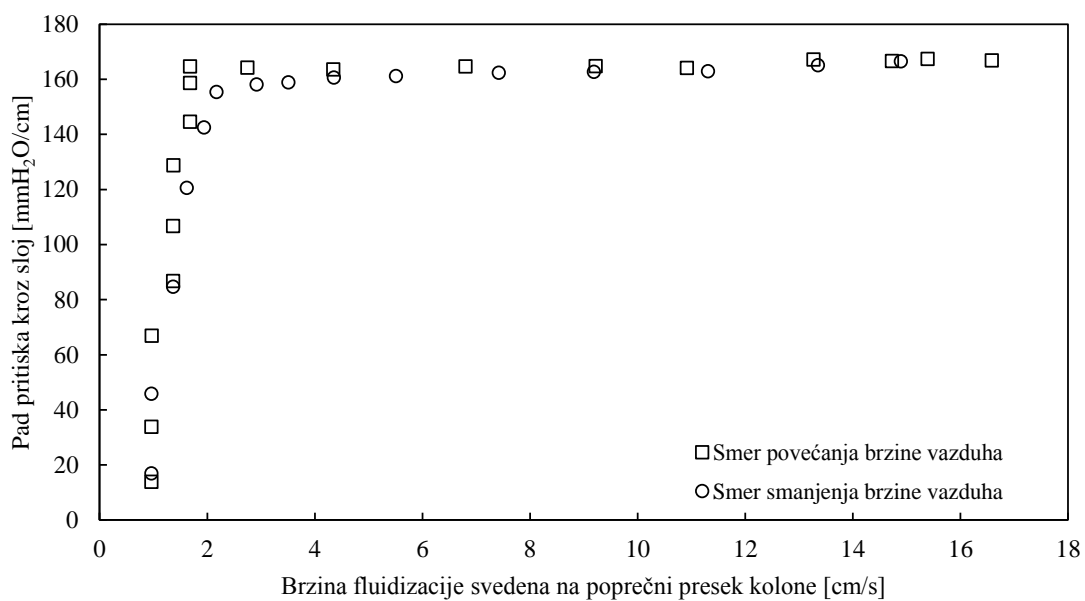
Slika P4.7 Zavisnost pada pritiska od brzine fluidizacije za uzorak 3



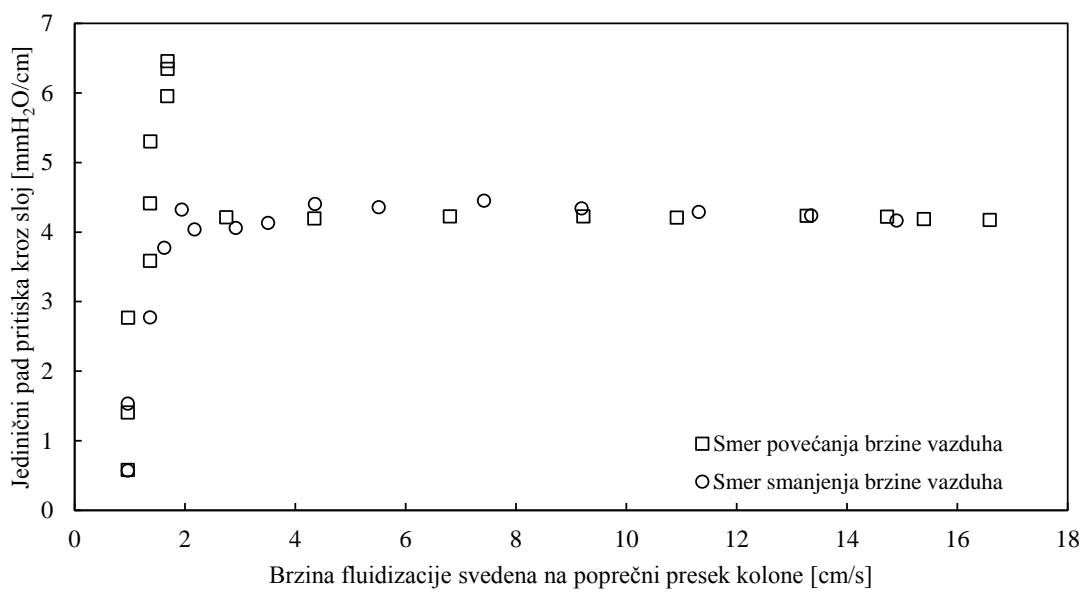
Slika P4.8 Zavisnost jediničnog pada pritiska od brzine fluidizacije za uzorak 3



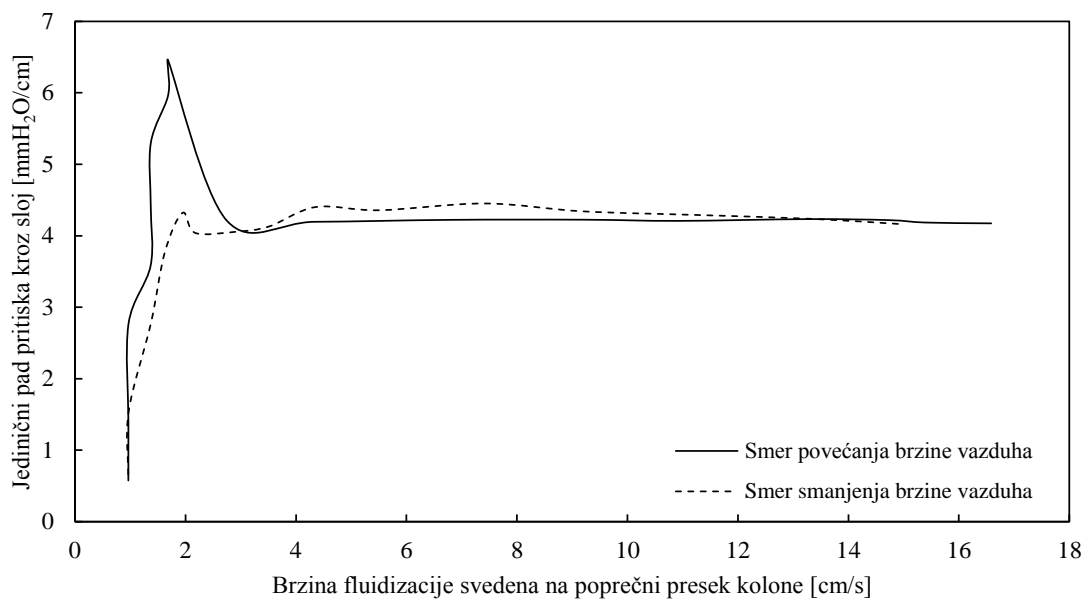
Slika P4.9 Očitavanje minimalne brzine fluidizacije za uzorak 3



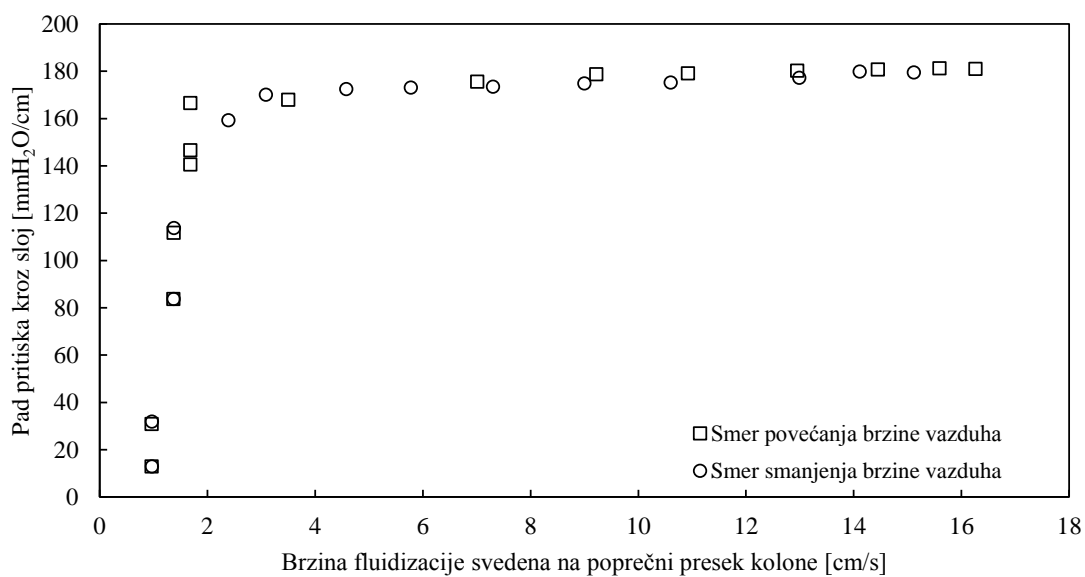
Slika P4.10 Zavisnost pada pritiska od brzine fluidizacije za uzorak 4



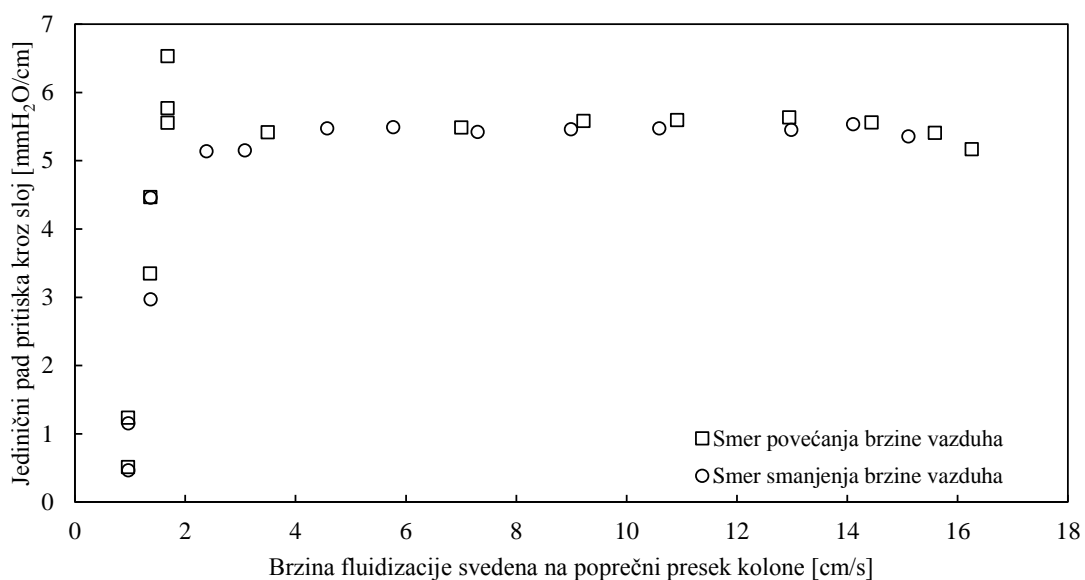
Slika P4.11 Zavisnost jediničnog pada pritiska od brzine fluidizacije za uzorak 4



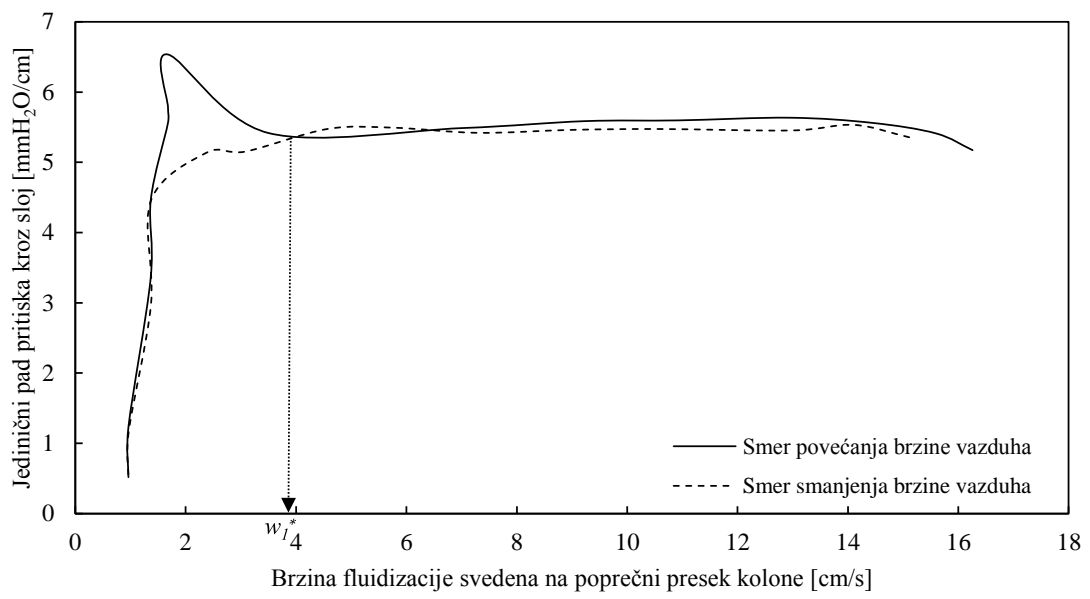
Slika P4.12 Očitavanje minimalne brzine fluidizacije za uzorak 4



