

УНИВЕРЗИТЕТ У НОВОМ САДУ
ТЕХНОЛОШКИ ФАКУЛТЕТ

Број 020-146

09.12. 1997 год.
НОВИ САД

UNIVERZITET U NOVOM SADU
TEHNOLOŠKI FAKULTET

**FLUIDODINAMIKA PROTIVSTRUJNOG KONTAKTORA
GAS-ČVRSTO-PUNJENJE**

doktorska disertacija

mr ZLATICA PREDOJEVIĆ

Novi Sad, 1997.

Sa zadovoljstvom se zahvaljujem:

Svom mentoru dr Draganu Petroviću, vanrednom profesoru Tehnološkog fakulteta u Novom Sadu, na sugestijama, strpljenju i svesrdnoj pomoći u radu na ovoj doktorskoj disertaciji.

Dr Aleksandru Dudukoviću, redovnom profesoru Tehnološko-metalurškog fakulteta u Beogradu, na postavljanju problema i rukovodjenju u početnoj fazi teze.

Kolegama i diplomcima koji su mi pružili pomoć da istrajem do kraja.

UNIVERZITET U NOVOM SADU
TEHNOLOŠKI FAKULTET

KLJUČNA DOKUMENTACIJSKA INFORMACIJA

Redni broj
RBR

Identifikacioni broj
IBR

Tip dokumentacije
TD *Monografska publikacija*

Tip zapisa:
TZ *Tekstualni štampani materijal*

Vrsta rada
VR *Doktorska disertacija*

Autor:
AU *Zlatica J. Predojević*

Mentor:
MN *Prof. dr Dragan Petrović*

Naslov rada:
NR *Fluidodinamika protivstrujnog kontaktora
gas-čvrsto-punjenje*

Jezik publikacije:
JP *Srpski (latinica)*

Jezik izvoda:
JJ *Srpski/engleski*

Zemlja publikovanja:
ZP *Jugoslavija*

Uže geografsko područje
UGP *Vojvodina*

Godina:
GO *1997.*

Izdavač:
IZ *Autorski reprint*

Mesto i adresa:
MA *21000 NOVI SAD
Bulevar Cara Lazara 1*

Fizički opis rada:
(Broj poglavlja/strana/literaturnih citata/slika/grafikona/tabela)
FO *5* *124* *34* *3* *54* *12*

Naučna oblast:
NO *Hemijsko-tehnološke nauke*

Naučna disciplina
ND *Reaktorsko inženjerstvo*

Predmet odrednica/Ključne reči
PO *Kontaktor gas-čvrsto-punjenje, pad pritiska,
sadržaj čvrste faze*

UDK
66.023.23:66.040.46

Čuva se
ČU

Biblioteka Tehnološkog fakulteta u
Novom Sadu

Važna napomena:

VN

Izvod/abstrakt

IA

Istraživanja u ovom radu imala su za cilj da daju doprinos razjašnjenju fluidodinamike sistema gas-čvrsto-punjenje i definisanju osnovnih karakteristika ovog sistema: pada pritiska i dinamičkog i statičkog sadržaja čvrste faze. Eksperimentalna merenja osnovnih fluidodinamičkih karakteristika sistema osvarena su u zavisnosti od: uticaja brzina pokretnih faza (gasne i čvrste faze), tipa punjenja, veličine čestica čvrste faze i visine sloja punjenja. Ispitivanja su ostvarena na najčešće korišćenim komercijalnim punjenjima: Raschigovim prstenovima, Pall prstenovima, Intaloks sedlima i cilindričnim mrežicama, kao i do sada ne korišćenim punjenjima (keramičke kuglice i lomljeni kamen). Na osnovu eksperimentalnih podataka izvedene su korelacione jednačine za predviđanje pada pritiska i dinamičkog i statičkog sadržaja čvrste faze i granice između režima pre nakupljanja i nakupljanja u zavisnosti od osnovnih parametara kontaktora: brzina gasne i čvrste faze, veličine čestica čvrste faze i karakteristika punjenja. Korišćenjem dosadašnjih literaturnih saznanja o uticaju operativnih parametara i osobina punjenja, gasa i čvrste faze na fluidodinamiku kontaktora gas-čvrsto-punjenje i sopstvenih eksperimentalnih rezultata proverena je validnost predloženih korelacija. Dobijeni zadovoljavajući rezultati predloženih korelacija pružaju mogućnost za predviđanje režima rada i fluidodinamičkih karakteristika ovog tipa kontaktora koji ima široku mogućnost primene u procesima toplotne razmene, adsorpcije, prečišćavanja otpadnih gasova i hemijskim reakcijama.

Datum prihvatanja teme od strane NN veća Fakulteta:

DP

26.06.1997.

Datum odbrane:

DO

Članovi komisije:

(Naučni stepen/ime i prezime/zvanje/fakultet)

KO

Predsednik:

*Prof. dr Slobodan Sokolović, redovan profesor
Tehnološki fakultet, Novi Sad.*

Član, mentor:

*Prof. dr Dragan Petrović, vanredni profesor
Tehnološki fakultet, Novi Sad*

Članovi:

*Prof. dr Biljana Škrbić, redovan profesor
Tehnološki fakultet, Novi Sad*

*Prof. dr Aleksandar Duduković,
redovan profesor*

Tehnološko-metalurški fakultet, Beograd

SADRŽAJ

UVOD

1. TEORIJSKI DEO	3
1.1. Kontaktori gas-pokretna čvrsta faza	3
1.2. Razvoj i primena kontaktora gas-čvrsto-punjenje	5
1.3. Fluidodinamika kontaktora gas-čvrsto-punjenje	9
1.3.1. Osnovne fluidodinamičke karakteristike i njihovo merenje	9
1.3.2. Režimi proticanja i vizuelna zapažanja	11
1.4. Pregled dosadašnjih istraživanja fluidodinamike kontaktora gas-čvrsto-punjenje	15
2. EKSPERIMENTALNI DEO	18
2.1. Opis aparature	18
2.2. Pokretne faze	20
2.3. Karakteristike punjenja	21
2.4. Postupci merenja fluidodinamičkih karakteristika	23
2.4.1. Merenje pada pritiska i dinamičkog sadržaja čvrste faze	23
2.4.2. Merenje statičkog sadržaja čvrste faze	24
3. DISKUSIJA REZULTATA	25
3.1. <i>PAD PRITISKA</i>	25
3.1.1. Pad pritiska kroz suvo punjenje	26
3.1.1.1. Uticaj tipa punjenja i poroznosti sloja	26
3.1.1.2. Uticaj visine sloja punjenja	29
3.1.1.3. Predviđanje pada pritiska	31
3.1.2. Pad pritiska pri protivstrujnom proticanju gasa i čvrste faze	36
3.1.2.1. Uticaj brzina pokretnih faza	37
3.1.2.2. Uticaj tipa punjenja	43
3.1.2.3. Uticaj veličine čestica čvrste faze	46
3.1.2.4. Uticaj visine sloja punjenja	51
3.1.2.5. Predviđanje pada pritiska	53
3.1.3. ZAKLJUČCI: Pad pritiska	65
3.2. <i>DINAMIČKI SADRŽAJ ČVRSTE FAZE</i>	67
3.2.1. Uticaj brzina pokretnih faza	67
3.2.2. Uticaj tipa punjenja	75
3.2.3. Uticaj veličine čestica čvrste faze	79
3.2.4. Uticaj visine sloja punjenja	84
3.2.5. Predviđanje dinamičkog sadržaja čvrste faze	85
3.2.3. ZAKLJUČCI: Dinamički sadržaj čvrste faze	98
3.3. <i>STATIČKI SADRŽAJ ČVRSTE FAZE</i>	100
3.3.1. Uticaj brzina pokretnih faza	102
3.3.2. Uticaj tipa punjenja	104

3.3.3. Uticaj veličine čestica čvrste faze	106
3.3.4. Uticaj visine sloja punjenja	109
3.3.5. Predviđanje statičkog sadržaja čvrste faze	115
3.3.3. ZAKLJUČCI: Statički sadržaj čvrste faze	118

OPŠTI ZAKLJUČCI I MOGUĆI PRAVCI DALJIH ISTRAŽIVANJA FLUIDODINAMIKE KONTAKTORA GAS-ČVRSTO-PUNJENJE	119
--	-----

SPISAK OZNAKA	121
LITERATURA	122

UVOD

Kontaktne procese kao što su prenos toplote, adsorpcija, sušenje, prečišćavanje otpadnih gasova i hemijske reakcije, s obzirom na obim industrijske primene, kao i značaj i mesto u hemijskoj i petrohemijskoj industriji, nametnuli su permanentno iznalazanje novih tipova kontaktora uz povećan broj kontaktnih faza. Iz dvofaznih sistema (gas-tečno, gas-čvrsto, tečno-tečno, tečno-čvrsto) proizišli su trofazni sistemi (gas-tečno-tečno i gas-tečno-čvrsto) a poslednjih dvadesetak godina sve veći naučno-istraživački značaj dobija sistem gas-čvrsto-čvrsto. Kod kontaktora ovog tipa sitne čestice čvrste faze u obliku mlaza, protivstrujno gasu, protiču nadole kroz nepokretan sloj druge čvrste faze, koja je ili inertna (punjenje), kako bi omogućila što bolji kontakt, ili aktivna (npr. katalizator). Ovakva uloga nepokretne čvrste faze kao i veoma povoljni operativni uslovi (mali pad pritiska, malo aksijalno mešanje pokretnih faza, jednostavna konstrukcija uređaja), usmeravala je istraživanja ovih sistema i ukazivala na mogućnost njihove primene kao toplotnih razmenjivača, adsorbera ili hemijskih reaktora.

Iako još nedovoljno ispitani, ovi kontaktori u skoroj budućnosti mogu imati veliku ulogu u procesima prečišćavanja otpadnih gasova kao i u procesima sa povratnim hemijskim reakcijama, npr. kod sinteze metanola i amonijaka, jer omogućuju da se adsorpcijom in situ pomera ravnoteža reakcije u pravcu većeg prinosa željenog proizvoda.

S obzirom na mnogostrukost primene ovog tipa trofaznog kontaktora i sve veći značaj koji sistem gas-čvrsto-punjenje dobija u procesnoj industriji, cilj ovog rada bio je da da doprinos razjašnjenju fluidodinamike kontaktora gas-čvrsto-punjenje.

U odnosu na dosadašnja ispitivanja, u ovom radu ispitivanja su bila usmerena na sledeće:



- ◆ *korišćenje novih tipova punjenja (keramičkih kuglica, Intaloks sedala i lomljenog kamena), kao i u literaturi već korišćenih komercijalnih punjenja (Raschigovi prstenovi, Pall prstenovi i cilindrične mrežice),*
- ◆ *eksperimentalno merenje pada pritiska i dinamičkog i statičkog sadržaja čvrste faze,*
- ◆ *ispitivanje uticaja veličine čestica čvrste faze na fluidodinamiku sistema,*
- ◆ *ispitivanje uticaja visine kolone na fluidodinamiku i*
- ◆ *korelisanje ispitivanih fluidodinamičkih karakteristika.*



1. TEORIJSKI DEO

1.1. Kontaktori gas-pokretna čvrsta faza

Zahtevi tržišta za što kvalitetnijim proizvodima i jeftinijim tehnološkim postupcima sa racionalnom energetsom potrošnjom, nametnuli su hemijskom inženjerstvu istraživanja sve novijih i novijih kontaktnih procesa. Najčešće korišćeni uređaji u procesnoj industiji za prenos mase i toplote su kontaktori kolonskog tipa, kod kojih se kontakt između faza ostvaruje:

- ◆ stupnjevito (kolone sa podovima) ili
- ◆ neprekidno (kolone sa punjenjem).

Prednosti koje pružaju kolone sa punjenjem (Tekić, 1984), kao što su velika površina kontakta, neprekidan kontakt faza duž čitave visine uređaja i dobra preraspodela faza, dovela je do intenzivnog razvoja ovih uređaja i kao kontaktora i kao reaktora kod kojih gasna i tečna faza protivstrujno protiču kroz nasut sloj čestica katalizatora kao reakcionu zonu. Ovakav tip reaktora našao je svoju primenu u procesima naftne industrije i to u procesima hidrodosulfurizacije, hidrokrekinga, hidroobrade uljnih destilata i dr. (Satterfield, 1975).

S obzirom da se veliki broj različitih postupaka, kao što su prenos toplote, adsorpcija, sušenje, prečišćavanje otpadnih gasova i hemijske reakcije, odigravaju pri kontaktu gasne ili tečne i čvrste faze, u cilju ostvarivanja što boljeg kontakta faza i povećanja efikasnosti, razvijeni su različiti tipovi kontaktora sa čvrstom fazom, kao što su: sprej kolone, kolone sa pokretnim slojem, kolone sa višestepenim fluidizovanim slojem, cik-cak kontaktori i kolone sa punjenjem (*Slika 1.1*). Svaki od navedenih kontaktora ima određene prednosti i nedostatke.

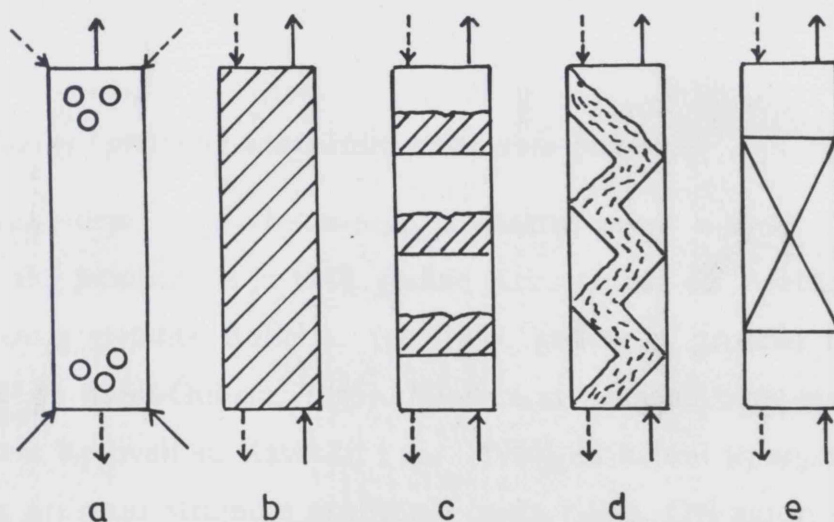
Sprej kolone su jednostavne konstrukcije ali imaju izraženo aksijalno mešanje gasne i čvrste faze i neravnomeran pad pritiska. Ovaj nedostatak može se poboljšati korišćenjem pokretnih faza veće gustine, pokretnih slojeva ili pregrada.

Kolone sa pokretnim slojevima omogućuju veliku brzinu prenosa mase između faza, međjutim pad pritiska je velik, pogotovo kod pokretne faze male granulacije i pri

velikim brzinama gasa. Pored toga, nedostatak ovih uređaja je i nestacionarnost protoka čvrste faze i prisutnost radijalnog profila brzina.

Višestepeni fluidizovani slojevi imaju svoju primenu u procesima protivstrujne adsorpcije, kao razmenjivači toplote i hemijski reaktori. Aksijalno mešanje gasne i čvrste faze je malo, kontrola temperature jednostavna, ali je velik pad pritiska. U ovim uređajima teško se postiže ravnomerna distribucija gasne faze po podovima što umanjuje fleksibilnost u radu.

Cik-cak kontaktorima ostvaruje se veliki protok čvrste faze i kod protoka čestica malih dimenzija. Ovaj tip kontaktora ima primenu u petrohemijskoj industriji za stripovanje velikih količina čvrste faze u postrojenjima za katalitički kreking.



Slika 1.1. Tipovi kontaktora gas-čvrsto: (a)-sprej kolona, (b)-pokretni slojevi, (c)-višestepeni fluidizovani slojevi, (d)-cik-cak kontaktor, (e)-kolona sa punjenjem.

Uvodjenjem punjenja u kolonu razvijen je relativno nov tip kontaktora u kojem sitne čestice čvrste faze u obliku mlaza, protivstrujno gasu, protiču nadole kroz nepokretan nasut sloj u koloni. Iako je osnovna ideja o protivstrujnom proticanju gasne i čvrste faze kroz sloj punjenja u koloni opisana u patentu još 1948. godine (Directie van de Staatsmijnen, 1948), mišljenja istraživača u pogledu sličnosti, odnosno razlika ovog sistema sa hidrodinamikom sistema gas-tečno-punjenje, su podeljena.