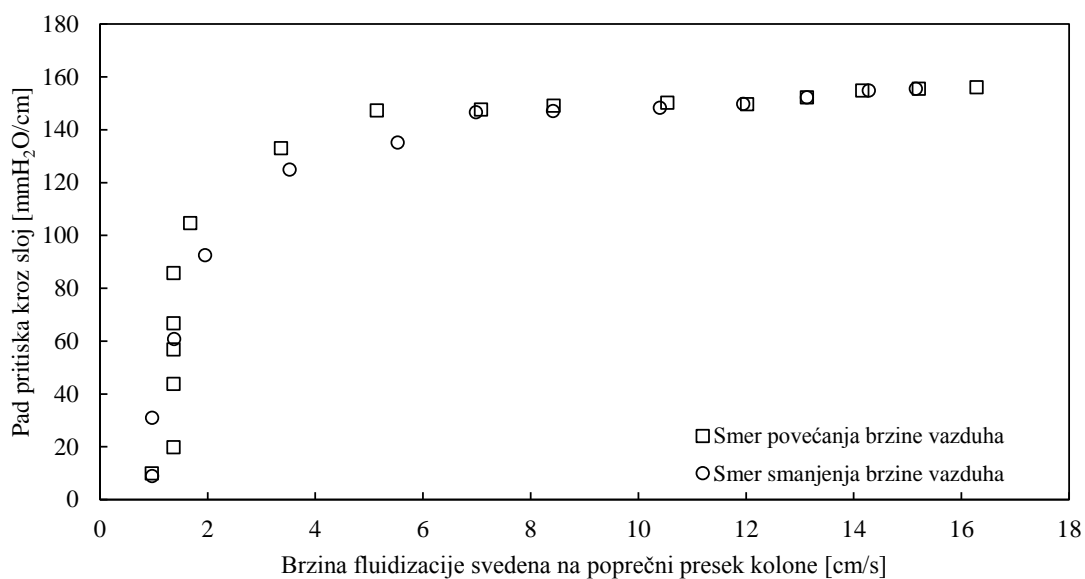
Slika P4.13 Zavisnost pada pritiska od brzine fluidizacije za uzorak 5



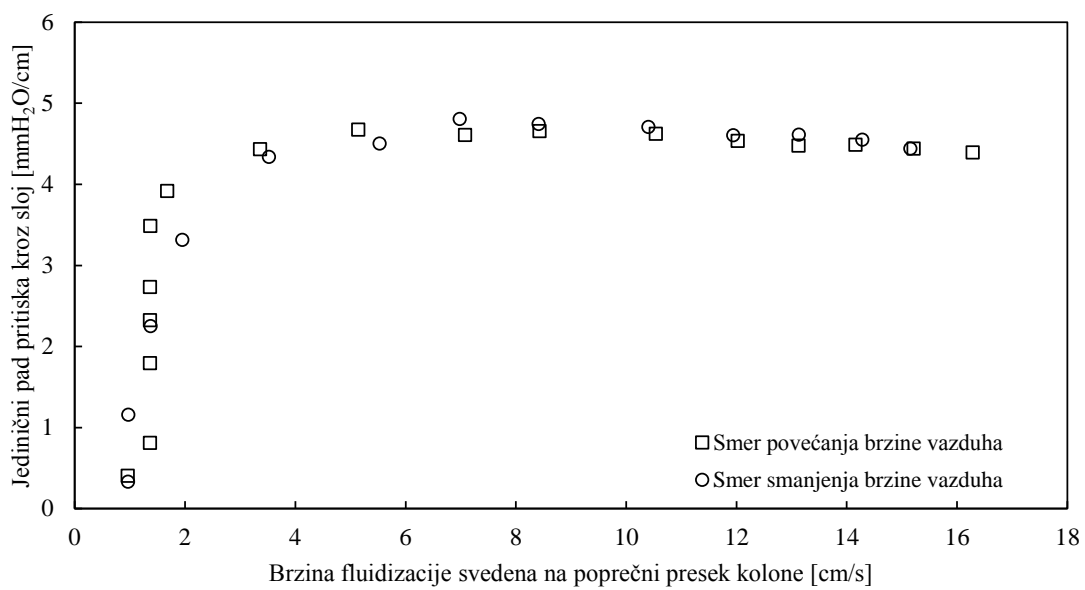
Slika P4.14 Zavisnost jediničnog pada pritiska od brzine fluidizacije za uzorak 5



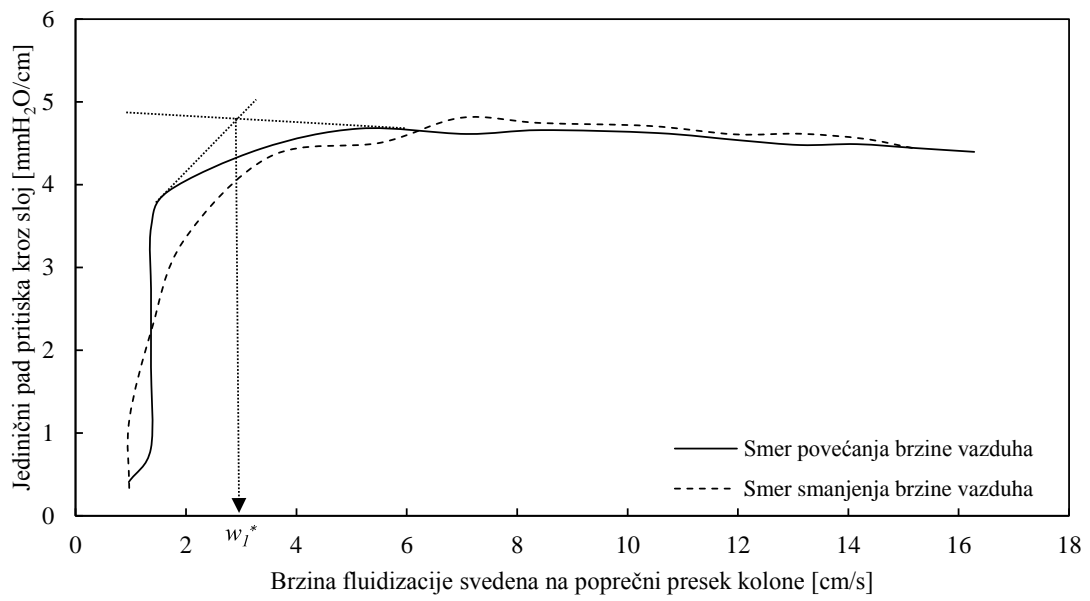
Slika P4.15 Očitavanje minimalne brzine fluidizacije za uzorak 5



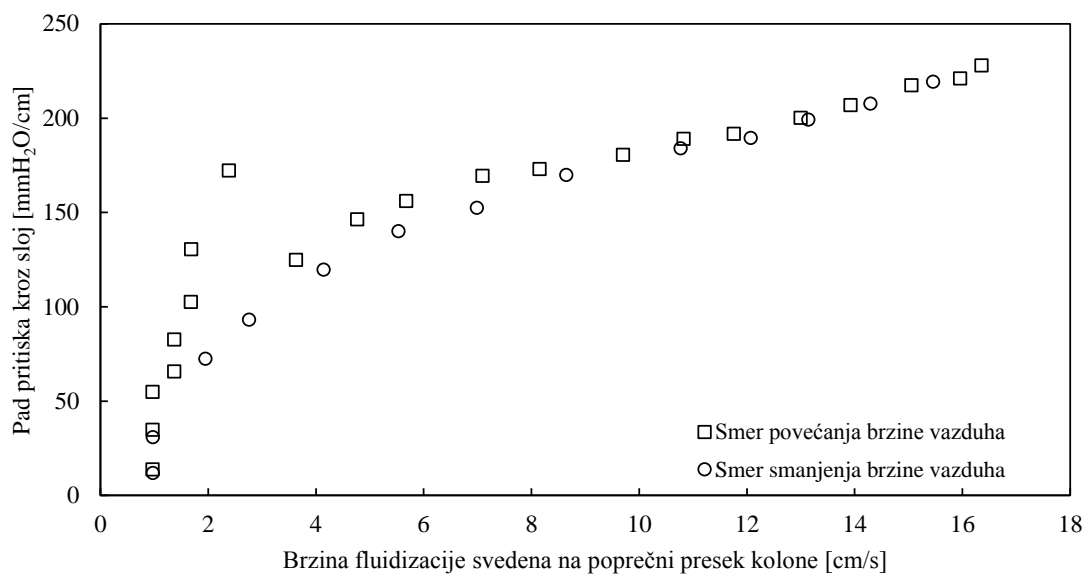
Slika P4.16 Zavisnost pada pritiska od brzine fluidizacije za uzorak 6



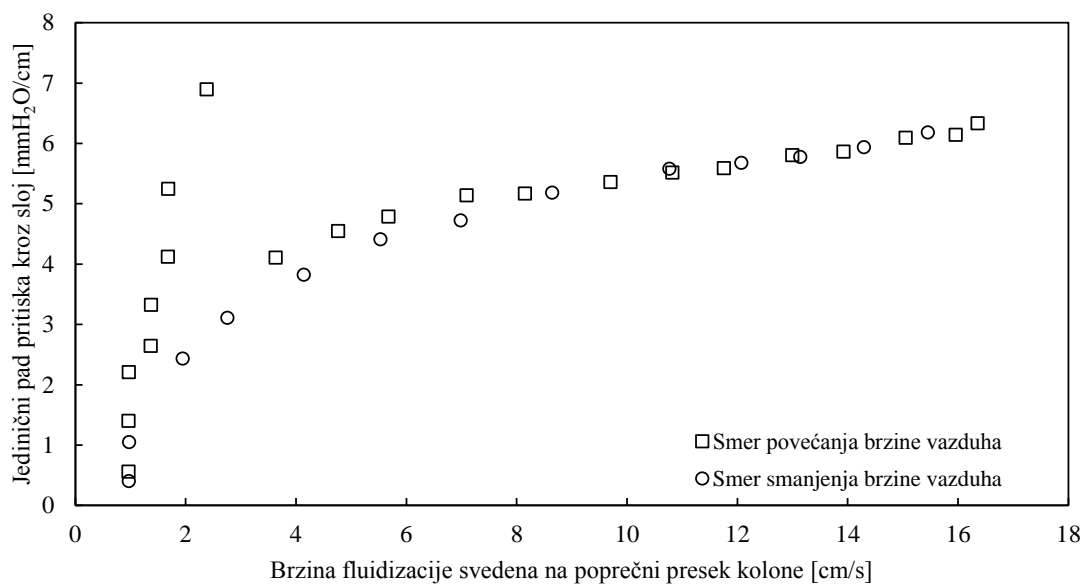
Slika P4.17 Zavisnost jediničnog pada pritiska od brzine fluidizacije za uzorak 6



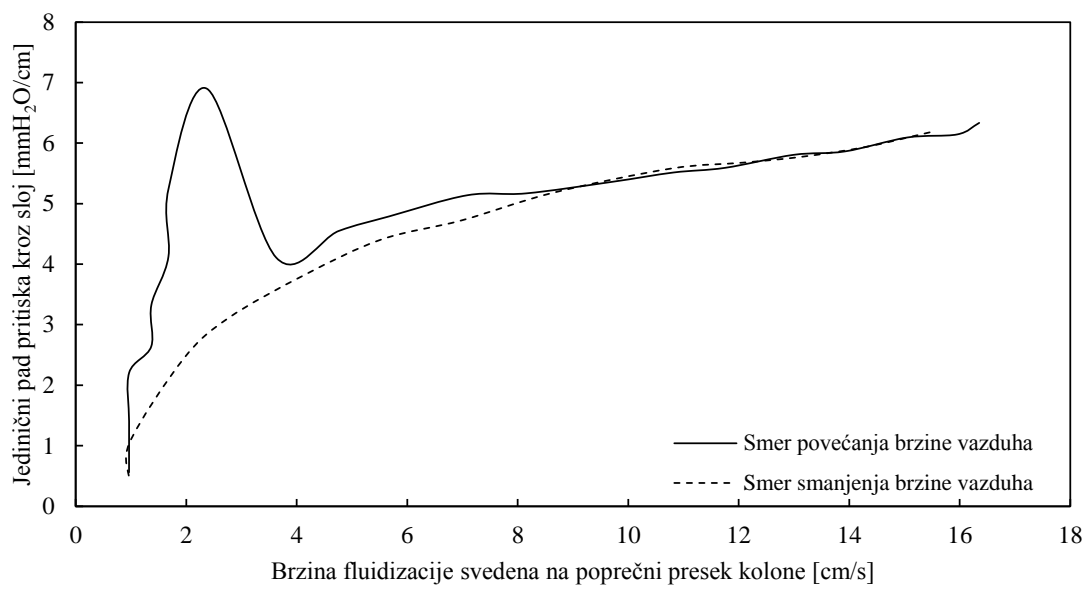
Slika P4.18 Očitavanje minimalne brzine fluidizacije za uzorak 6



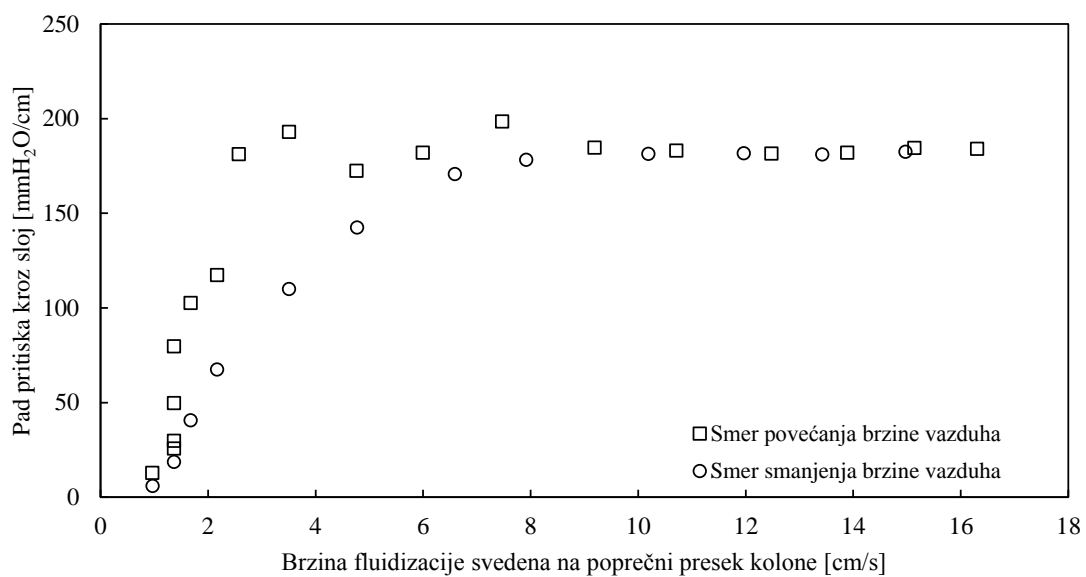
Slika P4.19 Zavisnost pada pritiska od brzine fluidizacije za uzorak 7



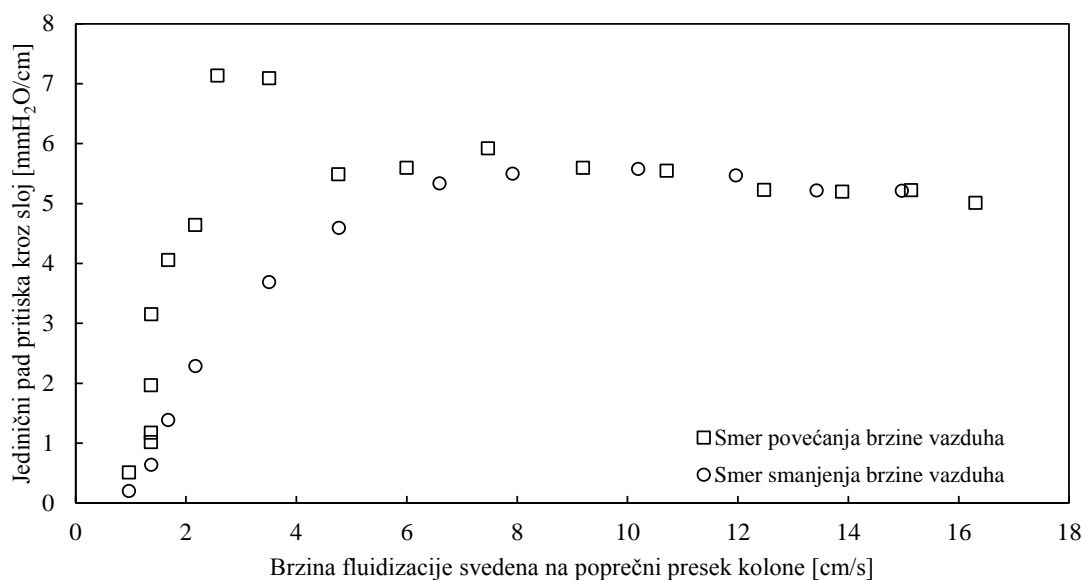
Slika P4.20 Zavisnost jediničnog pada pritiska od brzine fluidizacije za uzorak 7



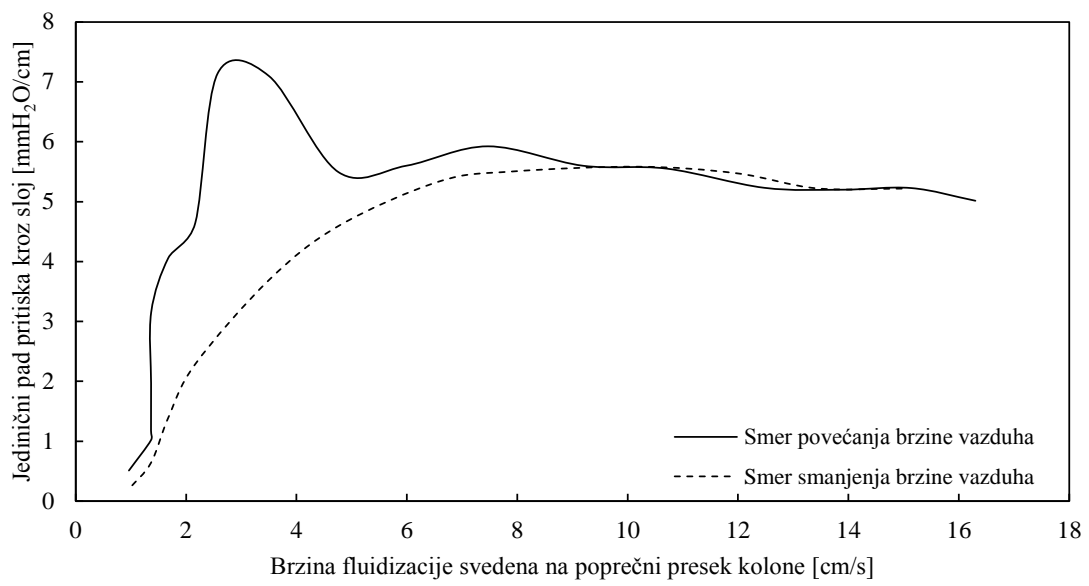
Slika P4.21 Očitavanje minimalne brzine fluidizacije za uzorak 7



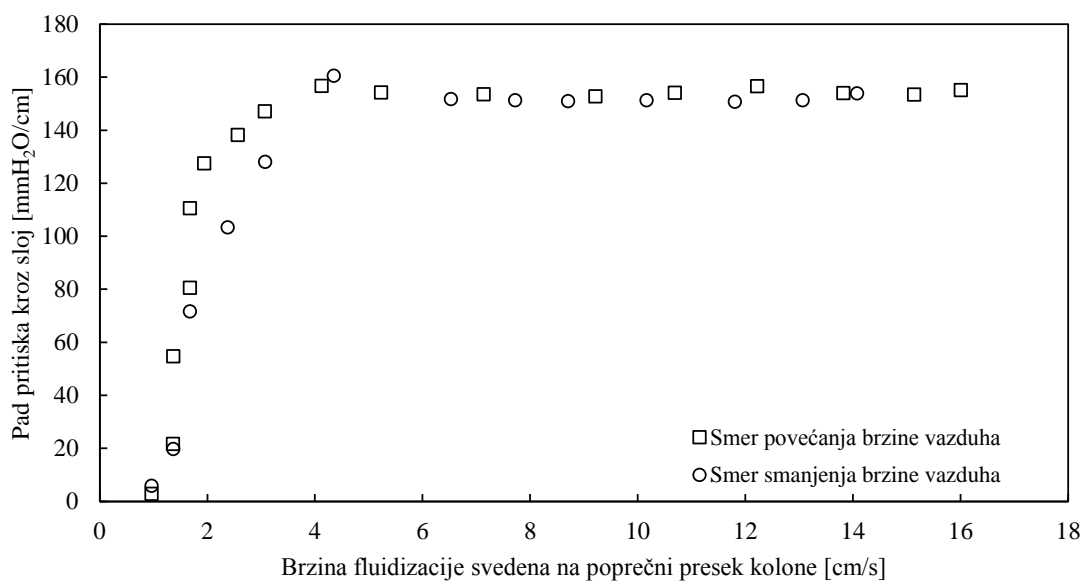
Slika P4.22 Zavisnost pada pritiska od brzine fluidizacije za uzorak 8



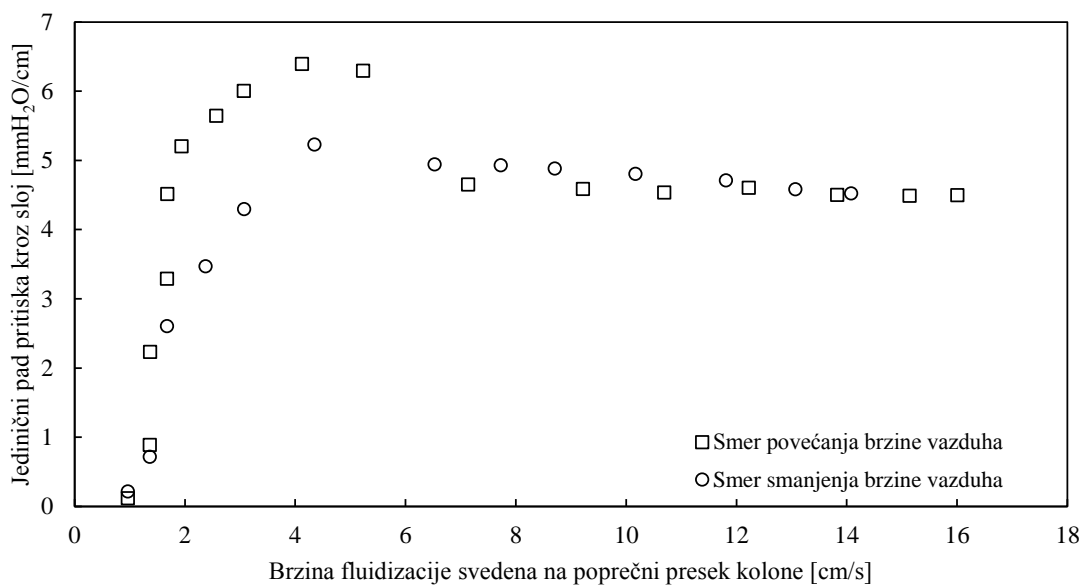
Slika P4.23 Zavisnost jediničnog pada pritiska od brzine fluidizacije za uzorak 8



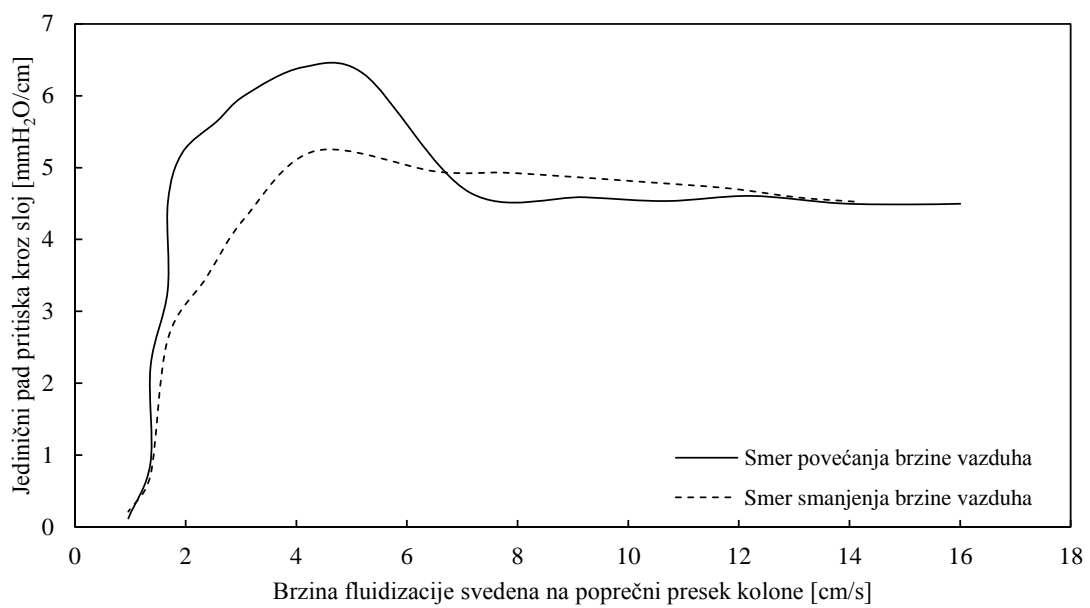
Slika P4.24 Očitavanje minimalne brzine fluidizacije za uzorak 8



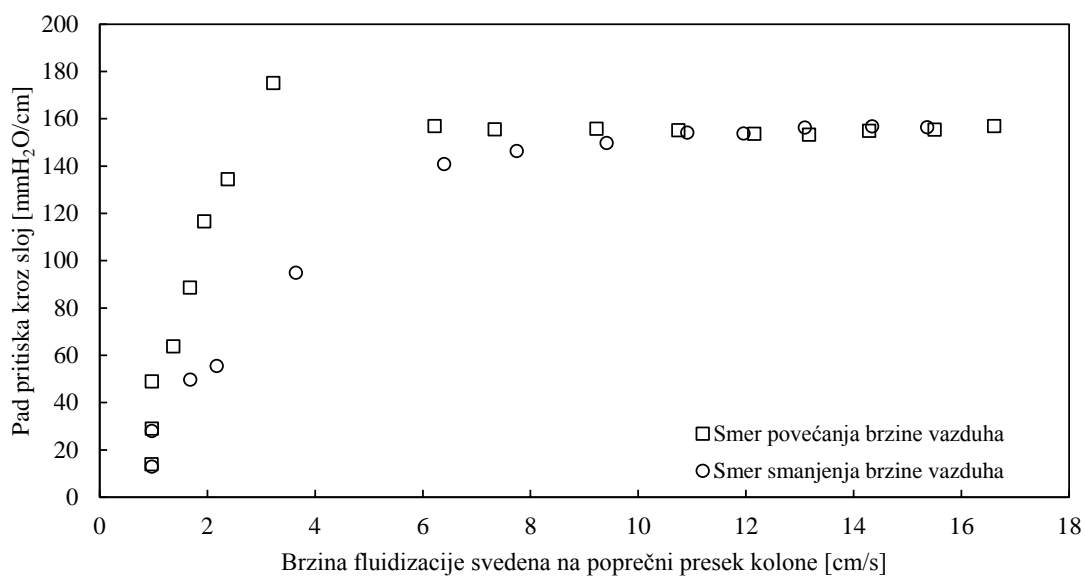
Slika P4.25 Zavisnost pada pritiska od brzine fluidizacije za uzorak 9