Dok jedna grupa autora (Claus i sar., 1976; Roes i van Swaaij, 1979a) smatraju da se ova dva sistema mogu upoređivati s obzirom na sličnosti režima strujanja i fluidodinamičkih karakteristika (pada pritiska i sadržaja čvrste faze), drugi autori (Westertep i Kuczynski, 1987a) smatraju da su ovi sistemi potpuno različiti zbog odsustva površinskog napona i adhezivnih sila.

I pored nedovoljne ispitivosti, s obzirom da tek poslednjih dvadesetak godina ovaj trofazni sistem dobija sve veći naučno-istraživački značaj, postoje mišljenja da će primena ovog tipa kontaktora dovesti do veće efikasnosti u procesima razmene toplote i mase, gasifikacije uglja, separacije komponenata, prečišćavanju otpadnih gasova i sl. Takodje se očekuje da ovi uređaji u procesima sa povratnim hemijskim reakcijama, kao što su sinteza metanola i amonijaka, omogućće vodjenje procesa pri blažim reakcionim uslovima (nižem pritisku i temperaturi) i ostvarivanje većih prinosa produkata.

1.2. Razvoj i primena kontaktora gas-čvrsto-punjenje

Osnovna ideja o protivstrujnom kontaktu gasne i čvrste faze kroz nasut nepokretan sloj patentirana je 1948. godine (Directie van de Staatsmijnen, 1948), do realizacije ovog patenta došlo je tek 1965. godine u procesu razmene toplote (Compagnie de Saint-Gobain, 1965). Mogućnost primene ovog sistema za proces razmene mase ispitivali su Kaveckij i sar. (1966) na koloni ispunjenoj Raschigovim prstenovima pri protivstrujnom proticanju peska i gasa. Ovi autori su utvrdili da se najefikasnija razmena mase ostvaruje pri režimu proticanja pri kojem se postiže maksimalna koncentracija čvrste faze u punjenju. Medjutim, usledilo je novo zatišje u istraživanju ovog sistema sve do 1976. godine kada počinju intenzivna fundamentalna istraživanja ovog sistema, kao i iznalaženja njegove praktične primene u brojnim tehnološkim procesima.

Istraživanja fluidodinamike sistema gas-čvrsto-punjenje, s obzirom na veoma povoljne karakteristike ovih uređaja: mali pad pritiska, velike brzine prenosa mase i toplote, malo aksijalno mešanje pokretnih faza, kao i relativno jednostavna konstrukcija, ukazala su na mogućnost njihove primene u velikom broju industrijskih procesa. Pravci istraživanja ovog sistema bili su usmereni na primenu ovih kontaktora kao:

- ◆ toplotnih i masenih razmenjivača,
- ◆ adsorbera i
- ◆ hemijskih reaktora.

Primenljivost kolone sa punjenjem kao *toplotnog razmenjivača* ispitivali su brojni autori. Large i sar. (1981, 1983) su utvrdili da punjenje u koloni značajno povećava vreme kontakta pri protivstrujnom proticanju gasa i čestica čvrste faze, bez velikog povećanja pada pritiska. Takodje su utvrdili da efikasnost toplotnog razmenjivača zavisi od brojnih geometrijskih parametara koji utiču na hidrodinamiku proticanja. Za dati tip punjenja i čvrstu fazu, na efikasnost razmene utiču način pakovanja i polazna distribucija gasne a naročito čvrste faze. Koristeći dva načina distribucije čvrste faze fiksni i rotirajući, ovi autori su uočili da fiksni distributor homogeno raspoređuje čvrstu fazu po vrhu punjenja tako da je efektivan samo gornji sloj punjenja za kontakt gasne i čvrste faze jer u unutrašnjosti punjenja čestice se gomilaju i najveći deo gasne faze je u zaobilaznom toku. Kod rotirajućeg distributora stvarale su se gušće zone čvrste faze koje su se spiralno kretale unutar punjenja razmenjivača čime je povećavana površina međusobnog kontakta sa gasom. Na osnovu ovih zapažanja ovi autori su zaključili da je toplotna razmena mnogo bolja sa rotirajućim distributorom u odnosu na fiksni.

Saadjian i Large (1985) su kolonu napunjenu Pall prstenovima takodje ispitivali kao toplotni razmenjivač. Na osnovu dobijenih rezultata ukazali su da prisustvo punjenja bitno povećava razmenu toplote između protivstrujnih faza (gasne i čvrste).

Verver i van Swaaij (1986b), ispitujući toplotnu razmenu između gasa i peska kroz kontaktor sa pravilno sleganim punjenjem u obliku cevi kvadratnog i trougaonog preseka, kao i prethodni autori, utvrdili su da toplotna razmena zavisi od masenog fluksa obeju faza i tipa punjenja u kontaktoru. Ovi autori su predložili model koji opisuje karakteristike prenosa toplote na osnovu proticanja jedne čestice pri malom fluksu čvrste faze i efekta aglomeracije pri većem fluksu čvrste faze.

Karakteristike kolone sa punjenjem kao toplotnog razmenjivača ispitivalu su takodje i Saadjian i Sardin (1990). Oni su predložili model za predviđanje efikasnosti toplotne razmene samo na osnovu pada pritiska i sadržaja pokretne čvrste faze. Na

osnovu tog modela dobili su zadovoljavajuće krive efikasnosti u zavisnosti od brzine gasa pri razmeni toplote a za različite visine punjenja i različite flukseve čvrste faze.

Razmenu mase izmedju gasa i čestica čvrste faze malih dimenzija (srednji prečnik 70 μm) kod kolone gas-čvrsto-nasuto punjenje (Pall prstenovi), ispitivali su Roes (1978) i Roes i van Swaaij (1979c) i utvrdili da visina jedinice prenosa mase zavisi od brzine gasa dok fluks čvrstog neznatno utiče. Pri maloj brzini gasa visina jedinice prenosa mase bila je mala i povećavala se sa povećanjem brzine gasa. Medjutim pri velikim brzinama gasa prenos mase bio je ograničen.

Kiel i sar. (1993) su takodje ispitivali razmenu mase izmedju gasa i čestica reda veličine milimetra kroz kolonu sa punjenjem u obliku unakrsno slaganih kružnih cevi. Različitim prečnicima i različitim načinom slaganja, ovi autori su dobili različite tipove punjenja. Eksperimentalni rezultati ukazali su na očekivano velike brzine prenosa mase. Ovi autori su pokazali da postoji razlika izmedju eksperimentalnih i izračunatih vrednosti koeficijenta prenosa mase zbog toga što se ne zna koji deo te razlike potiče zbog otpora pri difuziji, a koji zbog gomilanja čestica. Poredjenjem eksperimentalnih rezultata prenosa mase i eksperimentalnih rezultata hidrodinamike sistema, ovi autori su ukazali da je uticaj gomilanja čestica mali kod čestica milimetarskih dimenzija.

Kontaktor gas-čvrsto-punjenje kao *hemijski reaktor*, ispitivali su Verver i van Swaaij (1985, 1987) u procesu katalitičke desulfurizacije H_2S u elementarni sumpor oksidacijom sa O_2 ili SO_2 . Obrazovan reakcioni produkt, sumpor, kontinualno je adsorbovan česticama katalizatora (NaX zeolitni katalizator), koje su proticale protivstrujno gasu (H_2S i O_2 u stehiometrijskom odnosu). Kao punjenje koristili su pravilno slagane cevi da bi se izbeglo smanjenje dinamičkog sadržaja čvrste faze, odnosno katalizatora kao adsorbenta sumpora. Upoređujući proces oksidacije H_2S , kod cevnog reaktora sa klipnim proticanjem i modelnog reaktora gas-čvrsto-punjenje, na osnovu vrednosti ukupne konstante brzine, ovi autori su uočili da kod cevnog reaktora, pri temperaturama do 200°C , izraziti uticaj na konstantu brzine reakcije imao je otpor pri prenosu mase. Pri višim temperaturama limitirajući uticaj prenosa mase postao je izrazitiji zbog smanjenja energije aktivacije.

Kod trofaznog modelnog reaktora, ovi autori su pretpostavili da je na nižim temperaturama do 200°C zanemarljiv limitirajući uticaj prenosa mase. Pri višim temperaturama, brzina prenosa mase gasne faze i brzina difuzije unutar mlaza (čestice-

gasna faza), i u manjem stepenu brzina difuzije između čestica, pružale su značajan otpor ukupnoj brzini reakcije.

Kontaktor gas-čvrsto-punjenje kao reaktor za ravnotežne hemijske reakcije, ispitivali su Westerterp i Kuczynski (1987b) u procesu sinteze metanola na amorfnom alumo-silikatnom katalizatoru. Smešu gasnih reaktanata (CO i H_2) uvodili su na dnu kolone, a čvrstu fazu, selektivni adsorbent (alumo-silikatni katalizator), na vrh kolone. Kao punjenje koristili su mešavinu Raschigovih prstenova i tableta katalizatora. Produkt reakcije formiran na površini katalizatora bio je adsorbovan strujom čestica adsorbenta koja je proticala naniže. Neprореаговали реактанти напуштали су реактор, на врху, заједно са неадсорбованим продуктом. U procesu sinteze metanola kao egzotermnom procesu, obrazuju se reakciona i adsorpciona toplota koje su iz reaktora odvojene gasnom i čvrstom fazom pri njihovom protivstrujnom proticanju kroz kolonu.

Polazeći od Ververovih saznanja o prednostima slaganog punjenja (Verver, 1984), Kiel i van Swaaij (1989), Kiel (1990) i Kiel i sar. (1992) su ispitivali mogućnost primene kontaktora gas-čvrsto-slagano punjenje, kao adsorbera pri regenerativnom procesu simultanog uklanjanja SO_x i NO_x iz otpadnih gasova. Kao adsorbent koristili su CuO na poroznom silikatnom nosaču (SiO_2) u obliku sfernih čestica (srednji prečnik 1,5 mm). U koloni, adsorberu na temperaturi od 300-450°C, sumpordioksid i sumportrioksid reagovali su sa bakaroksidom (CuO) obrazujući bakarsulfat (CuSO_4). Istovremeno su CuO i CuSO_4 delovali kao katalizatori u procesu selektivne katalitičke redukcije azotovih oksida NO_x sa amonijakom (NH_3). Regeneracija adsorbenta CuO i CuSO_4 do elementarnog Cu , odvijala se na istoj temperaturi kao i adsorpcija, a kao redukujući gasovi korišćeni su vodonik, ugljenmonoksid ili metan. Prednosti ovakvog postupka uklanjanja štetnih komponenata u otpadnim gasovima u odnosu na klasične su sledeće:

- ◆ mala potrošnja adsorbenta,
- ◆ istovremeno uklanjanje i sumpornih i azotnih oksida,
- ◆ stvaranje relativno malih količina sporednih produkata ,
- ◆ mala potrošnja vode i
- ◆ ušteda energije jer nije potrebno ponovno zagrevanje dimnih gasova.

Mogućnosti primene ovog kontaktora kod ravnotežnih reakcija kao što su sinteza metanola (Westertep i Kuczynski, 1987a), kao i mogućnost separacije *in situ* pri proizvodnji amonijaka, nametnulo je postavljanje novog koncepta za sintezu amonijaka (Duduković i Petrović, 1989) po kojem bi selektivni adsorbens (fino sprašena čvrsta faza) adsorbirao formiran amonijak iz smeše vodonika i azota pri protivstrujnom proticanju kroz nasut sloj katalizatora u koloni. Time bi se ravnotežna reakcija pomerala udesno, što bi omogućilo energetski racionalnije odigravanje procesa u odnosu na postojeći Habber-Boschov koji se nije menjao još od 1912. godine, a danas troši oko 28 GJ energije po toni proizvoda.

Sličan koncept separacije *in situ* mogao bi se primeniti i na druge ravnotežne procese, kao i na konsektivne ili složene reakcije gde je intermedijar željeni proizvod.

1.3. Fluidodinamika kontaktora gas-čvrsto-punjenje

U sistemu gas-čvrsto-punjenje čestice čvrste faze kreću se nadole protivstrujno gasu kroz sloj punjenja u koloni. I pored fluidodinamičke sličnosti sa sistemom gas-tečno-punjenje, kao što su isti režimi proticanja, tj. postojanje zona pre nakupljanja, nakupljanja i plavljenja, kao i iste fluidodinamičke karakteristike (pad pritiska i dinamički i statički sadržaj tečnosti, odnosno pokretne čvrste faze), postoje i bitne razlike između ova dva sistema. Sile površinskog napona, kao i adhezivne sile, koje uslovljavaju obrazovanje statičkog sadržaja tečne faze u sistemu gas-tečnost nemaju alternativne sile kod sistema gas-čvrsto. Sistem gas-tečno-punjenje, veoma istražen u literaturi, ne pruža dovoljno podataka koji bi se mogli koristiti za postavljanje alternativnih korelacionih jednačina za predviđanje fluidodinamičkih karakteristika sistema gas-čvrsto-punjenje.

1.3.1. Osnovne fluidodinamičke karakteristike i njihovo merenje

Fluidodinamičke karakteristike koje se eksperimentalno mere i na osnovu kojih se uočavaju režimi proticanja pokretnih faza kroz punjenje u koloni su:

- ◆ pad pritiska gasa kroz kolonu, ΔP ,
- ◆ dinamički sadržaj čvrste faze, β_d i

- ◆ statički sadržaj čvrste faze, β_s .

Pad pritiska gasa je mera gubitka kinetičke energije gasa zbog sile trenja koja se javlja između gasa i čestica koje protivstrujno protiču kroz kolonu bilo u obliku mlaza ili suspendovane u gasu. Pri proticanju kroz kolonu suspendovane čestice više doprinose padu pritiska u odnosu na čestice zadržane u šupljinama punjenja u koloni (Verver, 1984). Na pad pritiska utiču fluks čvrste faze, brzina gasne faze, karakteristike čvrstog i karakteristike punjenja. Ukupni pad pritiska u koloni obično se meri diferencijalnim manometrom.

Dinamički sadržaj čvrste faze predstavlja količinu čestica koja nakon istovremenog zatvaranja dovoda i odvoda čvrstog prodje kroz sloj punjenja (zaustavna metoda). Izražava se kao zapreminski udeo izmerene mase čvrste faze u odnosu na ukupnu zapreminu kolone. Na dinamički sadržaj čvrste faze utiču protoci gasne i čvrste faze, veličina i gustina čestica, karakteristike punjenja i mogućnost refluksa čestica odnetih strujom gasa izvan punjenja kolone.

Statički sadržaj čvrste faze predstavlja zaostalu količinu čestica u sloju punjenja kolone nakon izdvajanja dinamičkog sadržaja. Eksperimentalno se određuje pražnjenjem kolone, odvajanjem čestica od punjenja prosejavanjem i merenjem mase čestica. Izmerena masa predstavlja statički zapreminski udeo. Do danas nisu razvijene metode koje bi omogućile tačno razgraničenje između ove dve veličine, tako da dolazi do odstupanja dobijenih vrednosti od stvarnih. Na vrednosti statičkog sadržaja čvrste faze, kao i kod dinamičkog sadržaja, utiču brzine gasne i čvrste faze i karakteristike punjenja i čvrste faze. S obzirom da statički sadržaj čvrste faze slabo doprinosi efikasnosti procesa prenosa mase i toplote, pri izboru punjenja u kontaktoru gas-čvrsto-punjenje, mora se voditi računa da pad pritiska i statički sadržaj budu dovoljno mali uz odgovarajuće vrednosti dinamičkog sadržaja.

Dinamički i statički sadržaj čvrstog čine ukupni sadržaj čvrstog. Pojmove ukupnog, dinamičkog i statičkog sadržaja pokretne faze, ali za sistem gas-tečno-punjenje, uveli su Shulman i sar. (1955).

1.3.2. Režimi proticanja i vizuelna zapažanja

U sistemu gas-čvrsto-punjenje čestice čvrste faze kreću se u obliku mlaza protivstrujno gasu i u zavisnosti od brzina kretanja pokretnih faza, slično sistemu gas-tečno, uočavaju se tri režima strujanja *zona pre nakupljanja, zona nakupljanja i zona plavljenja*.