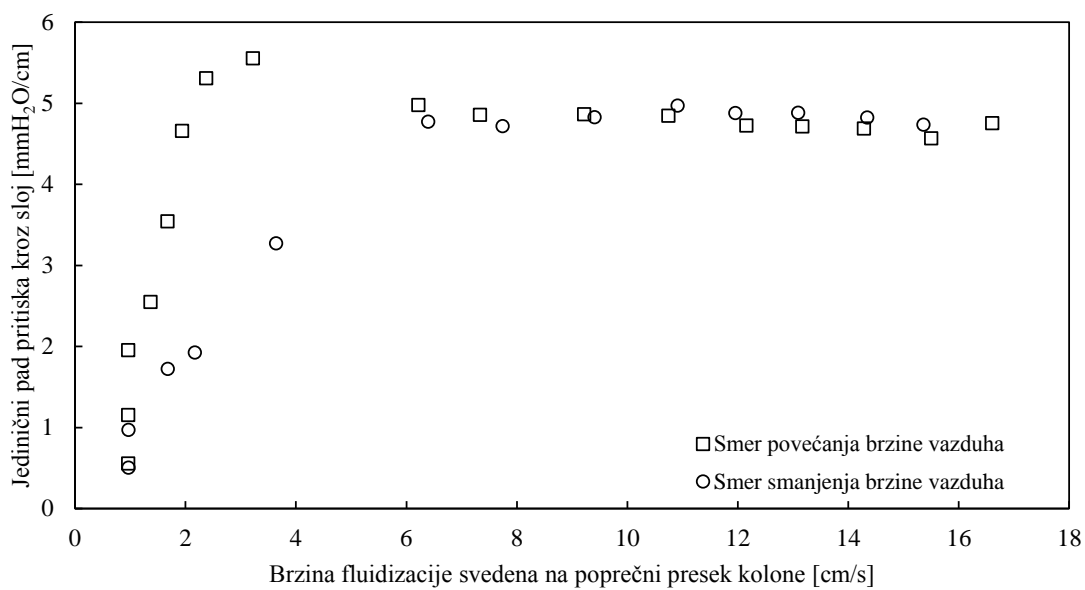
Slika P4.26 Zavisnost jediničnog pada pritiska od brzine fluidizacije za uzorak 9



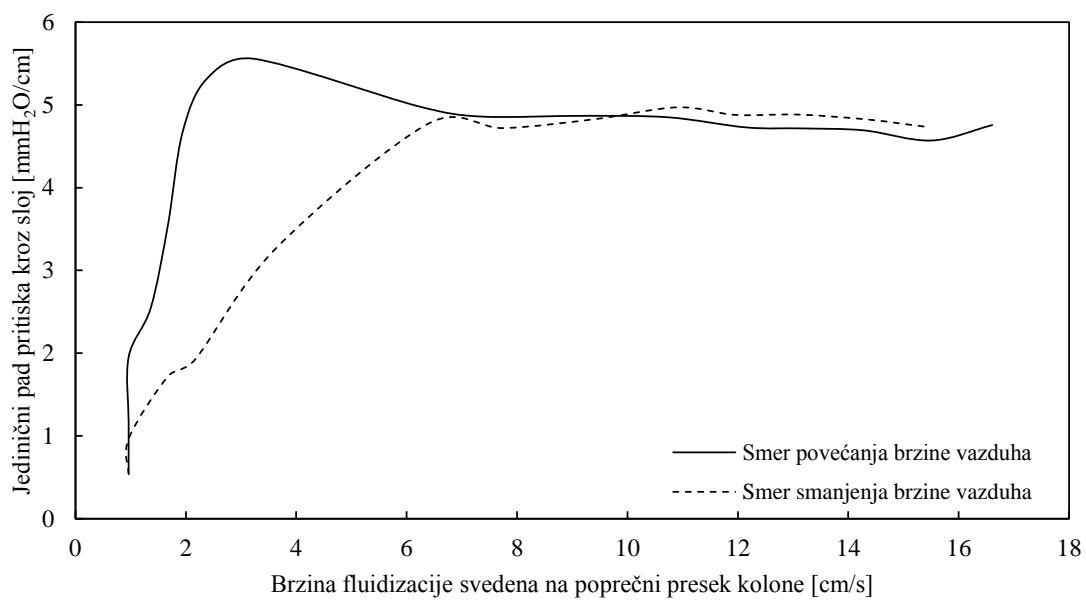
Slika P4.27 Očitavanje minimalne brzine fluidizacije za uzorak 9



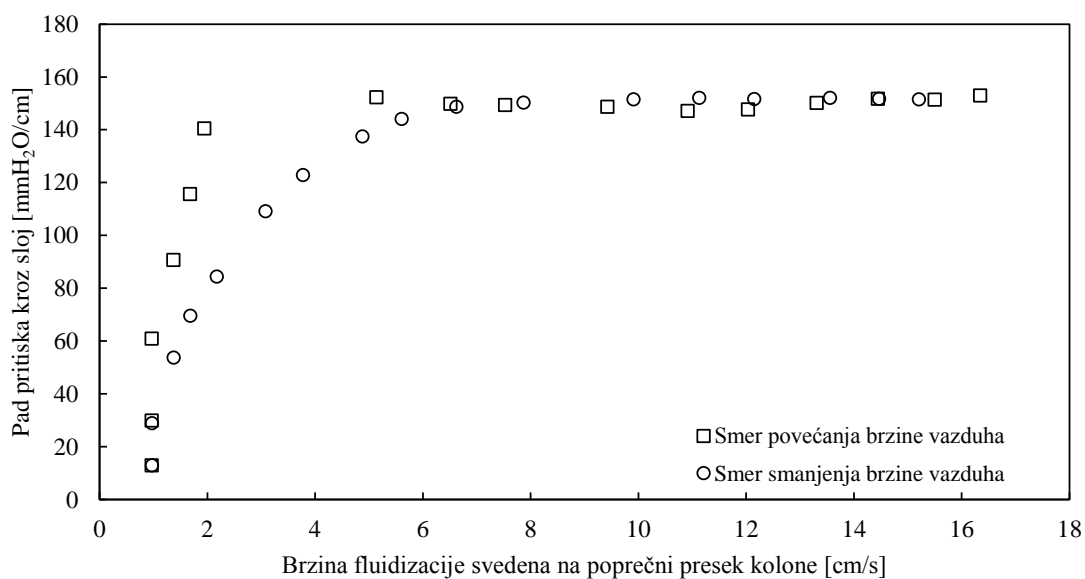
Slika P4.28 Zavisnost pada pritiska od brzine fluidizacije za uzorak 10



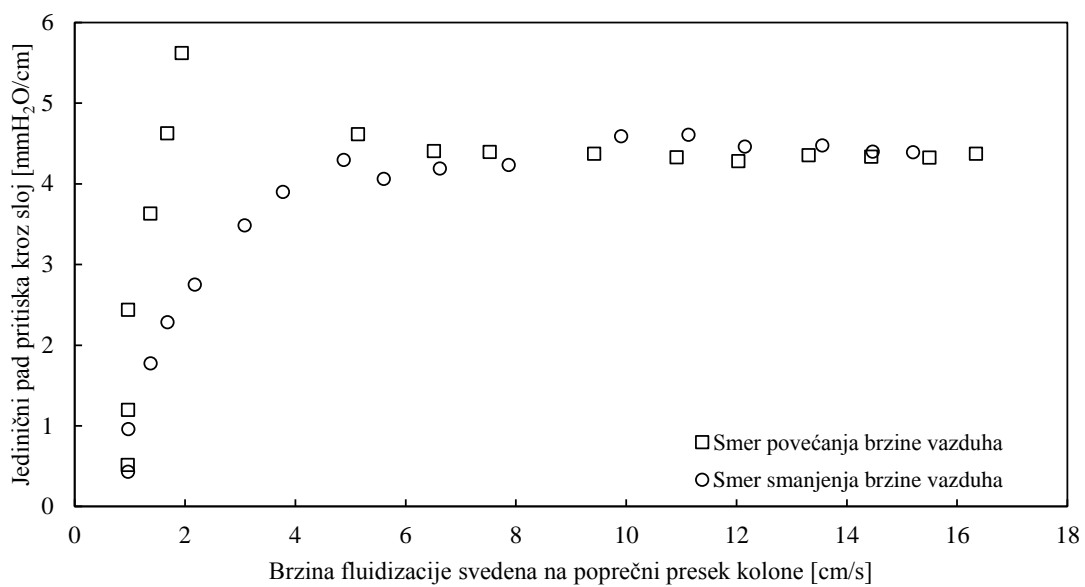
Slika P4.29 Zavisnost jediničnog pada pritiska od brzine fluidizacije za uzorak 10



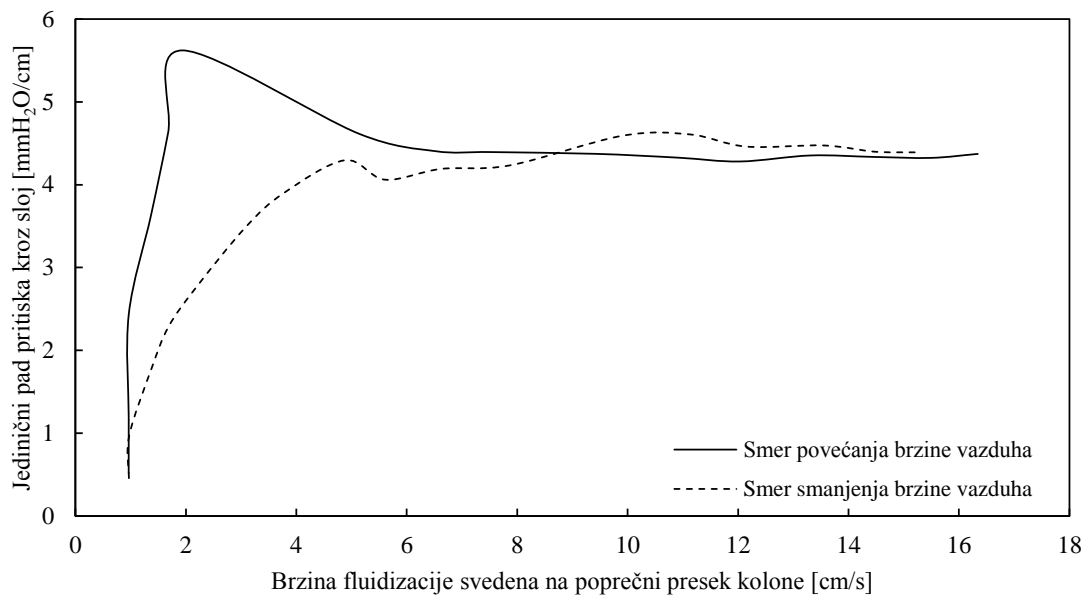
Slika P4.30 Očitavanje minimalne brzine fluidizacije za uzorak 10



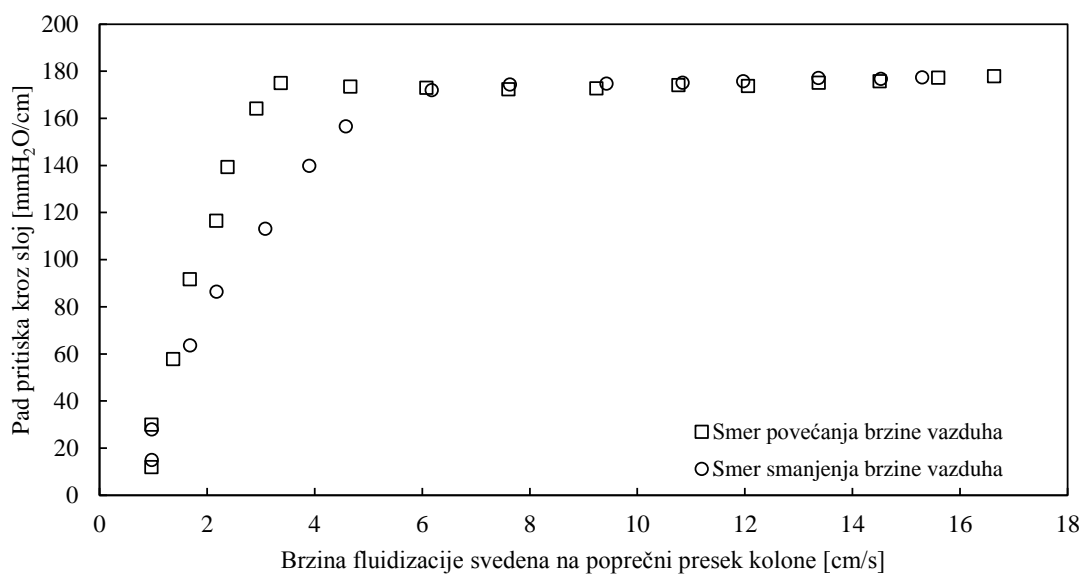
Slika P4.31 Zavisnost pada pritiska od brzine fluidizacije za uzorak 11



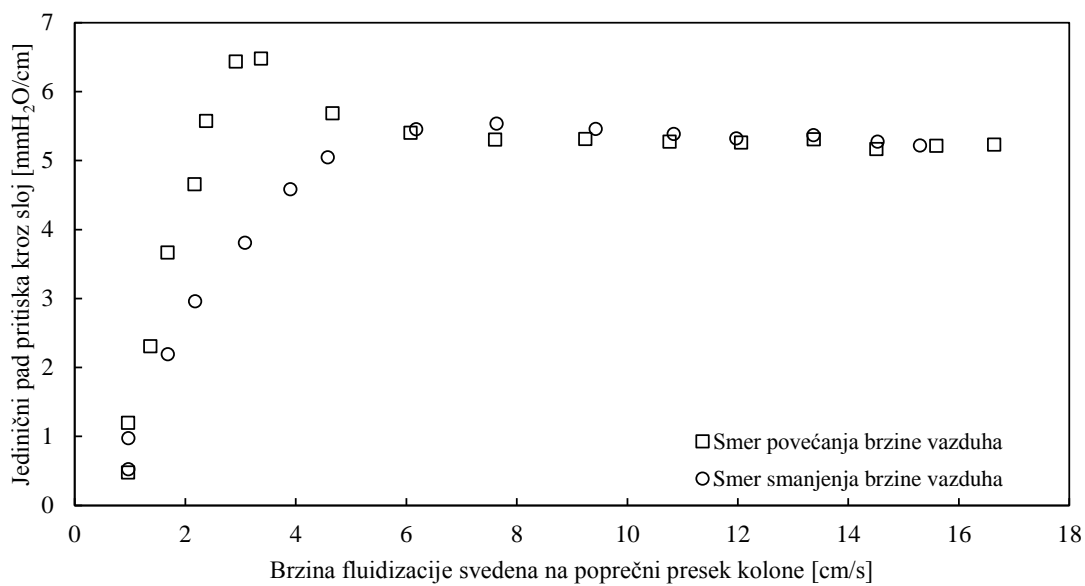
Slika P4.32 Zavisnost jediničnog pada pritiska od brzine fluidizacije za uzorak 11



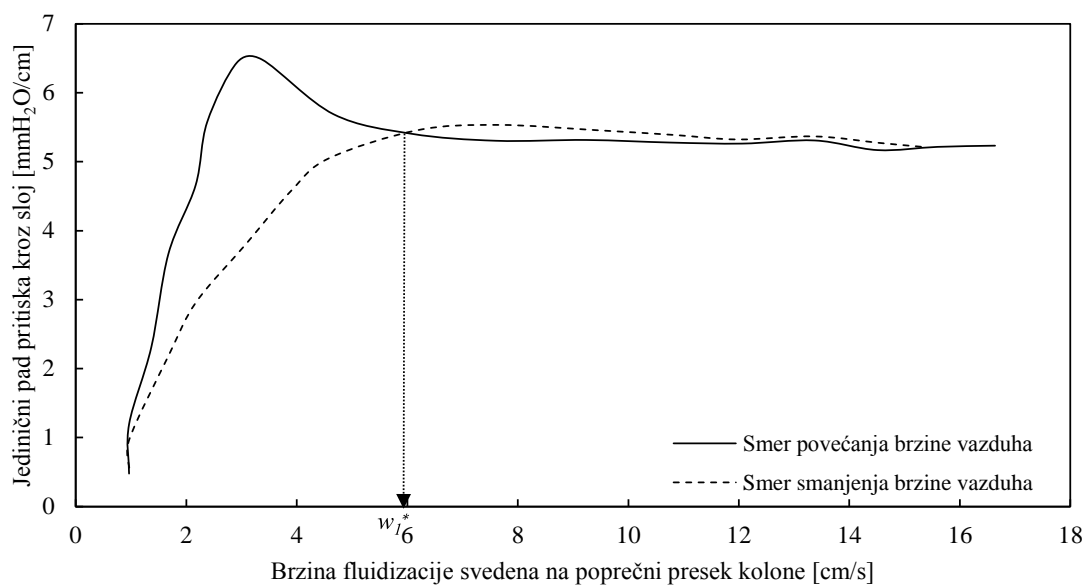
Slika P4.33 Očitavanje minimalne brzine fluidizacije za uzorak 11



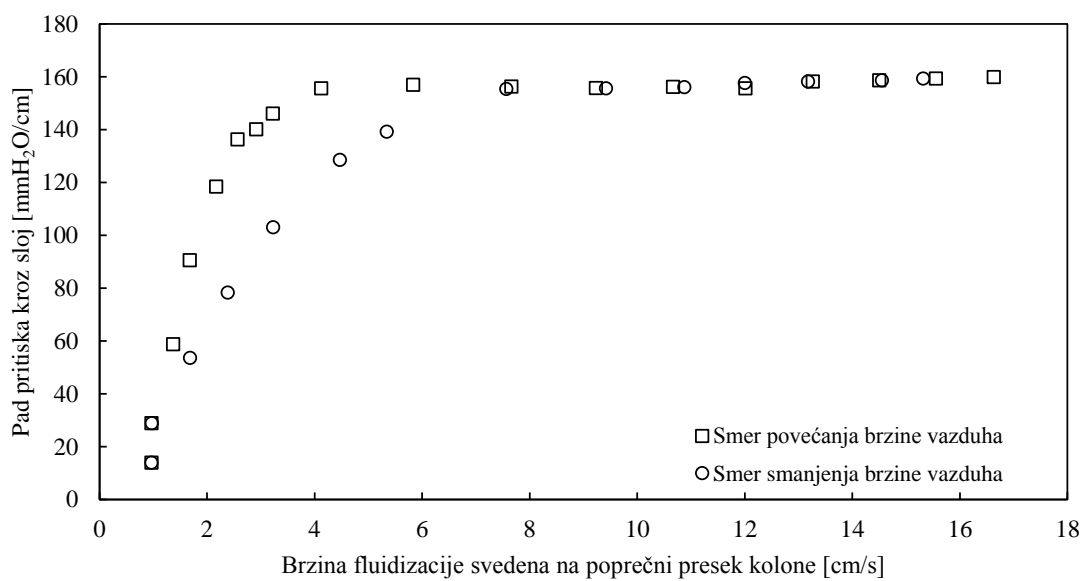
Slika P4.34 Zavisnost pada pritiska od brzine fluidizacije za uzorak 12



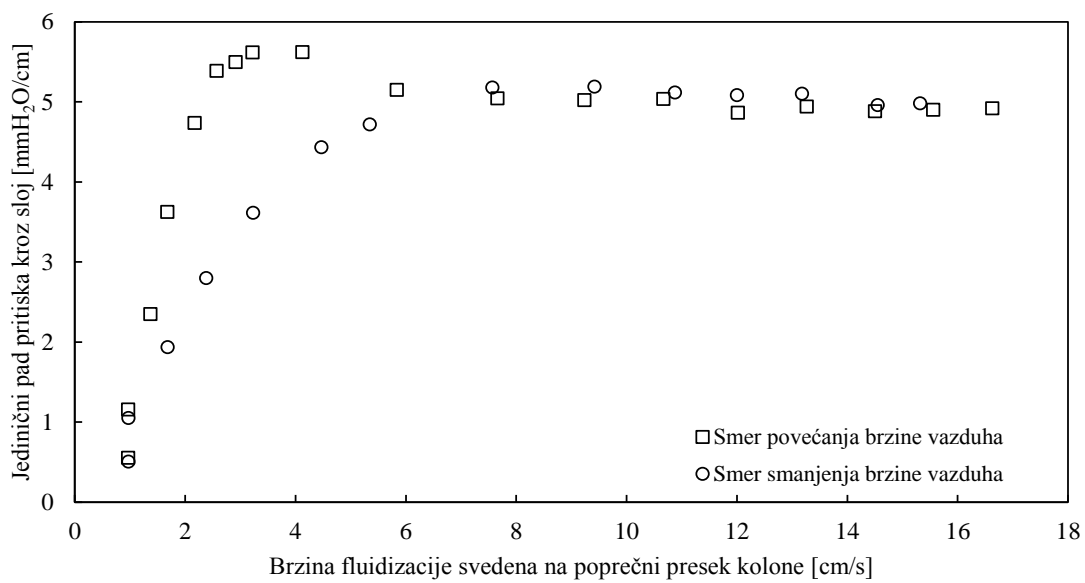
Slika P4.35 Zavisnost jediničnog pada pritiska od brzine fluidizacije za uzorak 12



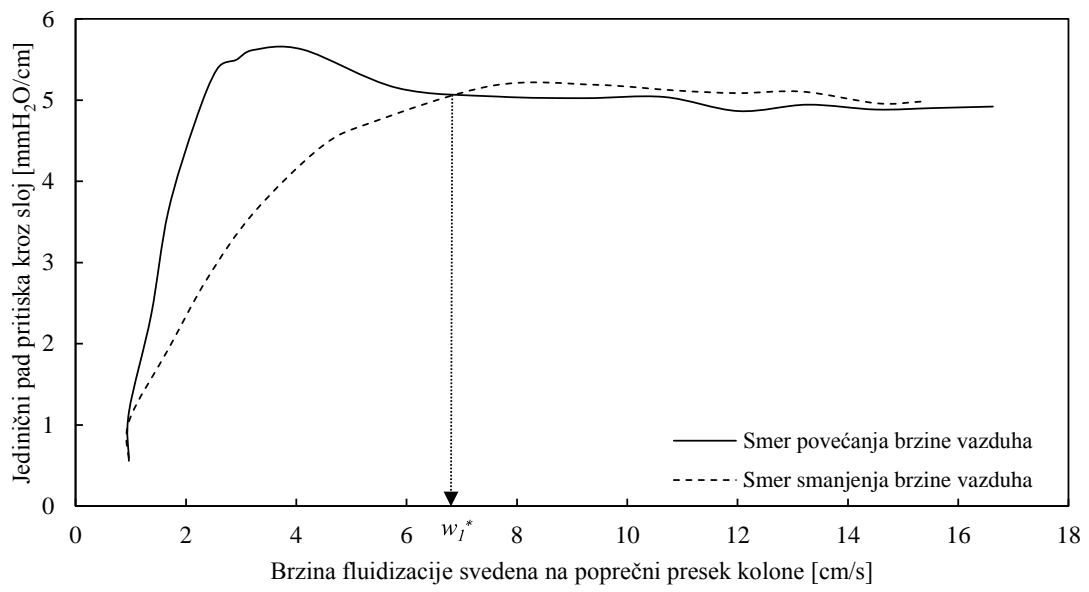
Slika P4.36 Očitavanje minimalne brzine fluidizacije za uzorak 12



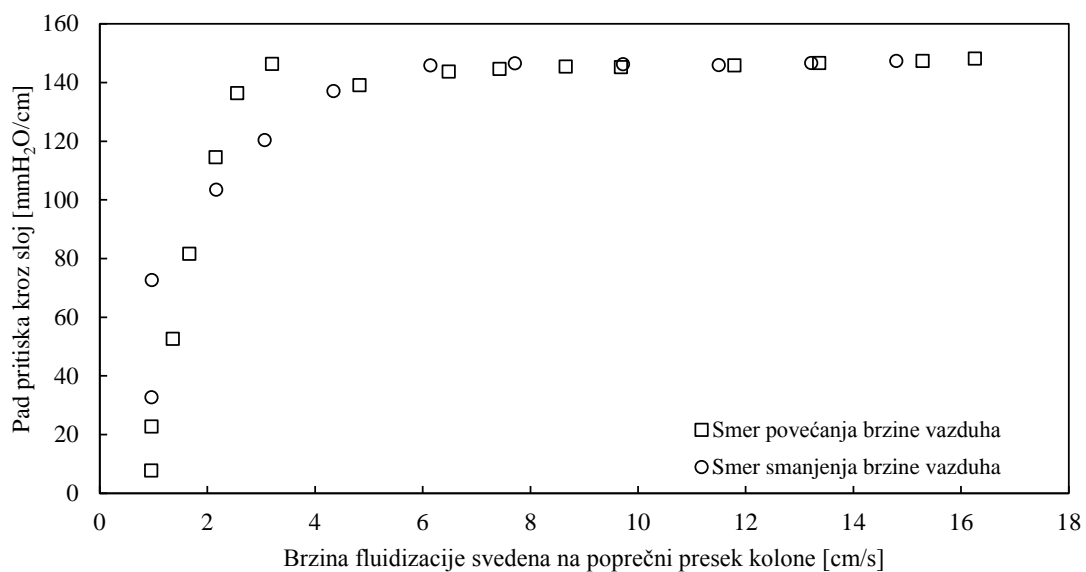
Slika P4.37 Zavisnost pada pritiska od brzine fluidizacije za uzorak 13



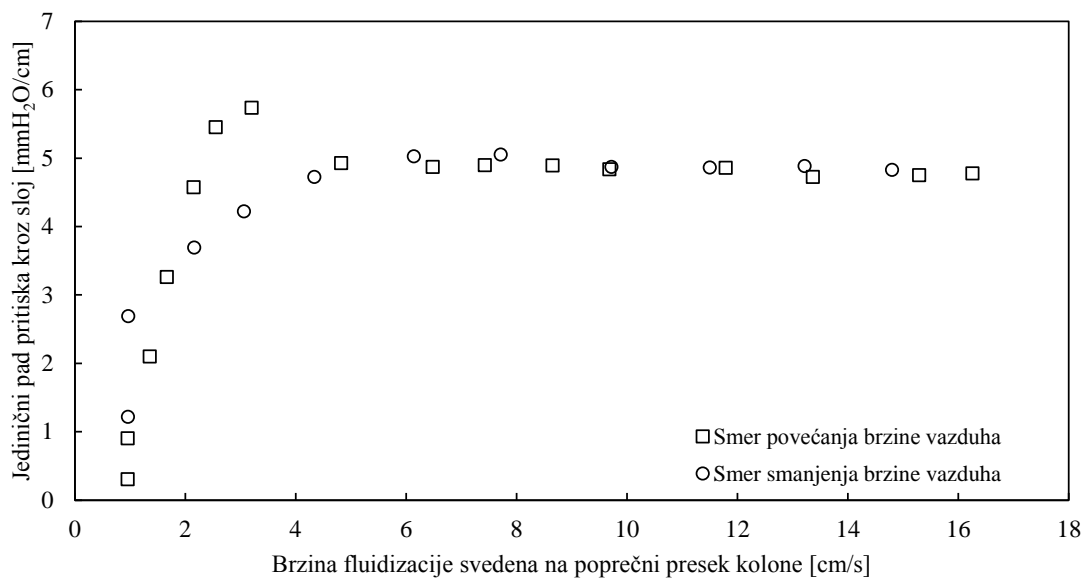
Slika P4.38 Zavisnost jediničnog pada pritiska od brzine fluidizacije za uzorak 13