Zonom *pre nakupljanja* (eng. *preloading*) se označava oblast u kojoj je interakcija između pokretnih faza neznatna, a krive pada pritiska u zavisnosti od brzine gasa pri različitim brzinama čvrste faze su paralelne (logaritamska zavisnost) (Tekić, 1984). U ovom režimu brzina gasa ne utiče na dinamički sadržaj čvrste faze, kao i na linearnu brzinu čestica (Roes i van Swaaij, 1979a)

Oblast većih brzina gasa, u kojoj se zbog usporavanja protivstrujnog kretanja čvrste faze povećava njen sadržaj u sloju punjenja i smanjuje poprečni presek za prolaz gasa, predstavlja *zonu nakupljanja* (eng. *loading*). Pad pritiska raste usled smanjene površine za prolaz gasa, odnosno povećava se nagib krivih pada pritiska u zavisnosti od brzine gasa. Takođe, raste dinamički sadržaj čvrste faze sa porastom brzine gasa pri konstantnoj brzini čvrste faze. Prelomna tačka nagiba krivih pada pritiska, odnosno dinamičkog sadržaja čvrste faze od brzine gasa označava se kao *tačka nakupljanja* (eng. *loading point*).

Oblast iznad zone nakupljanja je *zona plavljenja* (eng. *flooding*). Sherwood i Pigford (1952) navode tri definicije za zonu plavljenja:

- ◆ oblast nakupljanja sloja pokretne faze pri vrhu punjenja,
- ◆ druga prelomna tačka na krivoj zavisnosti pada pritiska od brzine gasa (logaritamska zavisnost) i
- ◆ tačka naglog povećanja sadržaja faza.

U ovoj zoni čestice manjih dimenzija zahvaćene izlaznom strujom gasa bivaju odnošene van kolone, a samo čestice većih dimenzija vraćaju se u kolonu. I pad pritiska i dinamički sadržaj čvrste faze naglo rastu što dovodi do gomilanja čestica po ukupnoj visini punjenja u koloni, odnosno dolazi do plavljenja kolone.

Ove režime strujanja, slične sistemu gas-tečno-punjenje, uočili su mnogi autori ispitujući fluidodinamiku sistema gas-čvrsto-punjenje.

Claus i sar. (1976) su ispitujući fluidodinamiku kolone, ispunjene slojem cilindričnih mrežica kroz koji su protivstrujno proticali vazduh i čestice čvrste faze, različitog granulometrijskog sastava (pesak, polistiren, katalizator za katalitički krekning), uočili slične režime strujanja kao i kod sistema gas-tečno-punjenje. Za date uslove proticanja gasne i čvrste faze, uočili su dva operativna režima strujanja. Proticanje sa malom koncentracijom čvrste faze nazvali su "razredjena faza" ili "zona pre nakupljanja" a proticanje sa velikom koncentracijom čestica čvrste faze označili su kao "zgusnuta faza" ili "zona nakupljanja". Ovi autori su ukazali da pri daljem povećavanju brzina gasne i čvrste faze dolazi do "plavljenja".

Roes i van Swaaij (1979a) su ispitujući različita punjenja (Pall prstenovi, Raschigovi prstenovi, cilindri), pri protivstujnom proticanju vazduha i mikrosferičnog katalizatora za katalitički krekning, uočili slične režime strujanja kao i Claus i sar. (1976), tj. zonu "pre nakupljanja" i zonu "nakupljanja". Prema ovim autorima u zoni pre nakupljanja pri malim brzinama gasa brzina čestica čvrste faze je konstantna i ne zavisi od brzine gasa, a definisana je izrazom:

$$u_p = \frac{S}{\beta_d \rho} = \text{const} \quad (1.1)$$

U zoni nakupljanja navedeni autori su uočili dva toka čvrste faze, u obliku mlaza i u obliku suspendovane faze, kao i porast pada pritiska usled porasta brzine čvrste faze i udela suspendovanih čestica. Prema Roesu i van Swaaiju (1979a), brzina klizanja čestica čvrste faze u zoni nakupljanja je konstantna:

$$u_{\text{slip}} = \frac{S}{\beta_d \rho} + \frac{G}{(\varepsilon - \beta_d - \beta_s) \rho_g} = \text{const} \quad (1.2)$$

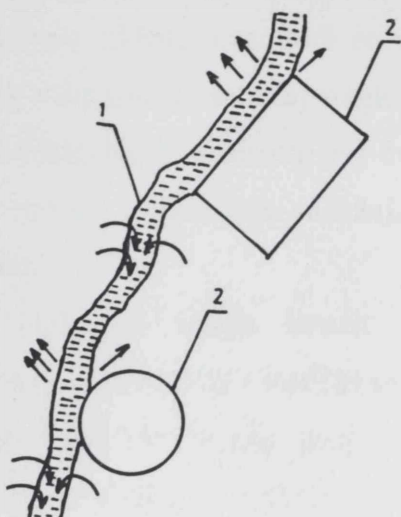
Na osnovu konstantnih vrednosti ovih brzina izveli su izraze za predviđanje dinamičkog sadržaja, tačke nakupljanja i tačke plavljenja.

Large i sar. (1981) nisu uočili zone nakupljanja i plavljenja u sistemu vazduh-pesak-Palovi prstenovi, za razliku od Roesa i van Swaaij-a (1979a). Na osnovu vizuelnih zapažanja ovi autori su ukazali na kretanje čestica u obliku mlazeva kroz

kolonu i gomilanje čestica čvrste faze u šupljinama i između elemenata punjenja. Pri malim brzinama gasa (zona pre nakupljanja) Large i sar. (1981) su uočili uniformno kretanje čestica u obliku mlaza (čestice čvrste faze razredjene gasom). Pri većim brzinama gasa uočili su separaciju obeju faza u vertikalnom i radijalnom pravcu, kao i pojavu mrtvih zona. Na osnovu ovih zapažanja ovi autori su zaključili da dimenzije kolone i distribucija gasa i čvrste faze imaju mnogo veći uticaj na međusoban kontakt gasa i čvrste faze nego kod sistema gas-tečno-punjenje.

Za razliku od istraživanja prethodnih autora, koji su koristili kolonu sa slobodno nasutim punjenjem, Verver (1984) je koristio kolonu sa specijalno dizajniranim punjenjem u obliku unakrsno slaganih metalnih cevi kvadratnog preseka, i uočio da ovakav tip punjenja ima prednost u odnosu na slobodno nasut sloj punjenja jer ne dovodi do gomilanja čestica čvrste faze između elemenata punjenja (odsustvo statičkog sadržaja čvrste faze). Takođe, uočio je da nema radijalne distribucije čestica, zahvaljujući povoljnom hidrodinamičkom obliku punjenja, a otpor proticanju gasa, čak i pri velikim brzinama, bio je mali.

Westertep i Kuczynski (1987a) uočili su da je u zoni pre nakupljanja proticanje čestica čvrste faze isključivo u obliku mlazeva pri čemu je broj mlazeva po jedinici površine kolone nezavisan od brzina gasne i čvrste faze, a zavisi isključivo od geometrije punjenja. Posmatrajući interakciju između pokretnih faza (gasne i čvrste) i nepokretnog punjenja ovi autori su pretpostavili sledeće: čestice čvrste faze koje se kreću nadole zahvataju deo gasa koji se kreće protivstrujno i obrazuju mlaz u kojem gas nastavlja kretanje nadole. Pri sudaru sa elementom punjenja deo čestica iz mlaza vraća se nagore oslobadajući gas, koji nastavlja kretanje nagore (unutrašnja recirkulacija gasa), a deo čestica klizi preko površine punjenja nadole pod uticajem gravitacije zahvatajući novu količinu gasa i obrazujući mlaz. Pri sudaru sa novim elementom punjenja opisani efekti se ponavljaju (*Slika 1.2*). Ovi autori su ukazali da usled opisanih zbivanja dolazi do povećanja pada pritiska zbog: *a*) smanjene površine poprečnog preseka sloja punjenja za prolaz gasa usled protivstrujnog proticanja mlaza čestica i njihovog statičkog sadržaja i *b*) unutrašnje recirkulacije gasa kao posledice interakcije gas-čvrsta faza-punjenje.



Slika 1.2. Mehanizam interne recirkulacije gasa: (1)-mlaz čestica čvrste faze i gasa, (2)-elementi punjenja.

Povećavanjem brzine gasne ili čvrste faze ovi autori su pored proticanja čestica u obliku mlazeva uočili i slobodno suspendovane čvrste čestice oko mlazeva, i ovaj režim proticanja označili kao zonu nakupljanja. Zbog većih brzina obeju faza dinamička interakcija mlazeva čestica i okolnog gasa bila je intenzivnija. Čestice bliže spoljnoj granici mlazeva lako bivaju zahvaćene strujom gasa i nastavljale su dalje kretanje slobodno suspendovane u gasu. Međutim, čestice mogu biti ponovo zahvaćene mlazom tako da se postiže ravnoteža između količine čestica koje su suspendovane u gasu i količine čestica ponovo zahvaćenih mlazevima, pa veličina mlazeva ostaje nepromenjena. Dakle, prema zapažanjima ovih autora, u zoni nakupljanja uočavaju se dva toka čvrste faze: u obliku mlazeva i u obliku suspendovane faze. Dalje povećavanje brzine gasa, iznad granice zona pre nakupljanja i nakupljanja, prema ovim autorima, dovodi do povećanja dinamičkog sadržaja čvrste faze. Porast pada pritiska u ovom režimu je posledica slobodno suspendovanih čestica čvrste faze.

U zoni plavljenja koja se javlja iza zone nakupljanja, Westerterp i Kuczynski (1987a) ukazuju na pojavu dva fenomena. Ukoliko nema recirkulacije čestica čvrste faze iz struje gasa koja napušta kolonu, sitne čestice čvrste faze bivaju odnešene izvan kolone, dok se čestice većih dimenzija vraćaju u kolonu. To dovodi do porasta dinamičkog sadržaja čvrste faze do neke maksimalne vrednosti. Daljim povećavanjem

brzine gasa dolazi do opadanja dinamičkog sadržaja usled odnošenja čestica izvan kolone. Međutim, ako se pomoću ciklona omogući recirkulacija čestica čvrste faze koje odnosi gas, i pad pritiska i dinamički sadržaj naglo rastu i kolona veoma brzo postaje preplavljena. U ovom režimu trofazni sistem gas-čvrsto-punjenje je nestabilan i ne postoji mogućnost kvantitativnog definisanja sadržaja čvrste faze odnosno pada pritiska od brzina proticanja faza.

S obzirom da režimi strujanja imaju izrazit uticaj na fluidodinamičke karakteristike sistema (pad pritiska, dinamički i statički sadržaj čvrste faze), pri izboru punjenja, odnosno definisanju intervala brzine gasne i fluksa čvrste faze, treba obezbediti uslove stabilnog režima rada, tj. režime pre nakupljanja i nakupljanja. Istraživanja obuhvaćena ovim radom bila su u granicama ovih režima.

1.4. Pregled dosadašnjih istraživanja fluidodinamike kontaktora gas-čvrsto-punjenje

Na osnovu dosadašnjih istraživanja fluidodinamike i primenljivosti kontaktora gas-čvrsto-punjenje na različite višefazne procese, istraživači koji su se bavili ovom problematikom mogu se grupisati na:

- ◆ autore koji su koristili kolonu sa slobodno nasutim komercijalnim punjenjem kao što su na primer Raschigovi prstenovi, Pall prstenovi, Kerapak i dr.
- ◆ autore koji su koristili specijalno dizajnirano punjenje u obliku unakrsno slaganih cevi različitih prečnika i profila (kvadratnog, kružnog, trougaonog).

Prvu grupu autora čine Roes i van Swaaij (1979a,b,c), Large i sar. (1981, 1983) i Saatdjian i sar. (1985, 1990).

Druga grupa autora, koju čine Verver i van Swaaij (1985; 1986a,b; 1987), Kiel i van Swaaij (1989) i Kiel i sar. (1992, 1993), koristila je specijalno oblikovana i slagana punjenja.

Navedeni autori obe grupe su punjenje koristili kao inertnu komponentu sa ulogom povećanja kontaktne površine i postizanja bolje disperzije faza. Međutim, Kuczynski (1986) i Westerterp i Kuczynski (1987b) su pri istraživanju procesa sinteze metanola koristili mešavinu Raschigovih prstenova i tableta katalizatora kao aktivnu komponentu, jer se na površini katalizatora odigravala reakcija sinteze metanola.

Pregled dosadašnjih istraživanja ovog sistema sa eksperimentalnim uslovima dati su u Tabeli 1.1.

Tabela 1.1. Eksperimentalni uslovi dosadašnjih fluidodinamičkih ispitivanja sistema gas-čvrsto-punjenje.

	Prečnik kolone (mm)	Tip punjenja i dimenzije (mm)	Poroznost sloja punjenja	Čvrsta faza, tip i veličina (μm)	Fluks čvrste faze ($\text{kg/m}^2\text{s}$)	Prividna brzina gasa (m/s)
Claus i sar. (1976)	92	cilindrične mrežice, 20x20	0,97	pesak, 235	9 - 42	0,02 - 1,7
Roes i van Svaaij (1979a)	76	Raschigovi prst., 10x10x1 Pall prstenovi, 15x15x2 cilindrične mreže, 10x10x0,5	0,80 0,86 0,97	FCC, 70	1,1 - 6 1,3 - 6 1,3 - 6	0,02-0,19 0,02-0,23 0,02-0,17
Large i sar. (1981)	320	Pall prstenovi, 15x15	0,94	pesak, 190	0,66 - 1,68	0,22 - 1,72
Saadjian i Large (1985)	125	Pall prstenovi, 15x15	0,93	pesak, 205	0 - 3	0 - 4
Verver i van Svaaij (1986a)	10x10	pravilno slagano punjenje, 15x15	0,75	FCC, 70 pesak, 255 pesak, 425 č. sačma, 310 č. sačma, 880	0,03-0,8 0,1 - 2,4 0,2 - 2,2 0,3 - 4,8 0,3 - 4,0	0 - 0,2 0 - 0,9 0 - 1,4 0 - 2,8 0 - 5,4
Westerterp i Kuczynski (1987b)	25	Raschigovi prst., 8x8x3 Raschigovi prst., 7x7x3 i tablete katalizatora Kerapak	0,45 0,58 0,75	FCC, 80	0,5 - 2,0 0,5 - 2,0 0,5 - 2,0	0,03- 0,16 0,03- 0,16 0,03- 0,26
Kiel (1990)	10x10	pravilno punjenje tip 3, 5 tip 3, 5 tip 1,2,3,4,5 tip 3, 5	0,607 0,607 0,75; 0,607 0,607	staklene kuglice, 200 360 490 740	0,5 - 3 1 - 2 0,3 - 10 1 - 2	0,75 - 2,0 0,75 - 2,0 1,4 - 2,8 0 - 2,2

Detaljnija analiza dosadašnjih literaturnih saznanja o uticaju operativnih parametara i osobina punjenja, gasa i čvrste faze na fluidodinamiku kontaktora gas-čvrsto-punjenje data je u daljem tekstu pre prikaza, kao i u okviru diskusije sopstvenih rezultata o padu pritiska i dinamičkom i statičkom sadržaju čvrste faze.