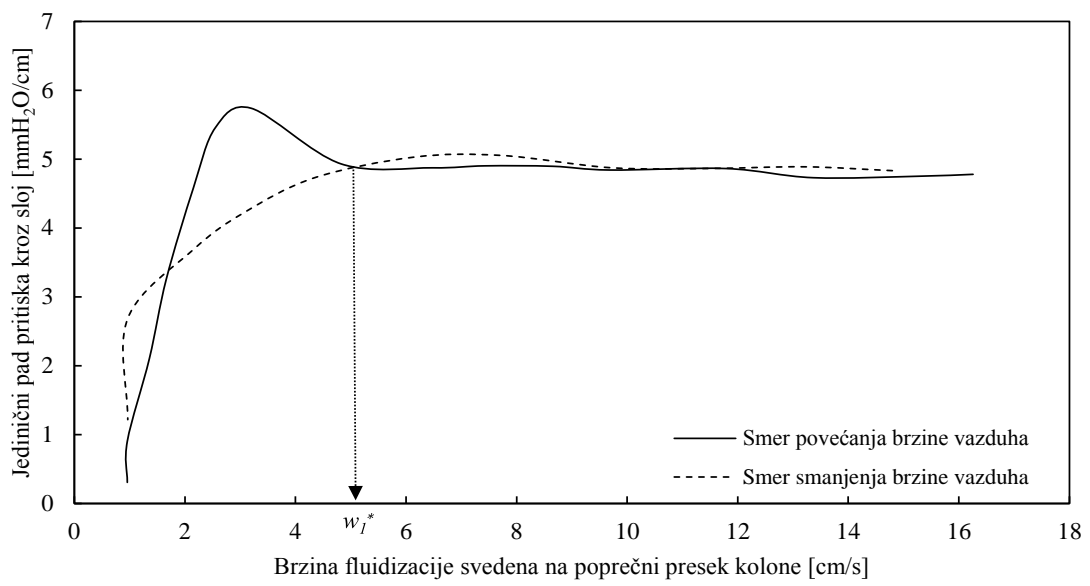
Slika P4.39 Očitavanje minimalne brzine fluidizacije za uzorak 13



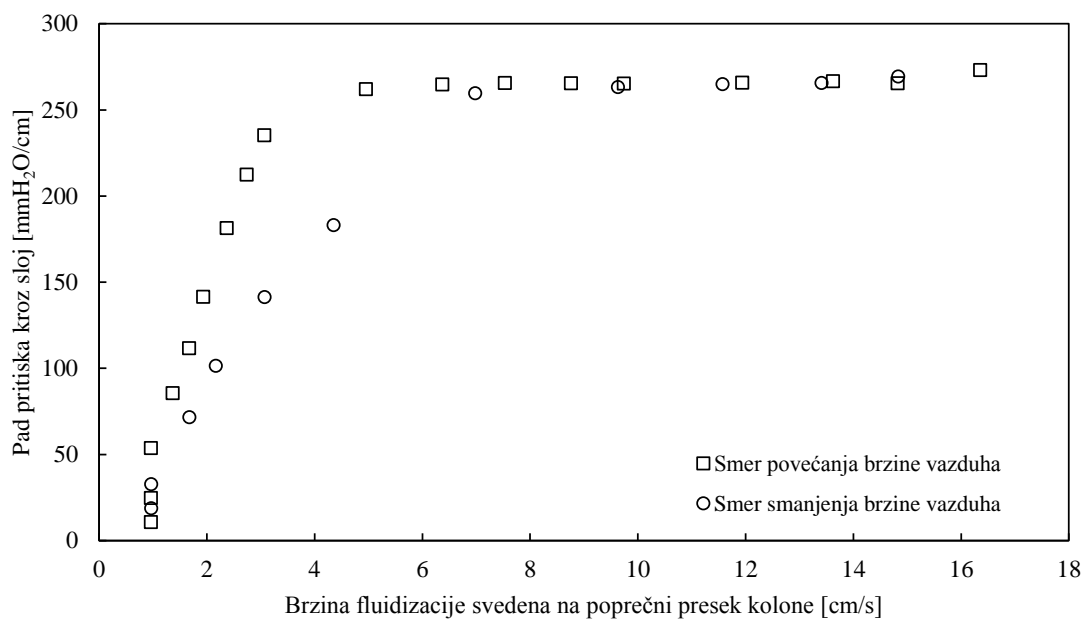
Slika P4.40 Zavisnost pada pritiska od brzine fluidizacije za uzorak 45



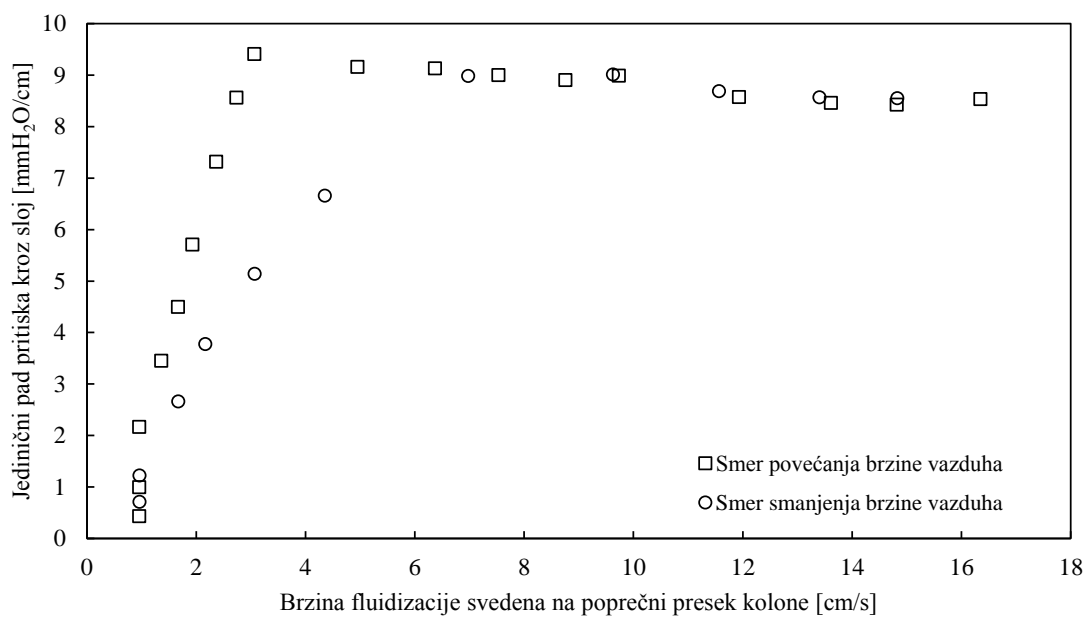
Slika P4.41 Zavisnost jediničnog pada pritiska od brzine fluidizacije za uzorak 45



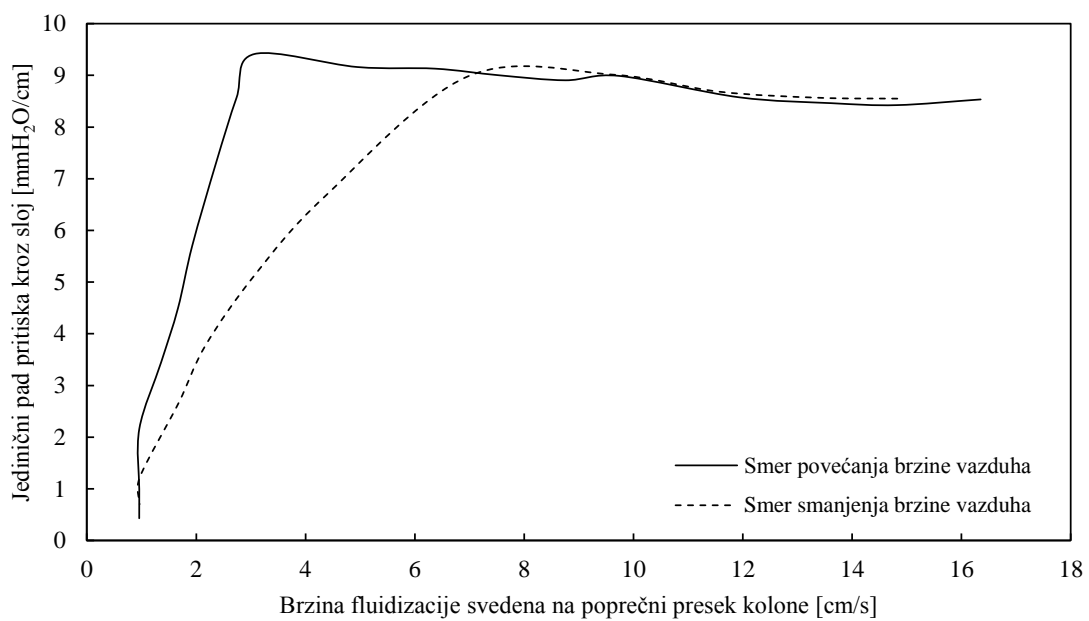
Slika P4.42 Očitavanje minimalne brzine fluidizacije za uzorak 45



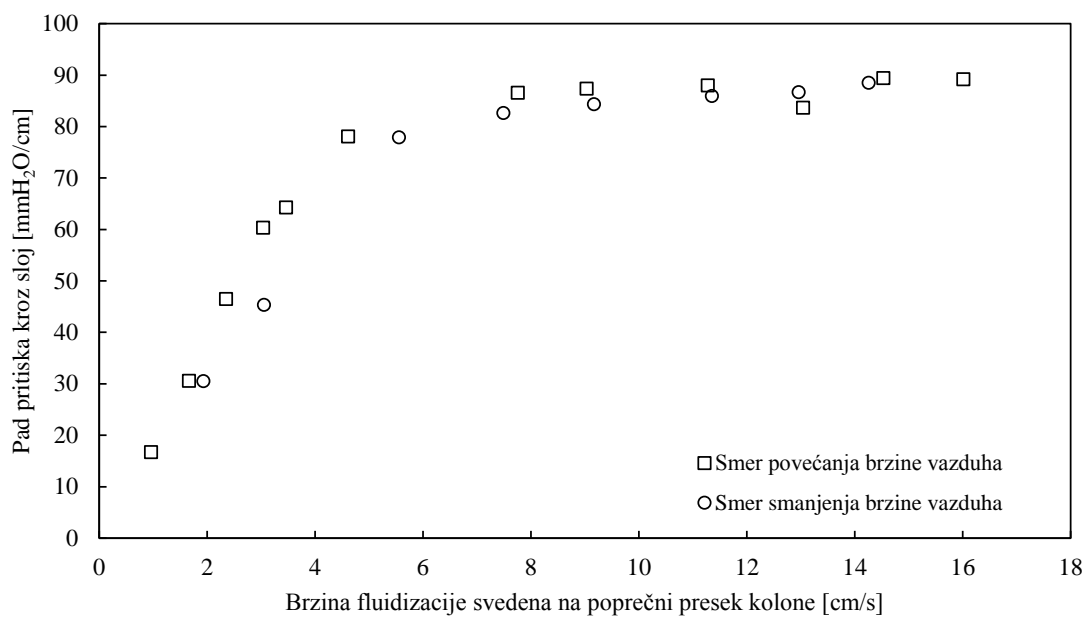
Slika P4.43 Zavisnost pada pritiska od brzine fluidizacije za uzorak 46



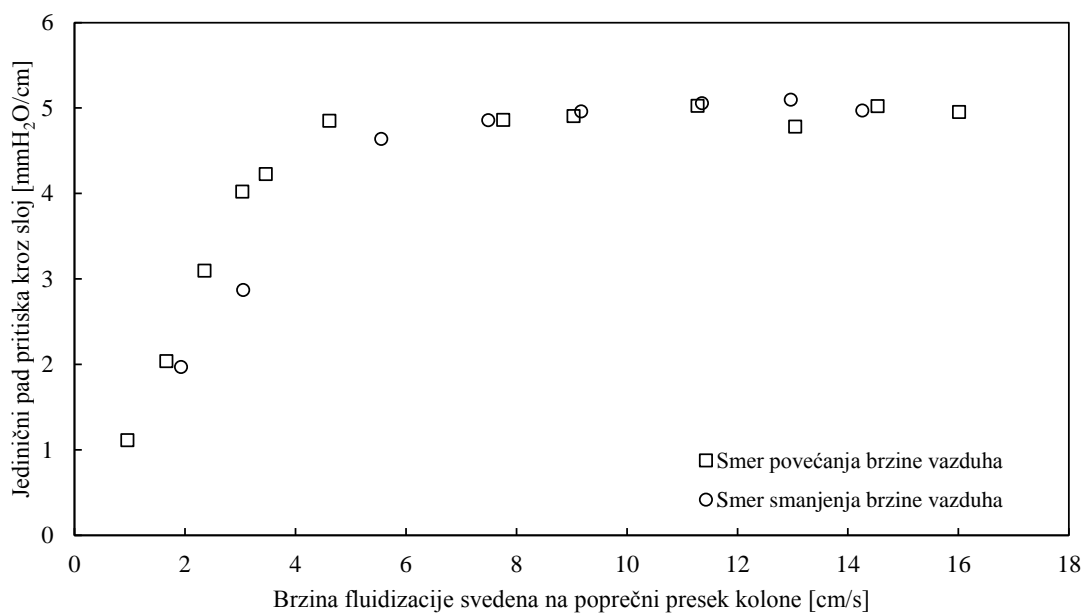
Slika P4.44 Zavisnost jediničnog pada pritiska od brzine fluidizacije za uzorak 46



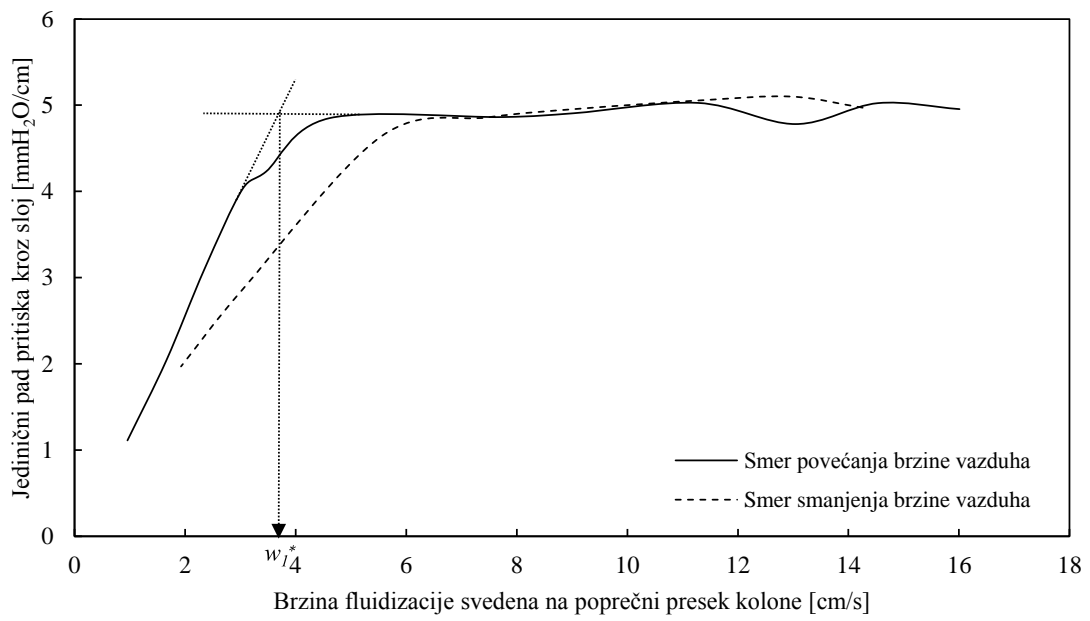
Slika P4.45 Očitavanje minimalne brzine fluidizacije za uzorak 46



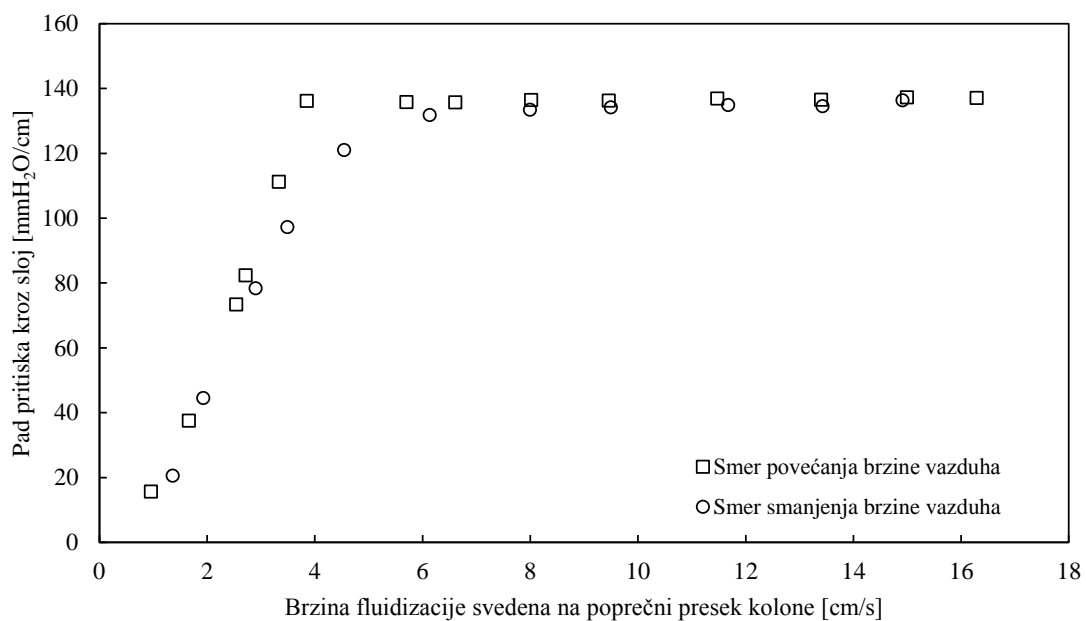
Slika P4.46 Zavisnost pada pritiska od brzine fluidizacije za uzorak 50



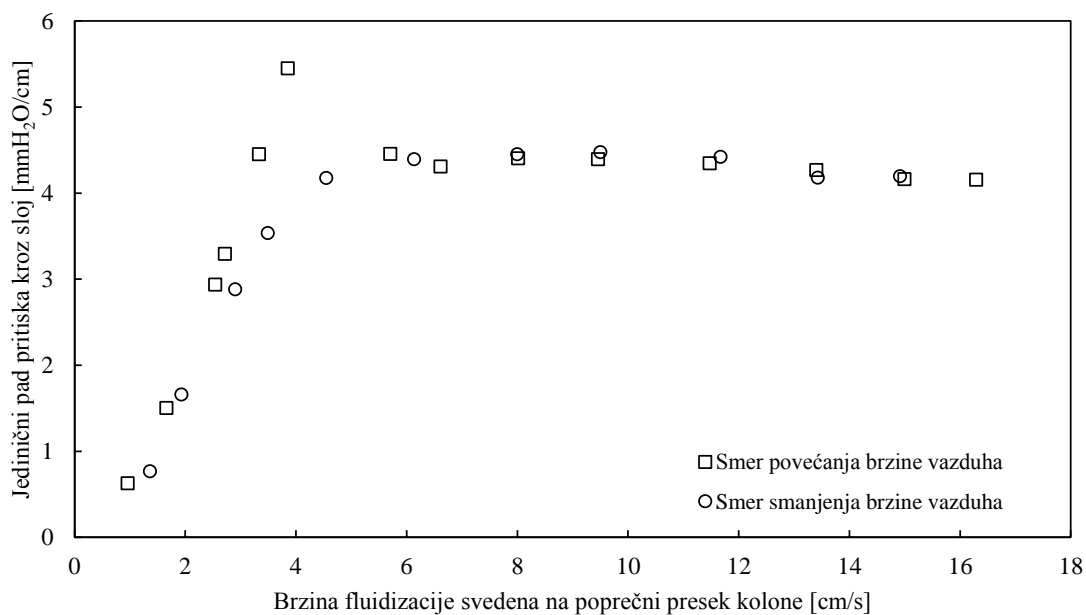
Slika P4.47 Zavisnost jediničnog pada pritiska od brzine fluidizacije za uzorak 50



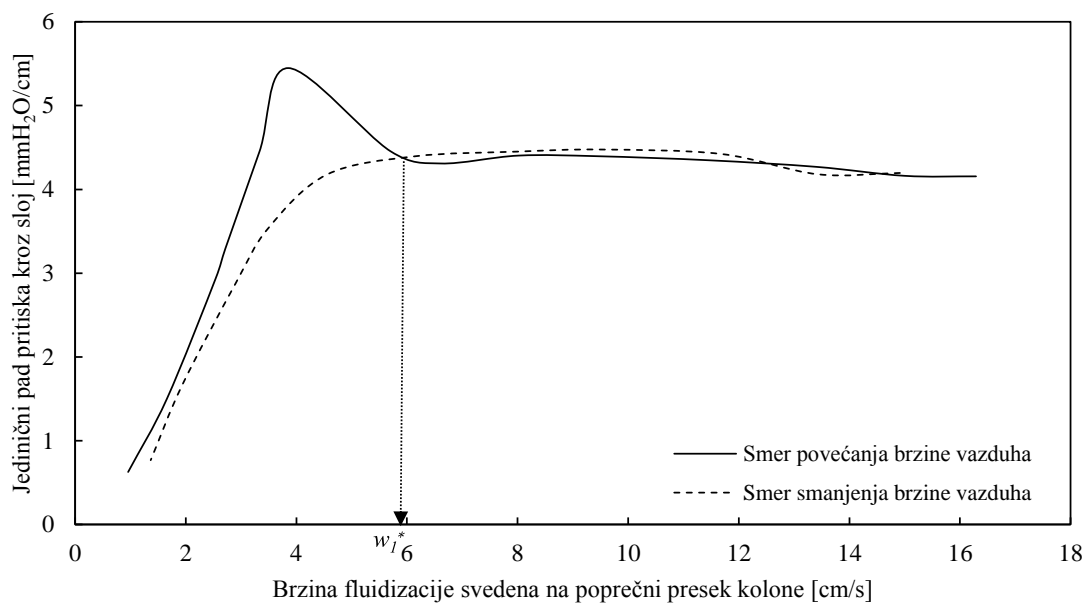
Slika P4.48 Očitavanje minimalne brzine fluidizacije za uzorak 50



Slika P4.49 Zavisnost pada pritiska od brzine fluidizacije za uzorak 52



Slika P4.50 Zavisnost jediničnog pada pritiska od brzine fluidizacije za uzorak 52



Slika P4.51 Očitavanje minimalne brzine fluidizacije za uzorak 52

PRILOG 5 – Rezultati eksperimentalnih merenja pritiska na realnom postrojenju

Tabela P5.1 Rezultati merenja pritiska u cevovodu 1

	MM1 (22 m)	MM2 (52 m)	MM3 (90 m)	MM4 (112 m)	MM5 (147 m)	MM6 (192 m)	MM7 (230 m)	MM8 (291 m)	MM9 (347 m)	MM10 (423 m)	MM11 (465 m)
	p_{abs} (bar)	p_{abs} (bar)	p_{abs} (bar)	p_{abs} (bar)	p_{abs} (bar)	p_{abs} (bar)	p_{abs} (bar)	p_{abs} (bar)	p_{abs} (bar)	p_{abs} (bar)	p_{abs} (bar)
	3,4	3,3	3,2	Merno mesto nije bilo u funkciji	2,35	2,6	2	2,05	1,8	1,5	1,3
	2,9	2,8	2,7		1,8	2,1	1,75	1,62		1,5	1,28
					1,7	1,9	1,75	1,75	1,8	1,3	1,25
	3,4	3,2	2,8		1,8	2,2	1,9	2	1,6	1,4	1,5
	3,4	3,15	3,2		2,2	2,4	2,15	2	1,8	1,4	1,3
	3,1	3,1	3,2		2,3	2,7	2,35	2,48	1,8	1,8	1,45
	2,9	2,9	2,7		1,8	2,1	1,75	1,8	2,2	1,4	1,3
	3	2,9	2,6		1,85	2,3	1,95	1,8	1,7	1,5	1,4
	3,4	3,25	3,4		2,7	2,8	2,5	2,4	1,8	1,9	1,6
	2,8	2,85	2,85		1,9	2,3	2	2,1	2,4	1,6	1,3
	3,1		2,35		1,75	1,9	1,8	1,85	1,8	1,5	1,3
	2,9	2,9	2,9		1,9	2,5	2,05	2	1,6	1,6	1,4
	2,9	2,85	2,85		1,9	2,5	2	2,4	1,9	1,45	1,2
	2,8		2,4		1,8	2,2	2	2	1,95	1,6	1,4
	3,3	2,9	2,9		2	2,6	2,15	1,8	2	1,6	1,3
	3,1	2,8	2,8		1,9	2,3	2,1	2	1,6	1,4	1,3
	3,2	2,9	2,9		2,1	2,5	2,15	2	1,7	1,45	1,4
	2,8	2,7	2,7		1,9	2,4	2,1	2,2	1,8	1,6	1,35
	2,9	2,75	2,75		1,8	2,1	1,95	2	1,8	1,5	1,45
								2	2		1,3
							1,8	1,8		1,4	
							2,1			1,4	
Srednja vr.	3,07	2,95	2,84		1,97	2,34	2,02	2,01	1,84	1,53	1,36
MIN	2,80	2,70	2,35		1,70	1,90	1,75	1,62	1,60	1,30	1,20
MAX	3,40	3,30	3,40		2,70	2,80	2,50	2,48	2,40	1,90	1,60

Tabela P5.2 Rezultati merenja pritiska u cevovodu 2

	MM1 (22 m)	MM2 (52 m)	MM3 (90 m)	MM4 (112 m)	MM5 (147 m)	MM (192 m)	MM7 (230 m)	MM8 (291 m)	MM9 (347 m)	MM10 (423 m)	MM11 (465 m)
	p _{abs} (bar)	p _{abs} (bar)	p _{abs} (bar)	p _{abs} (bar)	p _{abs} (bar)	p _{abs} (bar)	p _{abs} (bar)	p _{abs} (bar)	p _{abs} (bar)	p _{abs} (bar)	p _{abs} (bar)
Merno mesto nije bilo u funkciji		3,2	3	3	2,9	1,9	1,6	2	1,9		1,25
		2,6	2,4	2,2	2,2	1,5	1,55	2,2	1,6		1,2
		3,2	3	3,1	2,9	1,9	1,65	1,6	1,8		1,16
		3	2,8	2,9	2,5	2	1,35	2	2		1,3
		2,8	2,6	2,4	2,4	1,75	1,55	2,18	1,7		1,15
		2,6	2	2,1	1,8	1,4	1,65	2,28	1,3		1,2
		2,8	2,2	2,45	2,1	1,5	1,5	1,95	1,2		1,3
		3,25	3	3,1	2,9	1,9	1,35	2	1,5		1,1
		3,4	3,2	3,3	3,2	2,2	1,3	1,6	2		1,15
		2,95	2,7	2,7	2,6	2	1,5	1,7	1,8		1,28
		2,9	2,7	2,5	2,4	1,8	1,75	2,3	1,7		1,3
		3	2,8	2,7	2,3	1,8	1,6	2	1,5		1,15
		2,8	2,7	2,8	2,5	2,2	1,5	2	1,3		1,25
		3,15	2,8	2,95	2,8	1,7	1,7	2,3	1,4		1,2
		3,15	3	3	2,9	1,7	1,5	1,9	1,7		1,2
		3,2	3	3	2,8	1,8	1,4	1,7	2,1		1,35
		2,6	2,3	2,6	2,3	2,3	1,65	2	1,9		
		3,15	3	3	2,7	2,1	1,8	2,3	1,6		
		3,3	3,2	3	2,9	1,75	1,7	2,3	1,7		
							2	1,45	1,7	2,2	
						2,2	1,6	1,7			
							1,85	2,5			
								1,7			
								1,65			
								1,9			
								1,65			
Srednja vrednost		3,00	2,76	2,78	2,58	1,88	1,57	1,97	1,70		1,22
Minimalna vrednost		2,60	2,00	2,10	1,80	1,4	1,30	1,60	1,20		1,10
Maksimalna vrednost		3,40	3,20	3,30	3,20	2,3	1,85	2,50	2,20		1,35