2. EKSPERIMENTALNI DEO

2.1. Opis aparature

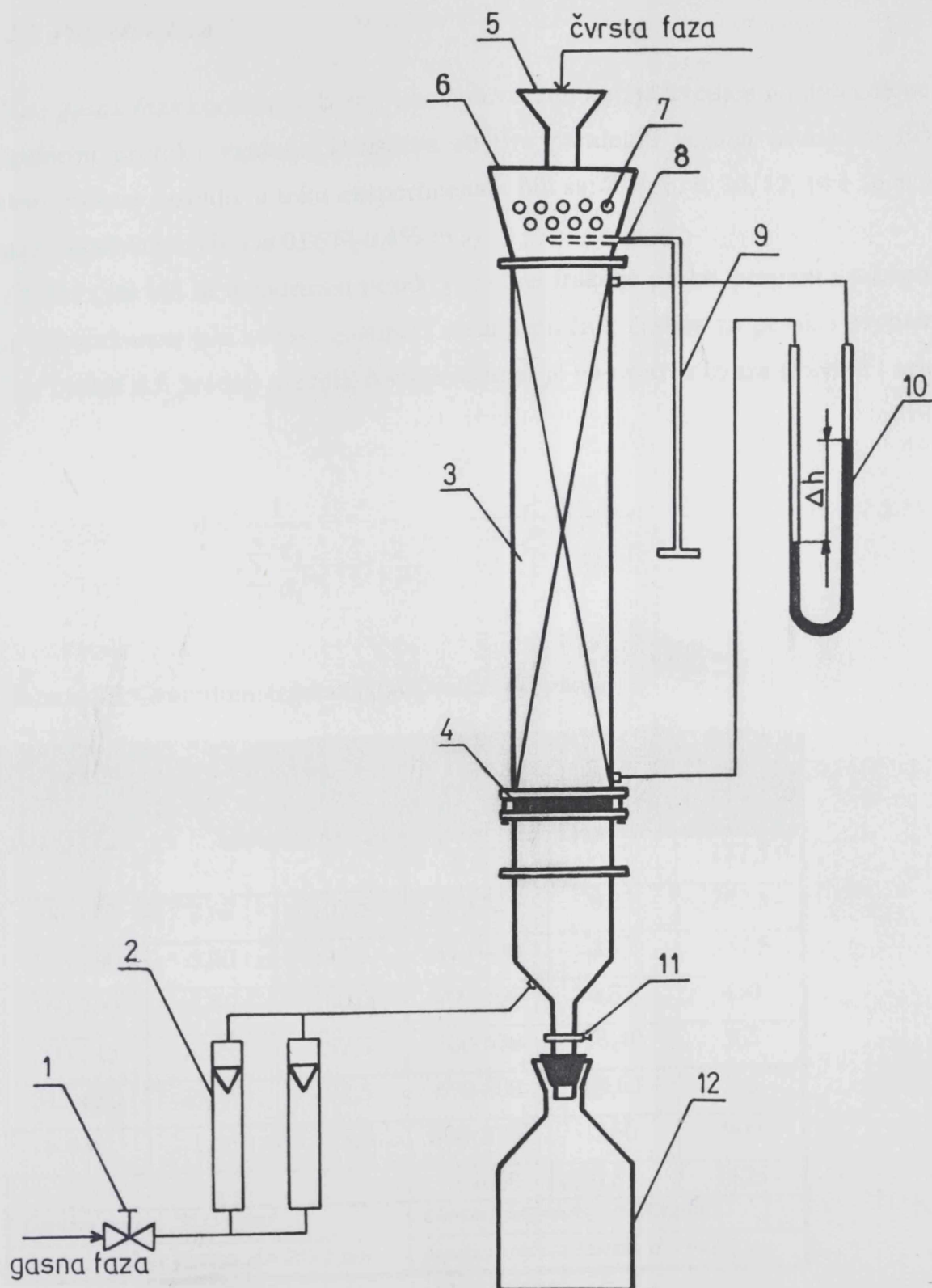
Fluidodinamička ispitivanja kontaktora gas-čvrsto-punjenje ostvarena su na aparaturi prikazanoj na *Sl. 2.1.* čiji su sastavni delovi:

- ◆ kolona sa punjenjem,
- ◆ regulator i merač protoka gasne faze,
- ◆ dozator i regulator fluksa čvrste faze,
- ◆ "U"-manometar,
- ◆ nosač kolone i
- ◆ sabirnik čvrste faze.

Kolona (3) izradjena je od pleksiglasa unutrašnjeg prečnika 0,111 m, visine segmenta od 1 m. U toku eksperimenata korišćene su visine kolone od 1, 2 i 3 m.

Dno kolone pričvršćeno je za metalni nosač koji se sastoji iz dva dela: nepokretnog dela za koji je pričvršćena kolona i pokretnog sa rešetkom prečnika otvora od 6 mm. Uloga rešetke je da bude nosač punjenja u koloni i distributor gasne faze koja se uvodi na dno kolone. Pokretni deo nosača je omogućavao pražnjenje punjenja iz kolone pri eksperimentalnom određivanju statičkog sadržaja čvrste faze, bez demontiranja kolone. Za pokretni deo nosača pričvršćen je stakleni kružni nastavak sa slavinom (11) koja je povezana sa bocom za prikupljanje čvrste faze.

Vrh kolone povezan je sa dozatorom čvrste faze (6) koji sadrži mehanizam za regulaciju fluksa čestica. Mehanizam se sastoji od diska sa otvorima različitog prečnika od 4, 6, 8 i 10 mm, za koje je kalibracijom određivan fluks čestica korišćenih u radu (*Tabela 2.2.*). Dozator je istovremeno služio i za izdvajanje sitnih čestica čvrste faze iz izlazne struje gasa koji je napuštao kolonu.



Slika 2.1. Eksperimentalna aparatura: (1)-ventil za dovod gasne faze; (2)-rotametri; (3)-kolona sa punjenjem; (4)-nosač kolone; (5)-levak; (6)-dozator čvrste faze; (7)-otvori za izlaz gasne faze; (8)-disk; (9)-ručica za regulaciju; (10)-"U"-manometar; (11)-ventil; (12)-prihvatni sud za čvrstu fazu.



2.2. Pokretne faze

Kao *gasna faza* korišćen je komprimovani vazduh koji je uveden na dno kolone. Za regulaciju protoka vazduha korišćena su dva paralelno vezana rotametra (2). Korišćeni protoci vazduha u toku eksperimenata bili su: 2, 4, 6, 8, 10, 12, 14 i 16 m³/s (opseg prividnih brzina bio je 0,0574-0,459 m/s).

Čvrsta faza bili su dehidrirani pesak, pojedine frakcije peska, propant i mleveni kamen. Granulometrijski sastav, gustina i srednji prečnik čestica za pesak i propant dati su u *Tabeli 2.1*. Srednji prečnik čestica računat je na osnovu izraza (Pavlov i sar., 1976):

$$d = \frac{1}{\sum_1^n \frac{x_i}{d_i}} \quad (2.1)$$

Tabela 2.1. Granulometrijski sastav peska i propanta.

PESAK			PROPANT		
d (μm)	x _i (%)	d _i (μm)	d (μm)	x _i (%)	d _i (μm)
< 90	3,20	70,0	< 250	0,07	187,5
90-125	2,68	107,5	250-315	0,23	282,5
125-160	3,20	142,5	315-400	2,97	357,5
160-200	7,86	180,0	400-500	8,33	450
200-315	52,60	257,5	500-630	16,40	565
315-630	29,40	472,5	630-800	65,67	715
> 630	1,06	715,0	800-1000	5,50	900
			> 1000	0,83	1125
<i>Gustina peska, 2635 kg/m³</i>			<i>Gustina propanta, 2643 kg/m³</i>		
<i>Srednji prečnik čestica, d = 253,5 μm</i>			<i>Srednji prečnik čestica, d = 642,2 μm</i>		

Pokretna čvrsta faza u kolonu je uvedena preko dozatora sa vrha kolone (6). Odgovarajući fluksevi čvrstih faza, određeni kalibracijom otvora na disku dozatora (8), dati su u *Tabeli 2.2*.

Tabela 2.2. Karakteristike korišćenih čvrstih faza.

Čvrsta faza		Gustina (kg/m ³)	Srednji prečnik (mm)	Fluks čvrste faze, (kg/m ² s)			
				Prečnik otvora dozatora (mm)			
				4	6	8	10
pesak (90-630 μm)		2635	253,5	0,16	0,5	1,2	2,50
propant (250-1000 μm)		2643	642,2	0,14	0,49	1,2	2,46
frakcija	125-200 μm	2635	167,3	0,19	-	-	2,54
peska	200-315 μm	2635	257,5	0,19	-	-	2,59
mleveni kamen (710-1000 μm)		2679	855	-	0,39	-	1,02

Kalibracija dozatora vršena je nezavisno od kolone. Za svaki pojedinačni otvor merena je prikupljena masa čvrste faze tokom 2 min.

2.3. Karakteristike punjenja

Fluidodinamičke karakteristike, pad pritiska i dinamički i statički sadržaj čvrste faze, ispitivanog trofaznog kontaktora određivane su za šest tipova komercijalnih punjenja: dve vrste Raschigovih prstenova, keramičke kuglice, Pall prstenove, Intaloks sedla i cilindrične mrežice i lomljeni kamen, kao punjenje nepravilne geometrije. Osnovne, relativno lako merljive, karakteristike punjenja, koje imaju uticaja na merene fluidodinamičke karakteristike su poroznost sloja (ε) i ekvivalentni prečnik (d_e).

Poroznost (ε) predstavlja udeo svih šupljina u sloju u odnosu na ukupnu zapreminu kolone i definisana je izrazom:

$$\varepsilon = \frac{V_s}{V_k} = \frac{V_k - V_p}{V_k} = 1 - \frac{m_p}{\rho_p \cdot V_k} \quad (2.2)$$

Proizvođači komercijalnih punjenja daju podatke o poroznosti, međjutim ovaj podatak moguće je posmatrati samo kao polaznu procenu, s obzirom da poroznost zavisi od prečnika kolone i načina pakovanja elemenata punjenja u koloni. Način

pakovanja predstavlja prostornu orijentaciju elemenata punjenja i slučajna je veličina. U zavisnosti od načina pakovanja dobija se različita poroznost, odnosno nasuta masa punjenja po jedinici visine sloja.

Da bi se na osnovu *jed. (2.2.)* izračunala poroznost sloja određena je i gustina materijala od kojeg je punjenje i merena je masa punjenja koja se nasipa u kolonu. Pošto se pri slobodnom nasipanju kolone javljao lom elemenata punjenja naročito kod keramičkih Raschigovih prstenova-12 i keramičkih kuglica, a time se narušavale karakteristike sloja, za punjenje kolone korišćena je cilindrična cev prečnika 0,08 m i dužine 0,7 m. Cev je prvo punjena izmerenom masom punjenja ubacivana u kolonu i pražnjena je otvaranjem poklopca na dnu cevi. Ovim načinom punjenja lom elemenata je sveden na najmanju moguću količinu.

Ekvivalentni prečnik (d_e), elemenata punjenja računat je na osnovu izraza (Pavlov i sar., 1976):

$$d_e = 1,24 \sqrt[3]{\frac{m_{ep}}{\rho_p}} \quad (2.3)$$

Vrednosti dobijene za poroznost sloja, gustinu, ekvivalentni prečnik elemenata punjenja i mase punjenja sloja visine 1 m date su u *Tabeli 2.3.*

Tabela 2.3. Karakteristike sloja i elemenata punjenja.

Tip punjenja	Materijal	Masa (kg/m)	Poroznost	Gustina (kg/m ³)	Ekvivalentni prečnik, (mm)
Keramičke kuglice (d=19 mm)	keramika	11,173	0,474	2406,8	19,4
Raschigovi pr. (12 x 12 mm)	keramika	8,034	0,611	2340,0	11,8
Intaloks sedla (37 x 22 mm)	keramika	6,079	0,696	2267,9	21,5
Raschigovi pr. (30 x 30 mm)	plastika	1,394	0,852	1064,8	21,6
Cilindrične mrežice (24x28 mm)	plastika	0,516	0,938	951,5	12,9
Pall prstenovi (25 x 0,7 mm)	metal	1,697	0,957	4496,1	8,0
Lomljeni kamen (8-11 mm)	kamen	13,058	0,426	2420,0	9,5

2.4. Postupci merenja fluidodinamičkih karakteristika

Eksperimentalna merenja fluidodinamičkih karakteristika kontaktora gas-čvrsto-punjenje obuhvatila su dva postupka. U prvom delu meren je pad pritiska bez i sa proticanjem čvrste faze i dinamički sadržaj čvrstog za ceo interval brzina gasa (0,0574-0,459 m/s) i sve flukseve čvrstog u koloni sa ispitivanim tipom punjenja. U drugom delu pri merenju statičkog sadržaja čvrste faze za svaku vrednost brzine gasa, pri datom fluksu čvrstog, kolona je pražnjena i ponovo punjena što je neznatno uticalo na poroznost sloja kod istog tipa punjenja.

2.4.1. Merenje pada pritiska i dinamičkog sadržaja čvrste faze

Nakon punjenja kolone meren je pad pritiska kroz sloj pri proticanju vazduha bez proticanja čvrste faze. Protok vazduha je regulisan pomoću dva paralelno vezana rotametra (2), klase tačnosti 2,5%. Pad pritiska je očitavan na "U"-manometru (10) posle uspostavljanja stacionarnosti pri proticanju vazduha. Nakon merenja pada pritiska kroz "suvo" punjenje u kolonu je uvedena čvrsta faza pomoću dozatora (5, 6) na vrhu kolone. Fluks čvrstog regulisan je pomoću otvora na disku (8) koji je pokretan pomoću ručice (9). Čvrsta faza koja prodje kroz sloj punjenja prikupljena je u sabirniku (12).

Posle uspostavljanja stacionarnosti očitavan je pad pritiska, a zatim je istovremeno zatvaran i dovod i odvod čvrste faze pomoću ručice (9) i ventila (11). Pre zaustavljanja protoka vazduha očitavan je pad pritiska. Prikupljena masa čvrstog koja je prošla kroz sloj tokom vremena prikupljanja (oko 10 min) ispuštana je kroz odvodni ventil (11) i merena. Na osnovu izmerene mase izračunavan je dinamički sadržaj čvrste faze na osnovu izraza:

$$\beta_d = \frac{m}{\rho V_k} \quad (2.4)$$

Eksperimenti su vodjeni tako da su pad pritiska i dinamički sadržaj mereni za ceo opseg brzina gasa pri najmanjem fluksu čvrstog, a zatim je povećavana vrednost fluksa i merenja ponavljana za dato punjenje u koloni.

2.4.2. Merenje statičkog sadržaja čvrste faze

Posle izmerenog pada pritiska i dinamičkog sadržaja kolona je pražnjena a zaostale čestice čvrste faze između elemenata punjenja izdvajane su prosejavanjem. Izdvojena masa je merena a statički sadržaj čvrste faze je računat na osnovu *jed. (2.4.)*. Ponovnim punjenjem kolone istim tipom punjenja ponavljan je postupak za novu vrednost brzine gasa pri istom fluksu čvrstog. Zbog obimnijeg eksperimentalnog postupka pri ovim određivanjima statički sadržaj je odjedjivan samo kod Raschigovih prstenova-12, keramičkih kuglica i lomljenog kamena.

3. DISKUSIJA REZULTATA

Osnovne fluidodinamičke karakteristike sistema gas-čvrsto-punjenje, pad pritiska i dinamički i statički sadržaj čvrste faze, ispitivani su u zavisnosti od:

- ◆ prividne brzine gasne faze u opsegu 0,06-0,46 m/s,
- ◆ fluksa čvrste faze u opsegu 0,14-2,59 kg/m²s,
- ◆ veličine čestica čvrste faze,
- ◆ tipa punjenja i
- ◆ visine sloja punjenja.

S obzirom da su eksperimenti vodjeni u stabilnim režimima, odnosno režimu pre nakupljanja i nakupljanja, posmatran je i uticaj ovih režima na navedene fluidodinamičke karakteristike.

Korelacione jednačine za predviđanje pada pritiska i dinamičkog i statičkog sadržaja, izvedene su za svaki režim pojedinačno uz prethodno definisanje granice između režima (tačke nakupljanja).

3.1. PAD PRITISKA

Pad pritiska pri proticanju gasa kroz nasut sloj u koloni, javlja se usled gubitka energije gasa pri savladavanju sila trenja koje se javljaju između gasa i zidova kolone, gasa i punjenja u koloni i gasa i čvrste faze. S obzirom na pojavu navedenih sila trenja pri proticanju gasa, pad pritiska po jedinici visine sloja punjenja u koloni može se podeliti na dva člana: pad pritiska kroz nasuto punjenje (dvofazni sistem - $(\Delta P/L)_o$) i pad pritiska kroz sloj punjenja pri protivstrujnom proticanju gasne i čvrste faze (trofazni sistem - $(\Delta P/L)_s$):

$$\left(\frac{\Delta P}{L}\right)_{uk} = \left(\frac{\Delta P}{L}\right)_o + \left(\frac{\Delta P}{L}\right)_s \quad (3.1.1)$$

3.1.1. Pad pritiska kroz suvo punjenje

Pad pritiska kroz suvo punjenje u koloni bez proticanja čvrste faze, $(\Delta P/L)_o$, zavisi od sile trenja između gasa i zidova kolone i gasa i punjenja u koloni i obično se prikazuje kao funkcija prividne brzine gasa.

3.1.1.1. Uticaj tipa punjenja i poroznosti sloja

Ispitujući različite tipove punjenja brojni autori su utvrdili da oblik punjenja i poroznost sloja bitno utiču na pad pritiska. Verver i van Swaaij (1986a) su kod ispitivanih punjenja u obliku pravilno slaganih cevi kvadratnog preseka (tip A) i trougaonog (tip B) uočili da pri istim brzinama gasa punjenje kvadratnog preseka ima znatno manje vrednosti pada pritiska u odnosu na vrednosti koje su dobili Roes i van Swaaij (1979a) i Large i sar. (1981) za Pal prstenove (15x15 mm). Za punjenje tipa B dobili su skoro iste vrednosti otpora kao i autori koji su ispitivali Pal prstenove. Dobijene veće vrednosti pada pritiska za punjenje tipa B ovi autori su objasnili kao posledicu većeg otpora trenja usled gušće strukture punjenja i geometrijskog oblika elemenata, odnosno većom vrednošću koeficijenta trenja, C_D , u odnosu na vrednost dobijenu za tip A. Koeficijent trenja računali su na osnovu jednačine za pad pritiska za turbulentne uslove proticanja:

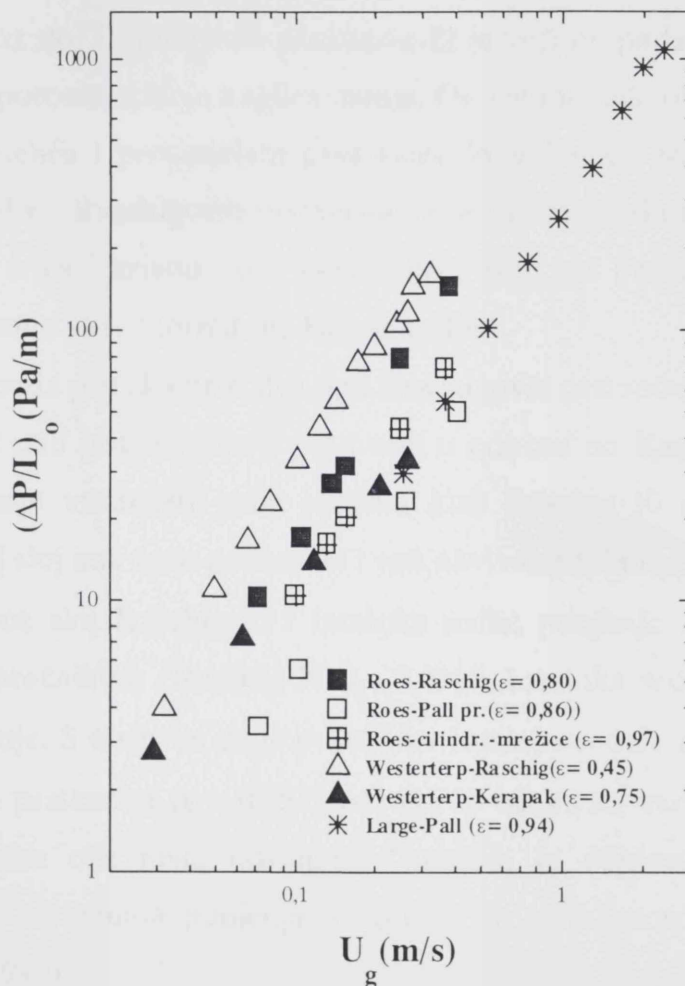
$$\left(\frac{\Delta P}{L}\right)_o = C_D \frac{\rho_g U_g^2}{2} \quad (3.1.2)$$

Westertep i Kuczynski (1987a) su za Kerapak punjenje dobili od 3 do 10 puta manje vrednosti pada pritiska u odnosu na Raschigove prstenove i mešano punjenje (Raschigovi prstenovi i tablete). Ovi autori su ukazali na različite vrednosti pada pritiska za ispitivana punjenja ali ne navode moguća objašnjenja za dobijene razlike.

Kiel (1990) je za punjenja u obliku slaganih cevi različitog poprečnog preseka takodje uočio zavisnost pada pritiska od oblika punjenja. Za cevi kvadratnog oblika dobio je veće vrednosti pada pritiska u odnosu na punjenja sa različito slaganim

kružnim cevima, iako je punjenje sa kvadratnim cevima imalo veću poroznost, što je objasnio uticajem oštih ivica ovog tipa punjenja na pad pritiska.

Literaturni podaci o padu pritiska bez proticanja čvrste faze (Roes i van Swaaij, 1979a; Large i sar., 1981; Westerterp i Kuczynski, 1987a) (Tabela 1.1.) dati su na Sl. 3.1.1.

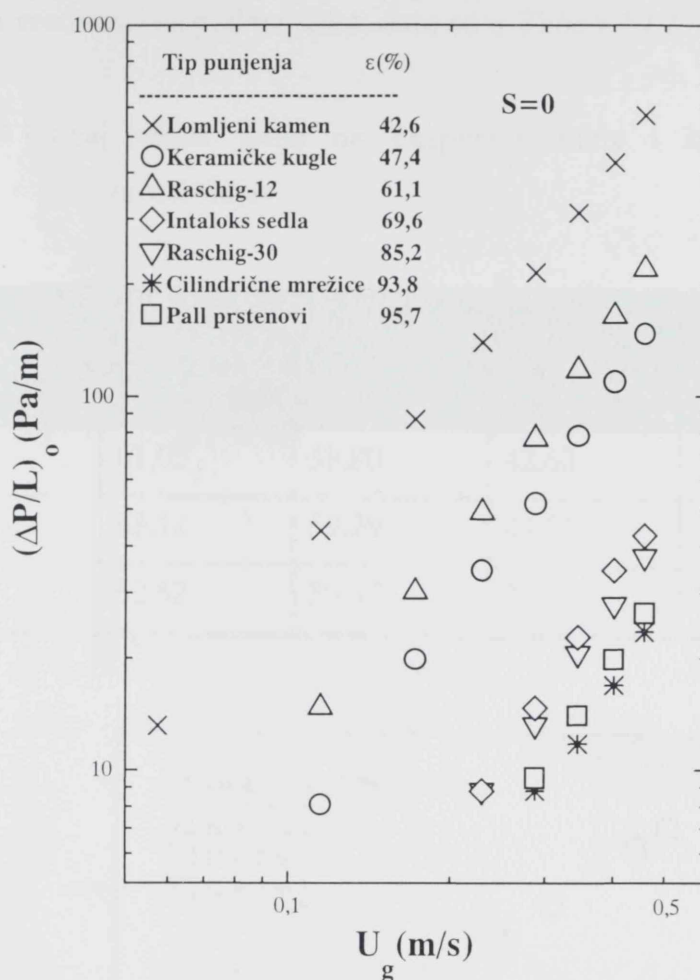


Slika 3.1.1. Literaturni podaci o padu pritiska bez proticanja čvrste faze.

Uticaj tipa punjenja i poroznosti sloja na pad pritiska bez protoka čvrstog kod ispitivanih punjenja u ovom radu (Tabela 2.3.) prikazani su na Sl. 3.1.2. Kod svih tipova punjenja pad pritiska raste sa porastom brzine gasa i smanjenjem poroznosti sloja punjenja. Poredjenjem vrednosti pada pritiska kroz pojedinačna punjenja zapaža se sledeće:

- ♦ Pad pritiska raste sa porastom brzine gasa bez promene nagiba krive što ukazuje na samo jedan režim strujanja. Nagib krivih pada pritiska kreće se od 1,74 do 2,05.

- ◆ Najveći pad pritiska dobija se za lomljeni kamen, punjenje sa najmanjom poroznošću. Iako je poroznost lomljenog kamena približna poroznosti keramičkih kuglica dobijene vrednosti pada pritiska su i do 4 puta veće, zbog nepravilnosti oblika, oštih ivica, kao i nepredvidive prostorne orijentacije. Sve to utiče na nepravilnost kanala u sloju punjenja i na pad pritiska.
- ◆ Pad pritiska kroz sloj Raschigovih prstenova-12 je veći od pada pritiska kroz sloj kuglica iako je poroznost sloja kuglica manja. Ovo je moguće objasniti pravilnom geometrijom kuglica i proticanjem gasa samo kroz kanale formiranih između kuglica, dok u sloju Raschigovih prstenova, zbog geometrijskog oblika punjenja, odnosno oštih ivica i krivudavosti kanala kroz sloj, gas prolazi i kroz šupljine elemenata punjenja i kroz formirane kanale u sloju.
- ◆ Pri poredjenju pada pritiska kroz dva tipa Raschigovih prstenova uočljivo je da je kod Raschig-12 pad pritiska oko 6 puta veći u odnosu na Raschig-30. Iako iste geometrije, manje vrednosti pada pritiska kod Raschig-30 su i očekivane s obzirom da ovaj sloj ima veću poroznost i veći ekvivalentni prečnik.
- ◆ Pad pritiska kroz sloj Raschig-30 i Intaloks sedla, punjenja sa približno istim ekvivalentnim prečnikom (Raschig-30 $d_e = 0,0216$; Intaloks sedla $d_e = 0,0215$), se neznatno razlikuje. S obzirom da je poroznost Intaloks sedala manja ($\epsilon = 0,696$) od Raschigovih prstenova ($\epsilon = 0,852$) trebalo bi očekivati veće vrednosti pada pritiska, međutim ova mala odstupanja moguće je objasniti dominantnijim uticajem oblika elemenata punjenja u odnosu na uticaj poroznosti, na šta je ukazao i Kiel (1990).
- ◆ Ako se uporede podaci za Intaloks sedla, Raschig-30 i Pall prstenove vrednosti pada pritiska opadaju sa porastom poroznosti sloja punjenja. Do sličnih zapažanja o uticaju porasta poroznosti sloja punjenja na pad pritiska došli su i drugi autori pri ispitivanju fluidodinamike svojih punjenja (Roes i van Swaaij, 1979a; Westerterp i Kuczynski, 1987a; Kiel, 1990) što je uočljivo i na *Sl. 3.1.1*. Vidljivo je da su najveće vrednosti za pad pritiska dobijene za Raschigove prstenove kod Westerterpa i Kuczynskog (1987a), dok se za punjenja veće poroznosti i to Pall prstenove kod Roesa i van Swaaija (1979a) odnosno Largea i sar. (1991) vrednosti pada pritiska smanjuju.



Slika 3.1.2. Zavisnost pada pritiska od brzine gasa bez proticanja čvrste faze za punjenja ispitivana u ovom radu (Tabela 2.3.).

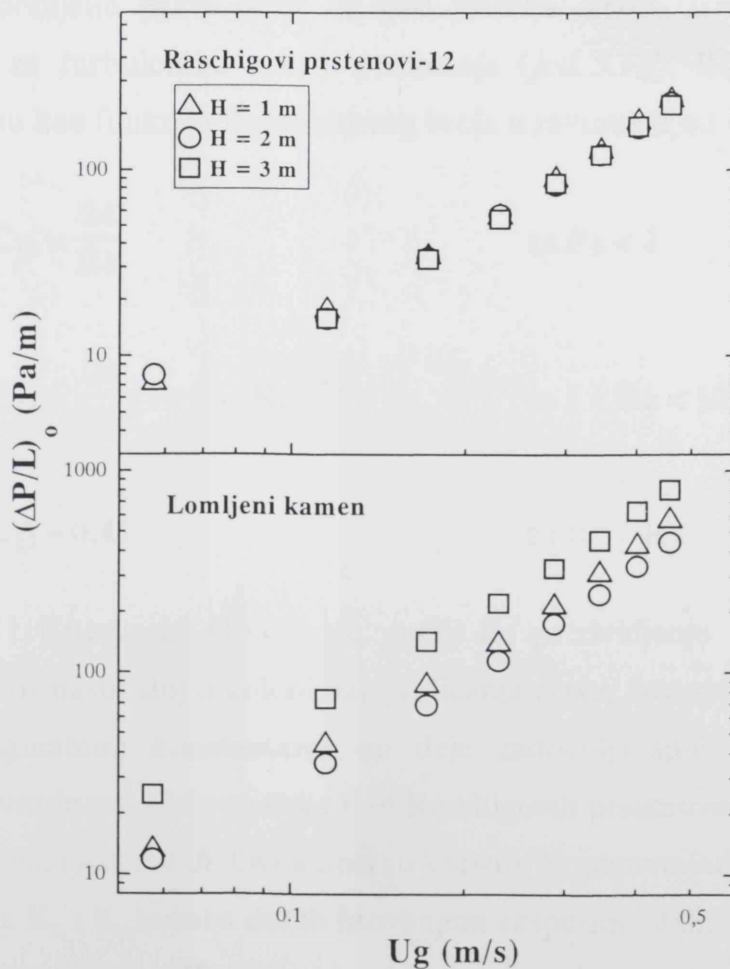
3.1.1.2. Uticaj visine sloja punjenja

U literaturi nema podataka o uticaju visine nasutog sloja na pad pritiska bez protoka čvrstog, pa su u ovom radu diskutovana vlastita zapažanja u vezi sa uticajem ove karakteristike i to kod punjenja pravilne geometrije, kao što su Raschigovi prstenovi-12, i lomljenog kamena, kao punjenja nepravilnog oblika i manje poroznosti. Prikazani rezultati na Sl. 3.1.3. ukazuju da visina sloja ima uticaja na pad pritiska što je moguće objasniti na osnovu poroznosti. Eksperimentalne vrednosti poroznosti, $\varepsilon_{\text{eksp.}}$, izražene kao zapreminski udeo svih šupljina u odnosu na ukupnu zapreminu kolone,

kao i izračunate vrednosti, $\epsilon_{\text{rač}}$, dobijene na osnovu Ergunove jednačine fitovanjem eksperimentalnih vrednosti za pad pritiska, date su u *Tabeli 3.1.1*.

Tabela 3.1.1. Uticaj visine sloja na eksperimentalne i izračunate vrednosti poroznosti sloja.

Visina (m)	Raschigovi prstenovi		Lomljeni kamen	
	ϵ_{eksp} (%)	$\epsilon_{\text{rač}}$ (%)	ϵ_{eksp} (%)	$\epsilon_{\text{rač}}$ (%)
1	61,05	58,80	42,60	40,16
2	63,12	59,29	44,51	42,36
3	62,52	59,97	38,21	35,62



Slika 3.1.3. Uticaj visine sloja punjenja na pad pritiska bez proticanja čvrstog.

Ako se posmatra poroznost za sloj Raschigovih prstenova, i eksperimentalna i izračunata vrednost poroznosti za visinu od 1 m je neznatno manja u odnosu na poroznost za visine 2 i 3 m pa su i dobijene veće vrednosti pada pritiska za visinu od 1 m. Medjutim, s obzirom da se poroznosti za različite visine sloja nisu znatnije razlikovale, nisu dobijene ni velike razlike u padu pritiska. Kod lomljenog kamena najmanju vrednost poroznosti imao je sloj visine 3 m, za koji su dobijene i najveće vrednosti pada pritiska.

3.1.1.3. Predviđanje pada pritiska

Sa porastom brzine gasa raste i pad pritiska nezavisno od tipa punjenja u koloni, a eksperimentalne vrednosti pada pritiska u funkciji brzine gasa (logaritamska zavisnost) mogu se aproksimirati pravim linijama. Verver (1984) i Kiel (1990) su pokazali da se dobijene prave linije za pad pritiska mogu izračunati na osnovu jednačine trenja za turbulentne uslove proticanja (*jed. 3.1.2*). Koeficijent trenja u jednačini izrazili su kao funkciju Rejnoldsovog broja u zavisnosti od režima strujanja:

$$C_D = \frac{24}{Re} \quad \text{za } Re < 1$$

$$C_D = \frac{24}{Re} (1 + 0,15 Re^{0,67}) \quad \text{za } 1 < Re < 10^3 \quad (3.1.3)$$

$$C_D = 0,43 \quad \text{za } 10^3 < Re < 10^5$$

Westertep i Kuczynski (1987a) su uočili da predviđanje pada pritiska pri proticanju gasa kroz nasut sloj u koloni bez proticanja čvrste faze na osnovu Ergunove jednačine sa originalnim konstantama ne daje zadovoljavajuće rezultate jer su eksperimentalne vrednosti pada pritiska kod Raschigovih prstenova i do 50% niže od izračunatih vrednosti (*jed. 3.1.4*). Ovi autori su koristili Ergunovu jednačinu (*jed. 3.1.4*) ali sa konstantama K_L i K_t koje su dobili fitovanjem eksperimentalnih podataka za pad pritiska kroz sloj punjenja (Raschigove prstenove, mešano punjenje i Kerapak) i gasove (vazduh, argon, helijum i Freon 12):

$$\left(\frac{\Delta P}{L}\right)_o \frac{d_e}{\rho_g \cdot U_g^2} \cdot \frac{\varepsilon^3}{(1-\varepsilon)} = K_L \left(\frac{1-\varepsilon}{Re}\right) + K_t \quad (3.1.4)$$

i pokazali da na vrednosti Ergunovih konstanti utiče i tip punjenja i vrsta gasa koja se koristi, a dobijene vrednosti Ergunovih konstanti znatno odstupaju od originalnih ($K_L=150$ i $K_t=1,75$). Na primer za sistem Raschigovi prstenovi-vazduh izračunate konstante su bile $K_L=78$, $K_t=0,97$, a za Raschigove prstenove-argon $K_L=100$, $K_t=0,99$. Ovi autori priznaju da nemaju objašnjenje za ova odstupanja.