PRILOG 6 – Rezultati dobijeni numeričim simulacijama različitih modela

Tabela P6.1 Rezultati proračuna pada pritiska u cevovodu 1 prema različitim modelima

	MM1 (22 m)	MM2 (52 m)	MM3 (90 m)	MM4 (112 m)	MM5 (147 m)	MM6 (192 m)	MM7 (230 m)	MM8 (291 m)	MM9 (347 m)	MM10 (423 m)	MM11 (465 m)
	p_{abs} (bar)	p_{abs} (bar)	p_{abs} (bar)	p_{abs} (bar)	p_{abs} (bar)	p_{abs} (bar)	p_{abs} (bar)	p_{abs} (bar)	p_{abs} (bar)	p_{abs} (bar)	p_{abs} (bar)
Dogin i Lebedev (1962) $A = 1 \cdot 10^{-6}$	3,03	2,90	2,81	Merno mesto nije bilo u funkciji	2,68	2,57	2,48	2,34	2,21	2,03	1,94
Dogin i Lebedev (1962) $A = 1,1 \cdot 10^{-6}$	3,03	2,89	2,79		2,64	2,52	2,42	2,26	2,12	1,92	1,81
Dogin i Lebedev (1962) $A = 1,2 \cdot 10^{-6}$	3,03	2,88	2,77		2,60	2,47	2,36	2,18	2,02	1,80	1,67
Dogin i Lebedev (1962) $A = 1,3 \cdot 10^{-6}$	3,03	2,87	2,75		2,56	2,42	2,29	2,10	1,91	1,67	1,53
Dogin i Lebedev (1962) $A = 1,4 \cdot 10^{-6}$	3,03	2,87	2,73		2,52	2,36	2,22	2,00	1,79	1,52	1,36
Dogin i Lebedev (1962) $A = 1,5 \cdot 10^{-6}$	3,03	2,87	2,72		2,48	2,30	2,14	1,89	1,66	1,34	1,17
Dogin i Lebedev (1962) $A = 1,6 \cdot 10^{-6}$	3,03	2,91	2,72		2,44	2,22	2,03	1,73	1,46	1,09	0,88
Dogin i Lebedev (1962) $A = 1,7 \cdot 10^{-6}$	3,03	2,89	2,69		2,39	2,16	1,96	1,64	1,35	0,95	0,73
Dogin i Lebedev (1962) $A = 1,8 \cdot 10^{-6}$	3,03	2,89	2,67		2,35	2,09	1,87	1,53	1,21	0,78	0,54
Dogin i Lebedev (1962) $A = 1,9 \cdot 10^{-6}$	3,03	2,89	2,65		2,29	2,01	1,77	1,39	1,04	0,56	0,29
Dogin i Lebedev (1962) $A = 2 \cdot 10^{-6}$	3,03	2,88	2,63		2,24	1,93	1,67	1,25	0,87	0,35	0,06
Muschelknautz i Krambrock (1969)	3,03	2,88	2,70		2,42	2,21	2,02	1,73	1,46	1,09	0,89
Michaelidis (1987)	3,03	2,99	2,96		2,91	2,87	2,84	2,79	2,74	2,68	2,64
Shimizu (1978)	3,03	3,0	2,98		2,95	2,93	2,91	2,88	2,85	2,82	2,80

Tabela P6.2 Rezultati proračuna pada pritiska u cevovodu 2 prema različitim modelima

	MM1 (22 m)	MM2 (52 m)	MM3 (90 m)	MM4 (112 m)	MM5 (147 m)	MM (192 m)	MM7 (230 m)	MM8 (291 m)	MM9 (347 m)	MM10 (423 m)	MM11 (465 m)
	p _{abs} (bar)	p _{abs} (bar)	p _{abs} (bar)	p _{abs} (bar)	p _{abs} (bar)	p _{abs} (bar)	p _{abs} (bar)	p _{abs} (bar)	p _{abs} (bar)	p _{abs} (bar)	p _{abs} (bar)
Dogin i Lebedev (1962) $A = 1 \cdot 10^{-6}$	Merno mesto nije bilo u funkciji	3,00	2,73	2,68	2,59	2,49	2,40	2,25	2,12	Merno mesto nije bilo u funkciji	1,84
Dogin i Lebedev (1962) $A = 1,1 \cdot 10^{-6}$		3,00	2,70	2,64	2,55	2,43	2,33	2,17	2,02		1,70
Dogin i Lebedev (1962) $A = 1,2 \cdot 10^{-6}$		3,00	2,67	2,61	2,50	2,37	2,26	2,08	1,91		1,56
Dogin i Lebedev (1962) $A = 1,3 \cdot 10^{-6}$		3,00	2,64	2,57	2,45	2,31	2,18	1,98	1,79		1,40
Dogin i Lebedev (1962) $A = 1,4 \cdot 10^{-6}$		3,00	2,62	2,54	2,41	2,24	2,10	1,87	1,66		1,22
Dogin i Lebedev (1962) $A = 1,5 \cdot 10^{-6}$		3,00	2,59	2,50	2,35	2,16	2,01	1,75	1,52		1,03
Dogin i Lebedev (1962) $A = 1,6 \cdot 10^{-6}$		3,00	5,58	2,47	2,29	2,06	1,87	1,57	1,29		0,69
Dogin i Lebedev (1962) $A = 1,7 \cdot 10^{-6}$		3,00	2,54	2,42	2,24	1,99	1,79	1,46	1,16		0,53
Dogin i Lebedev (1962) $A = 1,8 \cdot 10^{-6}$		3,00	2,50	2,38	2,18	1,93	1,72	1,38	1,07		0,41
Dogin i Lebedev (1962) $A = 1,9 \cdot 10^{-6}$		3,00	2,47	2,33	2,12	1,84	1,60	1,23	0,88		0,15
Dogin i Lebedev (1962) $A = 2 \cdot 10^{-6}$		3,00	2,43	2,28	2,04	1,73	1,46	1,04	0,65		-
Muschelknautz i Krambrock (1969)		3,00	2,79	2,67	2,48	2,24	2,03	1,70	1,39		0,75
Michaelidis (1987)		3,00	2,91	2,89	2,86	2,82	2,79	2,74	2,69		2,60
Shimizu (1978)		3,00	2,94	2,93	2,91	2,89	2,87	2,84	2,81		2,75

БИОГРАФСКИ ПОДАЦИ АУТОРА

Никола В. Карличић рођен је 6. октобра 1987. године. у Сомбору. Основну школу „Владислав Петковић Дис“ завршио је 2002. године, а „Пету београдску гимназију“ 2006, након чега уписује Машински факултет у Београду. Основне академске студије завршио је 2009. године са просечном оценом 9,48, а Дипломске академске студије 2011. године, на модулу Процесна техника и заштита животне средине, са просечном оценом 9,42 и оценом 10 на дипломском раду. Докторске студије уписује школске 2011/2012. на Катедри за процесну технику на Машинском факултету у Београду.

Стипендиста је Фонда за младе таленте Републике Србије, Беочинске фабрике цемента „Lafarge“, Министарства просвете Републике Србије и ЈП „ЕПС“. Више пута је био награђиван од стране факултета за одличан успех. Стручну праксу, кандидат је обављао у ЈКП „Београдске електране“ и компанији „Соко Штарк“, а стручно оспособљавање и усавршавање и у ЈП „Електропривреда Србије“.

Од 2012. запослен је на Машинском факултету у Београду, на Катедри за процесну технику у звању сарадника на пројекту, а од 2013. године унапређен је у звање истраживач сарадник. Крајем 2015. године изабран је у звање асистента са пуним радним временом за ужу научну област Процесна техника, а на исто место је реизабран 2018. године. Такође, ради и као испитивач у акредитованој Лабораторији за процесну технику, енергетску ефикасност и заштиту животне средине, при Катедри за процесну технику Машинског факултета Универзитета у Београду.

Током рада на Катедри за процесну технику, поред редовних обавеза и рада на пројекту Министарства науке и технолошког развоја („Смањење аерозагађења из термоелектрана у ЈП Електропривреда Србије“ ИИИ 42010), активно учествује у извођењу наставе (аудиторне и лабораторијске вежбе) на више предмета у оквиру Основних и Мастер академских студија: Процеси и опрема у заштити животне средине, Механичке и хидромеханичке операције и опрема, Гориви, технички и медицински гасови и Биотехнологија, Увод у процесно инжењерство и заштита животне средине, Мерења и управљање у процесној индустрији, Принципи

заштите животне и радне средине, Процеси и постројења за припрему вода, Хемијске и биохемијске операције и опрема, Заштита ваздуха и Сушаре.

У сарадњи са привредом активно је учествовао у изради више главних и идејних пројеката и техничких документација, у великом броју индустријских мерења, испитивањима посуда под притиском, испитивању котлова (анализа и контрола сагоревања, мерење емисије, гаранцијска испитивања), изради процена утицаја на животну средину.

У оквиру научноистраживачке делатности, аутор је или ко-аутор већег броја радова изложених на симпозијумима, стручним скуповима и научним часописима. Вишегодишњи је члан организационог одбора конгреса о процесној индустрији „Processing“.

Течно говори енглески језик (чита и пише). Активно користи рачунар и то софтверске пакете: Linux Mint, Ubuntu, Libre Office, Open Office, Microsoft Windows, Microsoft Office, AutoCad, Corel Draw, MathCad, SPSS Statistics.

Прилог 3.

Изјава о коришћењу

Овлашћујем Универзитетску библиотеку „Светозар Марковић“ да у Дигитални репозиторијум Универзитета у Београду унесе моју докторску дисертацију под насловом:

СВОЈСТВА ПЕПЕЛА ИЗ ТЕРМОЕЛЕКТРАНА
ЗНАЧАЈНА ЗА ОДЛАГАЊЕ И ПРИМЕНУ

која је моје ауторско дело.

Дисертацију са свим прилозима предао/ла сам у електронском формату погодном за трајно архивирање.

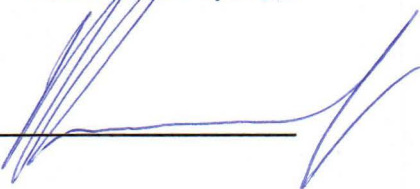
Моју докторску дисертацију похрањену у Дигитални репозиторијум Универзитета у Београду могу да користе сви који поштују одредбе садржане у одабраном типу лиценце Креативне заједнице (Creative Commons) за коју сам се одлучио/ла.

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).

У Београду, 16.01.2019.

Потпис докторанда



Прилог 2.

Изјава о истоветности штампане и електронске верзије докторског рада

Име и презиме аутора Никола В. Карличић

Број индекса Д8/11

Студијски програм Докторске студије

Наслов рада СВОЈСТВА ПЕПЕЛА ИЗ ТЕРМОЕЛЕКТРАНА ЗНАЧАЈНА ЗА
ОДЛАГАЊЕ И ПРИМЕНУ

Ментор проф. др Дејан Радић

Потписани/а Никола В. Карличић

Изјављујем да је штампана верзија мог докторског рада истоветна електронској верзији коју сам предао/ла за објављивање на порталу **Дигиталног репозиторијума Универзитета у Београду**.

Дозвољавам да се објаве моји лични подаци везани за добијање академског звања доктора наука, као што су име и презиме, година и место рођења и датум одбране рада.

Ови лични подаци могу се објавити на мрежним страницама дигиталне библиотеке, у електронском каталогу и у публикацијама Универзитета у Београду.

У Београду, 16.01.2019.

Потпис докторанда



Прилог 1.

Изјава о ауторству

Потписани-а Никола В. Карличић

број индекса Д8/11

Изјављујем

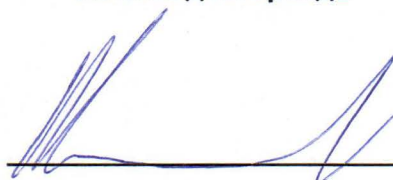
да је докторска дисертација под насловом

СВОЈСТВА ПЕПЕЛА ИЗ ТЕРМОЕЛЕКТРАНА
ЗНАЧАЈНА ЗА ОДЛАГАЊЕ И ПРИМЕНУ

- 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.

У Београду, 16.01.2019.

Потпис докторанда



1. Ауторство - Дозвољавање умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, и прераде, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце, чак и у комерцијалне сврхе. Ово је најслободнија од свих лиценци.
2. Ауторство – некомерцијално. Дозвољавање умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, и прераде, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце. Ова лиценца не дозвољава комерцијалну употребу дела.
3. Ауторство - некомерцијално – без прераде. Дозвољавање умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, без промена, преобликовања или употребе дела у свом делу, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце. Ова лиценца не дозвољава комерцијалну употребу дела. У односу на све остале лиценце, овом лиценцом се ограничава највећи обим права коришћења дела.
4. Ауторство - некомерцијално – делити под истим условима. Дозвољавање умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, и прераде, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце и ако се прерада дистрибуира под истом или сличном лиценцом. Ова лиценца не дозвољава комерцијалну употребу дела и прерада.
5. Ауторство – без прераде. Дозвољавање умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, без промена, преобликовања или употребе дела у свом делу, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце. Ова лиценца дозвољава комерцијалну употребу дела.
6. Ауторство - делити под истим условима. Дозвољавање умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, и прераде, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце и ако се прерада дистрибуира под истом или сличном лиценцом. Ова лиценца дозвољава комерцијалну употребу дела и прерада. Слична је софтверским лиценцама, односно лиценцама отвореног кода.