S obzirom da je u literaturi (Westertep i Kuczynski, 1987a) ukazano da Ergunova jednačina sa originalnim konstantama ($K_L=150$ i $K_t=1,75$) ne daje zadovoljavajuće rezultate za predviđanje pada pritiska kroz nasut sloj, jer tip punjenja utiče na vrednosti Ergunovih konstanti, za ispitivana punjenja u ovom radu računane su konstante Ergunove jednačine fitovanjem eksperimentalnih vrednosti za pad pritiska kroz nasut sloj koristeći eksperimentalne vrednosti za poroznost sloja, $\varepsilon_{\text{eksp}}$.

Tabela 3.1.2. Konstante Ergunove jednačine i poroznost sloja punjenja.

Tip punjenja	Poroznost $\varepsilon_{\text{eksp}}$	Izračunate konst Ergunove jed.(3.1.4.)	
		K_t	K_L
Keramičke kuglice	0,474	1,999	108,258
Raschigovi pr.-12	0,611	1,972	136,004
Intaloks sedla	0,696	3,661	280,029
Raschigovi pr.-30	0,852	2,574	106,110
Cilindrične mrežice	0,938	5,034	339,284
Pall prstenovi	0,957	2,471	216,774

I jednačina za turbulentne uslove proticanja (jed. 3.1.2), kao i Ergunova jednačina (jed. 3.1.4), (bilo sa originalnim Ergunovim konstantama ili konstantama dobijenim fitovanjem eksperimentalnih podataka) koje su korišćene u literaturi za predviđanje pada pritiska bez proticanja čvrste faze, ne obuhvataju uticaj trenja između gasa i zidova kolone. S obzirom da na pad pritiska utiču brzina gasa, karakteristike punjenja, kao i trenje između gasa i zidova kolone u ovom radu je za predviđanje pada pritiska izvedena korelacija oblika:

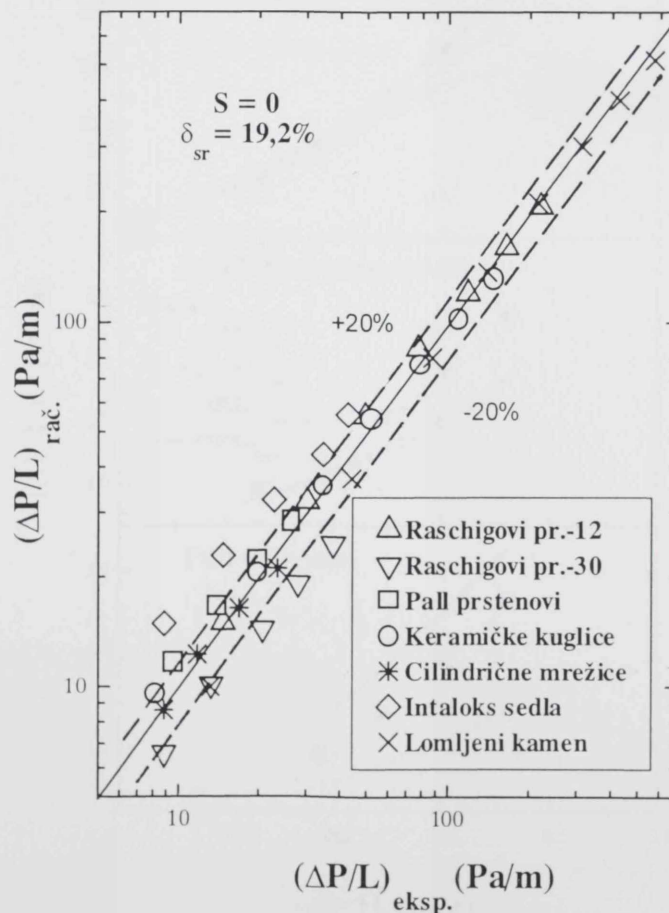
$$(\Delta P / L)_o = 1,40 K_w^{0,47} U_g^{1,89} d_e^{-1,72} (1 - \varepsilon)^{1,29} \quad (3.1.5)$$

sa koeficijentom korelacije $R = 0,98$ i standardnom greškom eksponenata od 4,3 do 41,1%. Najveća greška eksponenata dobijena je za faktor zida.

U predloženoj jednačini, trenje između gasa i zidova kolone obuhvaćeno je faktorom zida koji je uveo Mackowiak (1991):

$$K_w = 1 + \frac{2}{3} \cdot \left(\frac{1}{1 - \varepsilon} \cdot \frac{d_e}{D} \right) \quad (3.1.6)$$

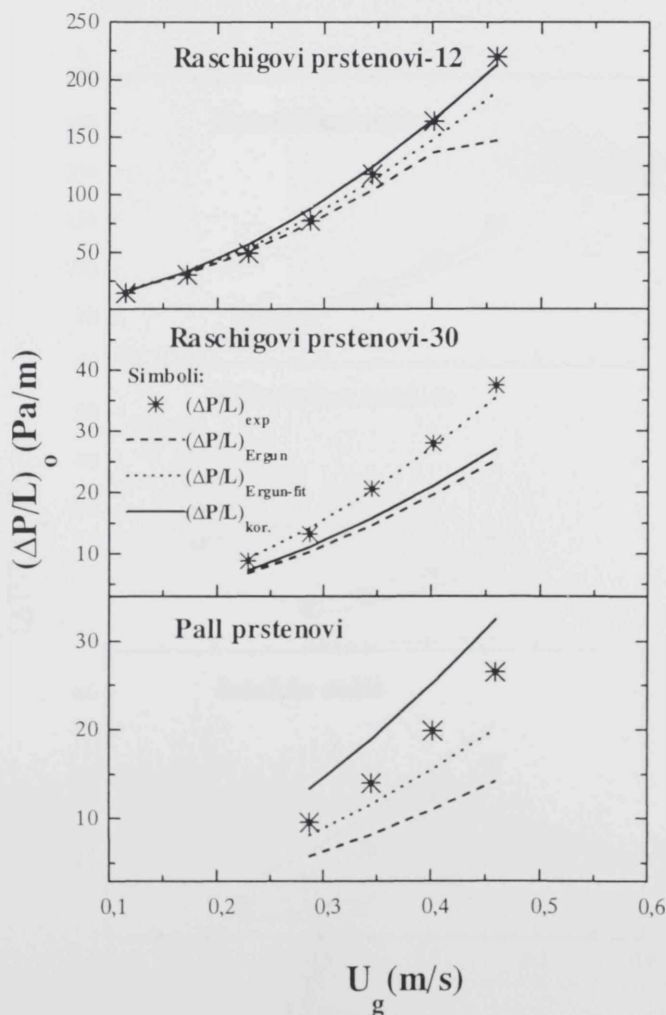
Na *Sl. 3.1.4.* prikazane su eksperimentalne i izračunate vrednosti za pad pritiska bez proticanja čvrste faze na osnovu *jed. 3.1.5.*



Slika 3.1.4. Poređenje eksperimentalnih i izračunatih vrednosti za pad pritiska na osnovu jednačine (3.1.5).

Uočljivo je da se najveće odstupanje izračunatih i eksperimentalnih vrednosti pada pritiska dobija kod Intaloks sedala, što se možda može objasniti zapažanjem do kojeg su došli i Westerterp i Kuczynski (1987a). Naime, ovi autori su odstupanje eksperimentalnih vrednosti pada pritiska kod Raschigovih prstenova (i do 50%) od izračunatih vrednosti po Ergunovoj jednačini objasnili svojom sumnjom u ispravnost uobičajeno korišćenog postupka pri proračunu ekvivalentnog prečnika ne sferičnih punjenja na osnovu ekvivalentnog prečnika sfere.

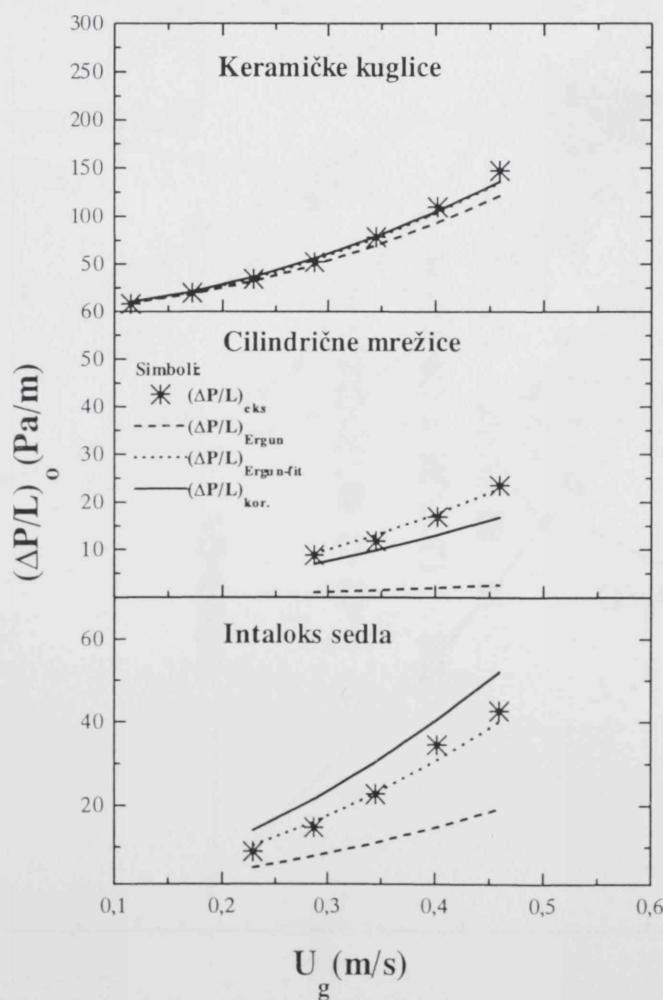
Uporedni prikaz jednačina za predviđanje pada pritiska: na osnovu Ergunove jednačine sa originalnim Ergunovim konstantama (*jed. 3.1.4*), Ergunove jednačine sa konstantama dobijenim fitovanjem eksperimentalnih podataka (vidi *Tabelu 3.1.2*) i izvedene korelacije *jed. 3.1.5* za pojedinačna punjenja dat je na *Sl. 3.1.5* i *3.1.6*.



Slika 3.1.5. Poredjenje jednačina za predviđanje pada pritiska kroz suvo punjenje.

Kod pojedinih punjenja (Intaloks sedla, Raschigovi prstenovi-30 i cilindrične mrežice), Ergunova jednačina sa fitovanim konstantama daje bolje slaganje sa eksperimentalnim vrednostima pada pritiska u odnosu na izvedenu korelaciju (*jed. 3.1.5*). Medjutim, s obzirom da se računске vrednosti K_L i K_t dobijaju fitovanjem eksperimentalnih vrednosti pada pritiska i to za pojedinačna punjenja dobijena slaganja su prividno bolja u odnosu na izvedenu korelaciju (*jed. 3.1.5*), jer je ona izvedena na osnovu svih tipova punjenja koja su ispitivana u ovom radu.

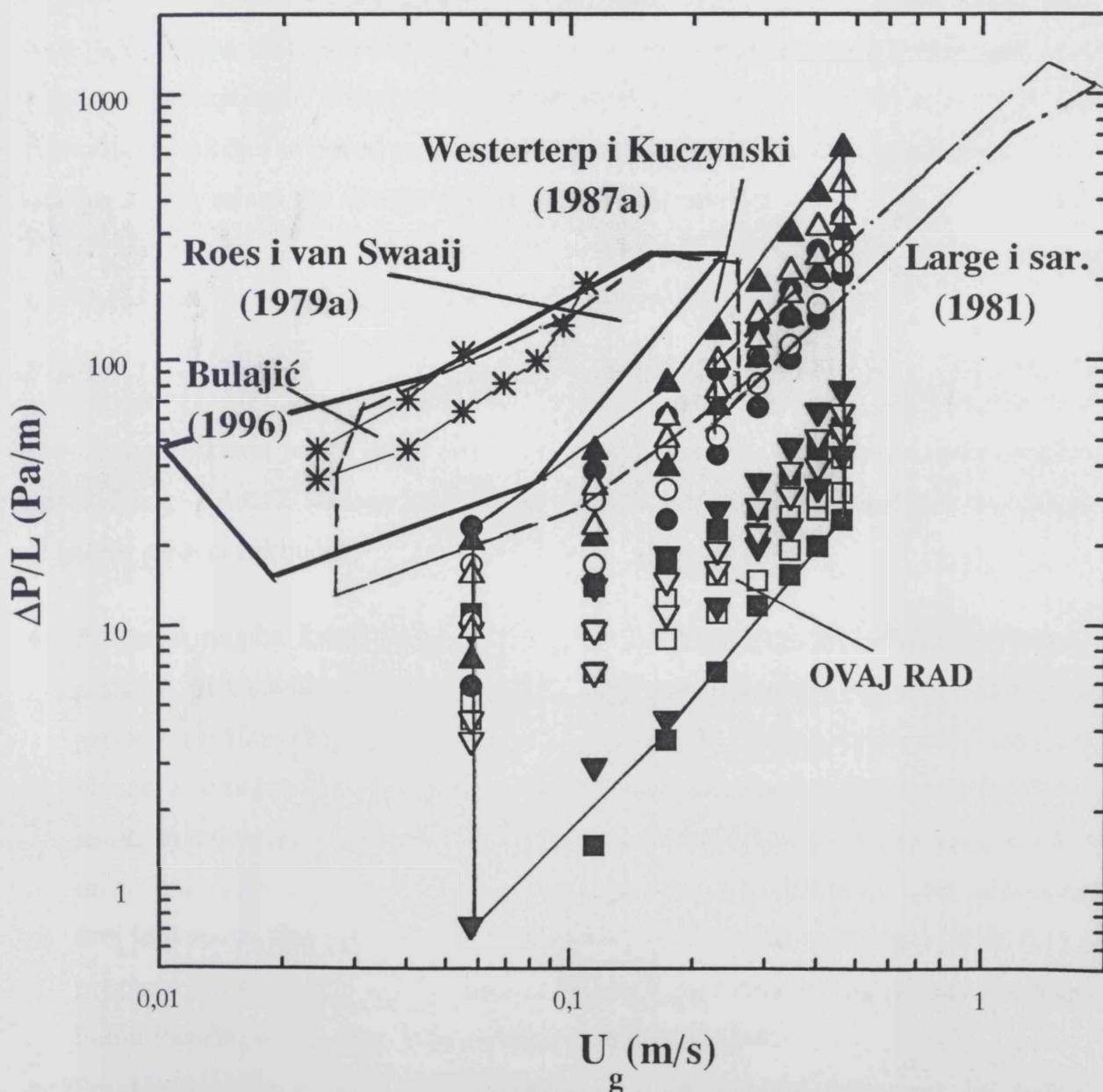
Odstupanja eksperimentalnih i izračunatih vrednosti za pad pritiska na osnovu Ergunove jednačine sa originalnim konstantama ($K_L = 150$; $K_t = 1,75$), su najveća kod punjenja sa nepravilnim geometrijskim oblikom zbog svodjenja ekvivalentnog prečnika punjenja na ekvivalentni prečnik sfere na čiju su nepreciznost ukazali Westerterp i Kuczynski (1987a).



Slika 3.1.6. Poredjenje jednačina za predviđanje pada pritiska kroz suvo punjenje.

3.1.2. Pad pritiska pri protivstrujnom proticanju gasa i čvrste faze

Pad pritiska pri protivstrujnom proticanju gasa i čvrste faze kroz sloj punjenja je mnogo kompleksniji parametar, jer na njega utiču: brzine gasne i čvrste faze, tip i karakteristike elemenata punjenja, način uvođenja i distribucija gasne i čvrste faze, karakteristike čvrste faze i trenje izmedju gasa i čvrste faze. Uticaj ovih karakteristika na pad pritiska kao i izvođenje korelacionih jednačina za predviđanje pada pritiska pri proticanju čvrste faze, zasnivaju se na poredjenju naših i literaturnih podataka (Roes i van Swaaij, 1979a; Large i sar., 1981; Westerterp i Kuczynski, 1987a; vidi *Tabelu 1.1.*). U poredjenju sa rezultatima drugih autora (*Sl. 3.1.7*) eksperimentalni



Slika 3.1.7. Rezultati dosadašnjih ispitivanja pada pritiska u kontaktorima gas-čvrsto-punjenja (*Tabela 1.1.*) i rezultati ovog rada.

rezultati za pad pritiska, za sve tipove punjenja ispitivane u ovom radu, pomereni su ka manjim vrednostima pritiska i delimično se preklapaju sa rezultatima Large i sar. (1981) i Westerterpa i Kuczynskog (1987a).

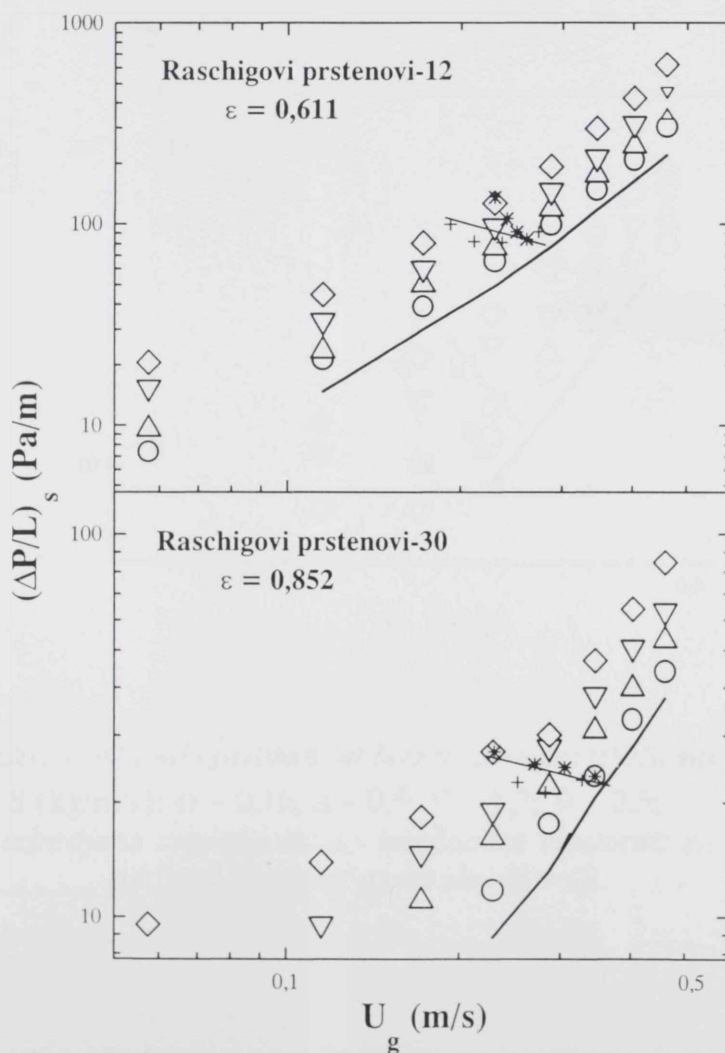
3.1.2.1. Uticaj brzina pokretnih faza

Pad pritiska raste i sa porastom brzine gasa i sa porastom fluksa čvrste faze. Pri malim brzinama gasa (zona pre nakupljanja) više autora (Roes i van Swaaij, 1979a; Westerterp i Kuczynski, 1987a) uočilo je da je proticanje čestica kroz punjenje u obliku mlaza i da na porast pritiska utiče povećanje fluksa čvrste faze. Pri istom fluksu čvrste faze pad pritiska raste sa povećavanjem brzine gasa. Povećavanjem brzine gasa iznad zone pre nakupljanja, dolazi do promene režima strujanja odnosno dostiže se zona nakupljanja u kojoj se pored proticanja čestica u obliku mlaza javlja i proticanje čestica nezavisno od mlaza jer čestice bivaju zahvaćene strujom gasa (Roes i van Swaaij, 1979a; Westerterp i Kuczynski, 1987a). U ovoj zoni dolazi do povećanja pada pritiska bilo samo zbog porasta U_g , bilo zbog porasta S ili sa porastom U_g i S .

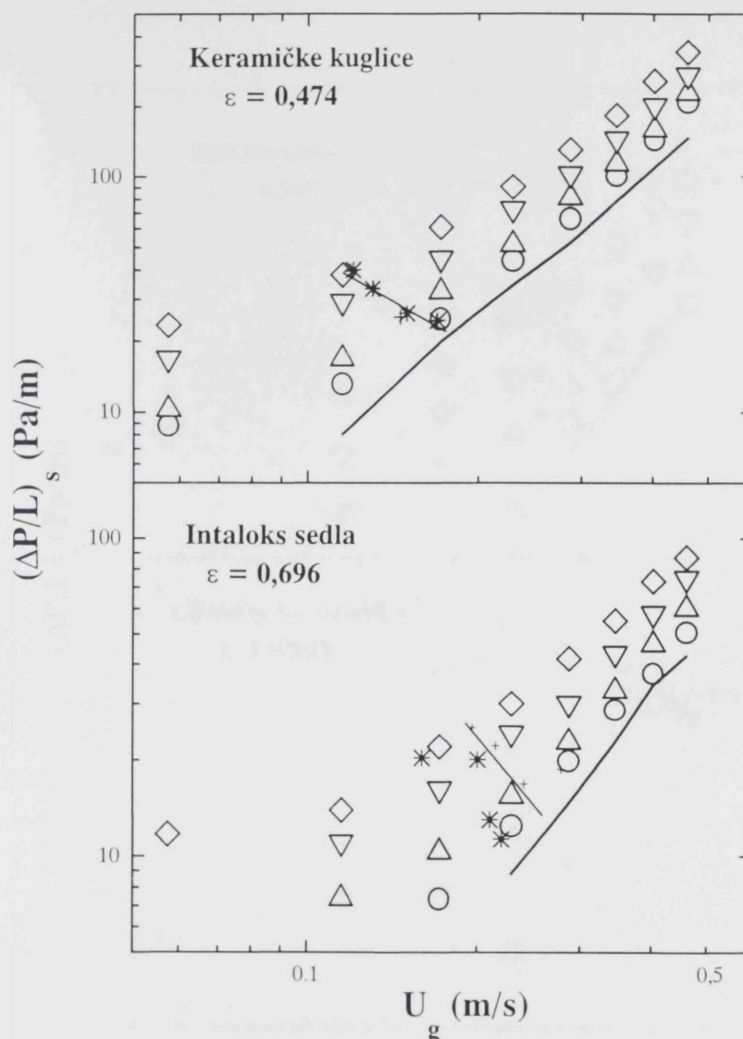
Eksperimentalne vrednosti pada pritiska za ispitivane tipove punjenja u ovom radu, pri proticanju peska prikazane su na *Sl. 3.1.8.*, *3.1.9.* i *3.1.10.*, odnosno propanta na *Sl. 3.1.11.* i *3.1.12.* Na osnovu literaturnih saznanja kao i dobijenih rezultata mogu se izvesti sledeći zaključci:

- ◆ Promena nagiba krivih, koje se mogu povući kroz eksperimentalne tačke pada pritiska prikazanih u funkciji brzine gasa (logaritamska podela) ukazuje na promenu režima strujanja. Pri malim brzinama gasa i malim fluksevima čvrste faze ostvaren je režim pre nakupljanja. Porastom brzine gasa i fluksa čvrste faze javlja se režim nakupljanja. Za režim pre nakupljanja nagib krivih pada pritiska kreće se od 0,44 do 1,94 za pesak kao pokretnu fazu, odnosno od 0,63 do 1,60 za propant, dok je u zoni nakupljanja nagib od 1,41 do 2,46 za pesak, odnosno 1,06 do 2,15 za propant. Najveći nagib pri proticanju i peska i propanta za oba režima proticanja imaju Raschigovi prstenovi-12 a najmanji Pall prstenovi.
- ◆ Granica izmedju režima pre nakupljanja i nakupljanja definisana je tačkom nakupljanja koja je dobijena u preseku pravih povučenih linearnom regresijom

kroz eksperimentalne vrednosti pada pritiska za ove dve zone. Na slikama od 3.1.8. do 3.1.12. ovako dobijene tačke nakupljanja predstavljene su simbolom (*), a izračunate vrednosti tačaka nakupljanja na osnovu izvedene korelacione jednačine (3.1.12.) predstavljene su isprekidanom pravom. Eksperimentalno dobijene tačke nakupljanja ostvaruju se pri manjim prividnim brzinama gasa pri proticanju propanta u odnosu na pesak što je vidljivo na Sl. 3.1.8. - 3.1.12.

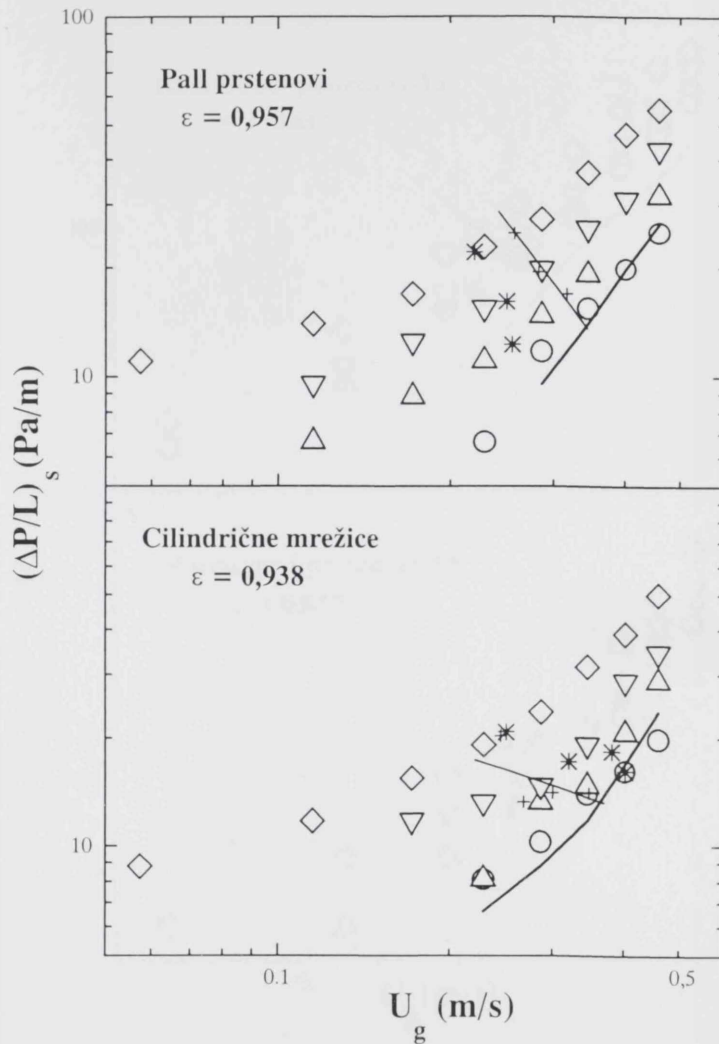


Slika 3.1.8. Zavisnost pada pritiska od brzine gasa pri proticanju peska. Simboli: S ($\text{kg/m}^2\text{s}$): \circ - 0,16; Δ - 0,5; ∇ - 1,2; \diamond - 2,5; * - tačka nakupljanja odredjena regresijom; + - izračunate vrednosti na osnovu jed 3.1.12. — pad pritiska kroz nasut sloj ($S = 0$).

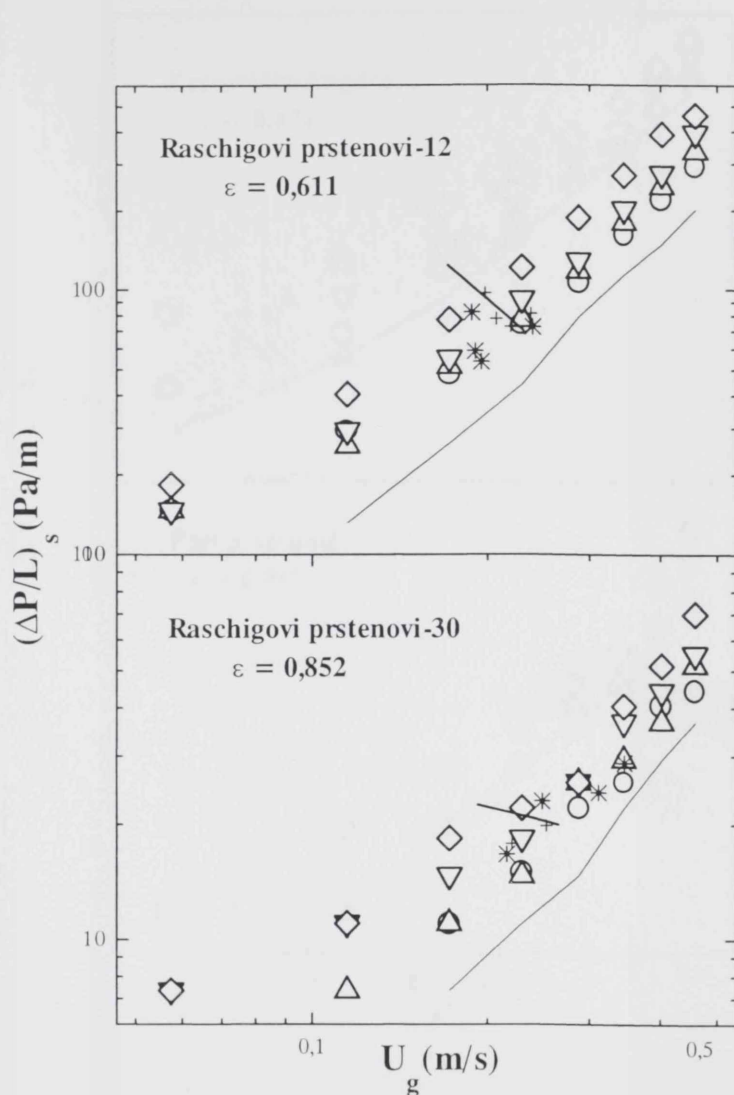


Slika 3.1.9. Zavisnost pada pritiska od brzine gasa pri proticanju peska. Simboli: S ($\text{kg/m}^2\text{s}$): ○ - 0,16; Δ - 0,5; ▽ - 1,2; ◇ - 2,5; * - tačka nakupljanja određena regresijom; + - izračunate vrednosti na osnovu jed 3.1.12. — pad pritiska kroz nasut sloj ($S = 0$).

- ◆ Stabilan režim rada bez naglog porasta pritiska i gomilanja čestica pokretne čvrste faze između elemenata ostvaren je kod svih komercijalnih punjenja (Raschigovih prstenova, keramičkih kuglica, Pall prstenova i dr.). Međutim, kod lomljenog kamena pri najvećem fluksu čvrste faze pri visini od 1 m došlo je do gomilanja čvrstih čestica, tj. do plavljenja kolone, što se na *Sl. 3.1.13.* vidi na osnovu manjeg broja tačaka pri najvećoj brzini gasa i najvećem fluksu čvrstog.

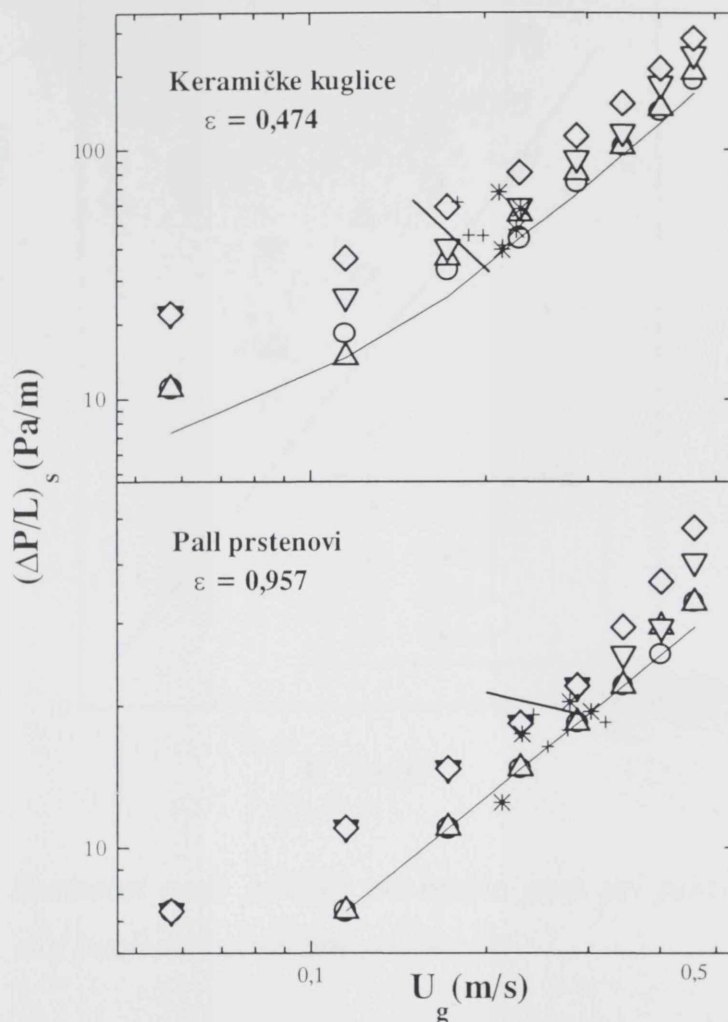


Slika 3.1.10. Zavisnost pada pritiska od brzine gasa pri proticanju peska. Simboli: S (kg/m³): ○ - 0,16; △ - 0,5; ▽ - 1,2; ◇ - 2,5; * - tačka nakupljanja odredjena regresijom; + - izračunate vrednosti na osnovu jed 3.1.12.; _____ pad pritiska kroz nasut sloj ($S = 0$).



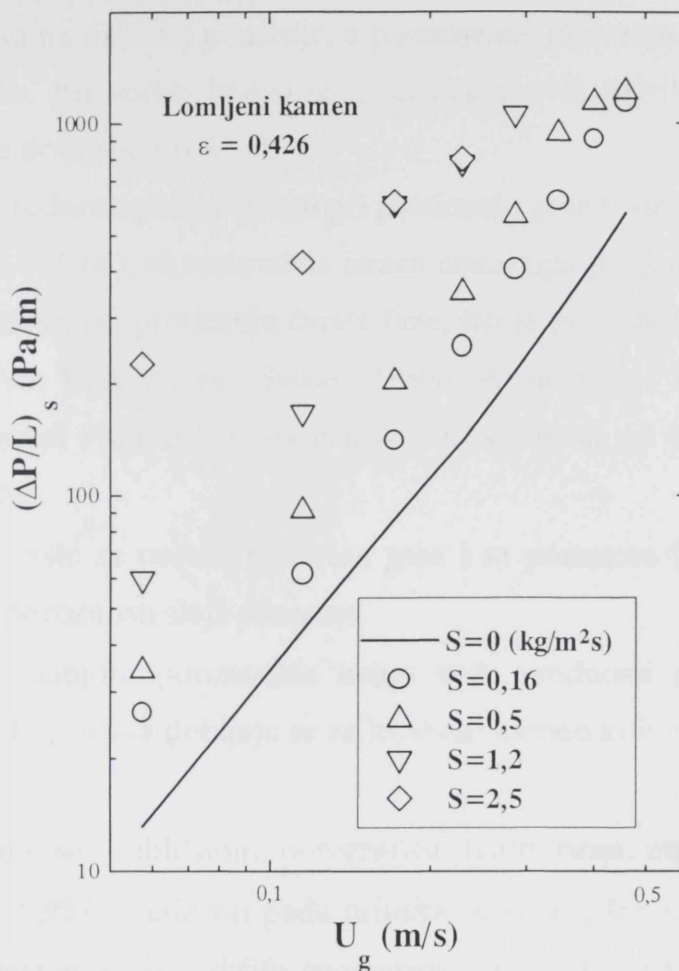
Slika 3.1.11. Zavisnost pada pritiska od brzine gasa pri proticanju propanta.

Simboli : S (kg/m²): o - 0,14; Δ - 0,49; ∇ - 1,2; \diamond - 2,46; * - tačka nakupljanja određena regresijom, + - izračunate vrednosti na osnovu jed. 3.1.12.; _____ pad pritiska kroz nasut sloj ($S = 0$).



Slika 3.1.12. Zavisnost pada pritiska od brzine gasa pri proticanju propanta.

Simboli : S (kg/m³): \circ - 0,14; Δ - 0,49; ∇ - 1,2; \diamond - 2,46; * - tačka nakupljanja određena regresijom; + - izračunate vrednosti na osnovu jed. 3.1.12.; _____ pad pritiska kroz nasut sloj ($S = 0$).



Slika 3.1.13. Zavisnost pada pritiska od brzine gasa pri proticanju peska kroz sloj punjenja nepravilne geometrije.

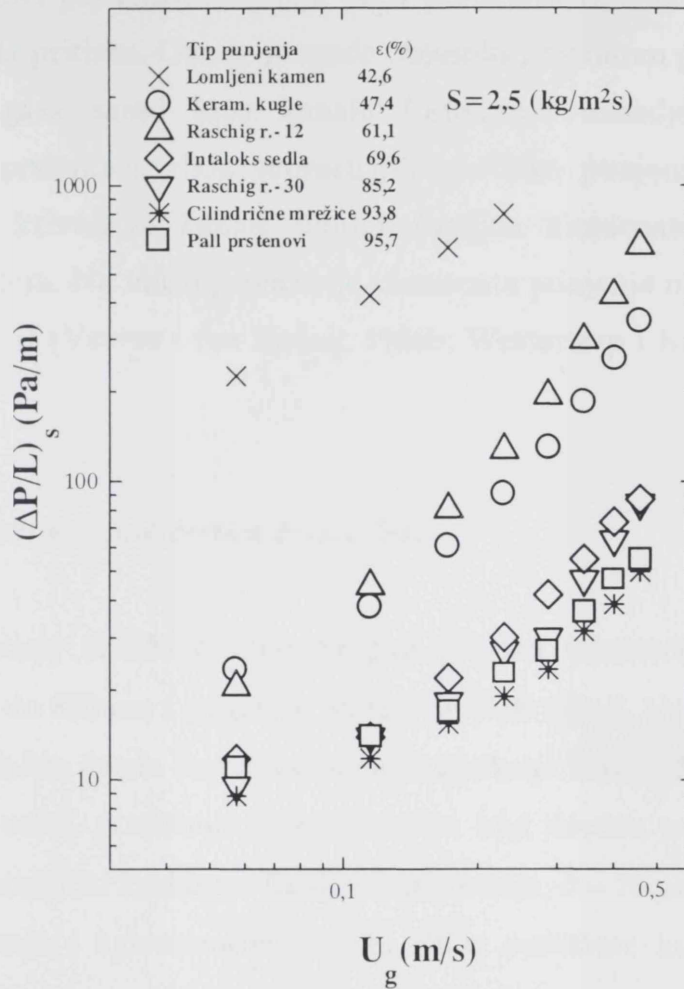
3.1.2.2. Uticaj tipa punjenja

Ispitujući različite tipove punjenja više istraživača (Roes i van Swaaij, 1979a; Verver i van Swaaij, 1986a; Westerterp i Kuczynski, 1987a; Kiel, 1990) ukazalo je da tip punjenja ima izrazit uticaj na pad pritiska. Verver i van Swaaij (1986a) su kod punjenja u obliku unakrsno poredjanih cevi trougaonog profila dobili 2 do 4 puta veći pad pritiska u odnosu na punjenja takodje od unakrsnih cevi ali kvadratnog profila. Ovu razliku objasnili su kao posledicu gušće strukture trougaonog punjenja koja uslovljava veću turbulenciju gasa, što dovodi do većeg trenja izmedju gasa i čvrstog pa time i do većeg pada pritiska. Westerterp i Kuczynski (1987a) su uočili da Kerapak ima mnogo manji pad pritiska od Raschigovih prstenova i mešanog punjenja. Pri istoj brzini gasa i istom fluksu čvrste faze Raschigovi prstenovi imali su neznatno manji pad

pritiska u odnosu na mešano punjenje, a povećavanjem brzine gasa nagib krivih pada pritiska je rastao. Pri većim brzinama gasa nagib ovih krivih bio je mnogo veći u odnosu na prave dobijene pri $S = 0$.

Dobijene vrednosti pada pritiska pri proticanju gasa kroz sloj punjenja ispitivanih u ovom radu (*Sl. 3.1.14.*), ukazale su na izrazit uticaj tipa punjenja, odnosno poroznosti sloja na pad pritiska pri proticanju čvrste faze, što je potvrđeno i u literaturi (Roes i van Swaaij, 1979a; Verver i van Swaaij, 1986a; Westerterp i Kuczynski, 1987a; Kiel, 1990). Upoređujući vrednosti pada pritiska u zavisnosti od brzine gasa (*Sl. 3.1.14.*) uočeno je sledeće:

- ◆ Pad pritiska raste sa porastom brzine gasa i sa porastom fluksa čvrstog, kao i sa smanjenjem poroznosti sloja punjenja.
- ◆ Punjenja sa manjom poroznošću imaju veće vrednosti pada pritiska. Najveće vrednosti pada pritiska dobijaju se za lomljeni kamen koji ima najmanju poroznost sloja.
- ◆ Kod punjenja sa približnom poroznošću (cilindrične mrežice, $\varepsilon = 0,938$, i Pall prstenovi $\varepsilon = 0,957$) vrednosti pada pritiska su slične, što se i moglo očekivati, jer ova dva punjenja, iako različite geometrije, imaju sličnu poroznost. Sa porastom fluksa peska i brzine gasa smanjuje se razlika u vrednostima pada pritiska.
- ◆ Vrednosti pada pritiska opadaju sa porastom poroznosti sloja punjenja i taj pad je veći pri većim brzinama gasa tako da se pri najvećoj brzini gasa dobijaju i do 7 puta manje vrednosti pada pritiska kod punjenja veće poroznosti (Raschigovi prstenovi - 30, Pall prstenovi i cilindrične mrežice). Ovu razliku moguće je objasniti na osnovu promene režima proticanja kroz kolonu, jer se kod punjenja manje poroznosti prelazak iz zone pre nakupljanja u zonu nakupljanja javlja pri manjim brzinama gasa.
- ◆ I pri najvećem fluksu čvrste faze, kao i kod suvog punjenja, pad pritiska ostvaren kroz sloj Raschigovih prstenova-30 je približan padu pritiska kroz sloj Intaloks sedala, iako je poroznost Raschig-30 veća. S obzirom da se i u trofaznom sistemu (gas-čvrsto-punjenje) ne dobija odstupanje vrednosti pada pritiska (kao i kod dvofaznog sistema gas-punjenje), verovatno na pad pritiska dominirajući uticaj imaju oštre ivice kod oba tipa punjenja na šta su ukazali i drugi autori (Verver i van Swaaij, 1986a; Kiel, 1990).



Slika 3.1.14. Zavisnost pada pritiska od brzine gasa i vrste punjenja pri najvećem fluksu čvrste faze (peska, 90-630 μm).

- ◆ Uticaj geometrije elemenata punjenja na pad pritiska uočljiviji je kod punjenja manje poroznosti i to keramičkih kuglica u poredjenju sa lomljenim kamenom, Raschigovim prstenovima-12 i Intaloks sedlima.
- ◆ Lomljeni kamen ($\varepsilon = 0,426$) i keramičke kuglice ($\varepsilon = 0,474$), iako slične poroznosti, imaju veoma različite vrednosti pada pritiska. Pri padu pritiska kroz nasut sloj (Sl. 3.1.2.), dobijene vrednosti $(\Delta P/L)_0$ za lomljeni kamen su približno 4 puta veće od vrednosti dobijenih za kuglice dok je pri maksimalnom fluksu peska, pad pritiska kod lomljenog kamena za oko 10 puta veći od pada pritiska kod keramičkih kuglica.

- ♦ Interesantna je analiza i podataka za keramičke kuglice i Raschigove prstenove-12. Iako Raschigovi prstenovi-12 imaju veću poroznost ($\epsilon = 0,611$) uslovljavaju veće vrednosti pada pritiska. Ovo je moguće objasniti pravilnom geometrijom kuglica i proticanjem gasa samo kroz kanale formiranih između kuglica, dok kod Raschigovih prstenova, zbog geometrijskog oblika punjenja i oštih ivica, gas prolazi kroz krivudave kanale unutar šupljina elemenata punjenja i kanale formirane u sloju. Na uticaj geometrije elemenata punjenja na pad pritiska ukazali su i drugi autori (Verver i van Swaaij, 1986b; Westerterp i Kuczynski, 1987a; Kiel, 1990).

3.1.2.3. Uticaj veličine čestica čvrste faze

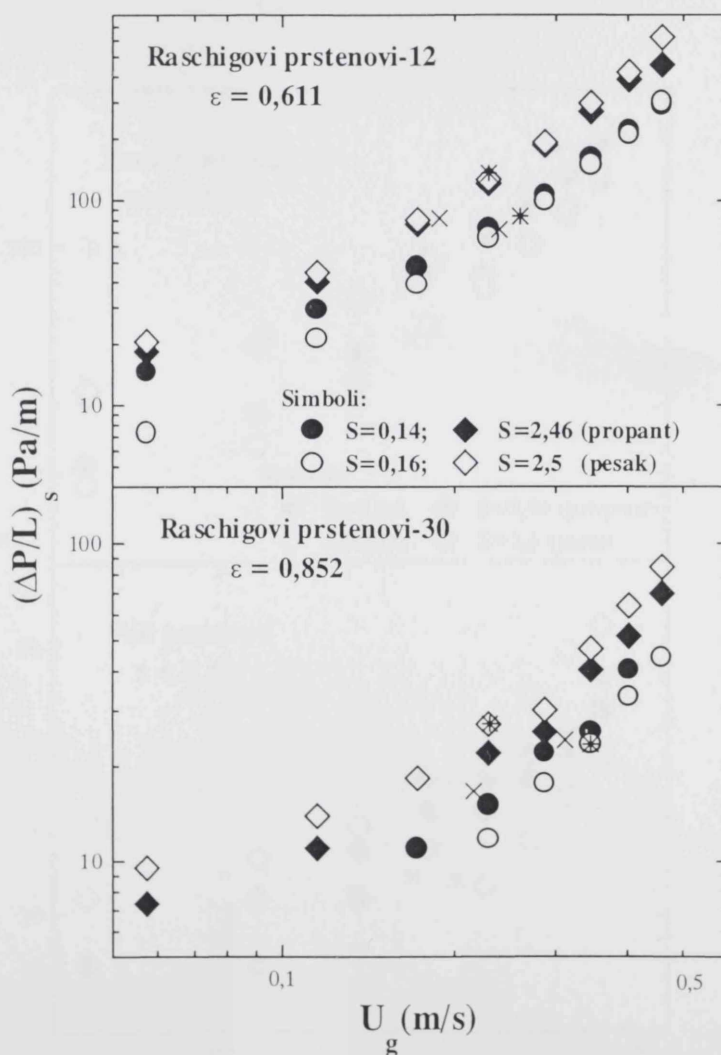
Ispitujući uticaj čestica čvrstog na pad pritiska koristeći čestice sa srednjim prečnikom od 70 do 880 μm i gustinom od 800 do 7800 kg/m^3 , Verver (1984) je ukazao da sa porastom fluksa čvrste faze raste uticaj interakcije čestica-čestica. Kao posledica ove interakcije, usled povećanja mlaza čestica, kod čestica sa manjim prečnikom (katalizator za katalitički kreking u fluidizovanom sloju, $d = 70 \mu\text{m}$ i pesak $d = 255 \mu\text{m}$) dolazi do gomilanja i aglomeracije čestica. Zbog povećane koncentracije čestica i aglomeracije, dobijaju se veće vrednosti pada pritiska u odnosu na veličine koje bi se dobile pri potpunoj suspenziji čestica. Kod većih čestica (od 310 do 880 μm) uticaj koncentracije čestica i aglomeracije bio je mnogo manje izražen.

Povećanje uticaja aglomeracije čestica sa smanjenjem prečnika čestica i gustine takodje su uočili Kiel i sar. (1993).

U ovom radu uticaj veličine čestica čvrste faze na pad pritiska posmatran je za punjenja pravilne geometrije (Raschigove prstenove-12, Raschigove prstenove-30, keramičke kuglice i Pall prstenove) pri najmanjem i najvećem fluksu čvrstog: peska granulometrijskog sastava od 90 do 630 μm (srednji prečnik čestica $d = 253,5 \mu\text{m}$), uske frakcije peska veličine čestica od 125 do 200 μm ($d = 167,2 \mu\text{m}$) i od 200 do 315 μm ($d = 257,5 \mu\text{m}$), propanta granulometrijskog sastava od 250 do 1000 μm ($d = 642,2 \mu\text{m}$) i frakcije mlevenog kamena 710-1000 μm ($d = 855 \mu\text{m}$). Razlike u gustinama ovih čestica bile su zanemarljive (vidi *Tabelu 2.2.*) tako da je posmatran samo uticaj veličine čestica na pad pritiska. Na *Sl. 3.1.15. i 3.1.16.* prikazan je pad pritiska pri proticanju

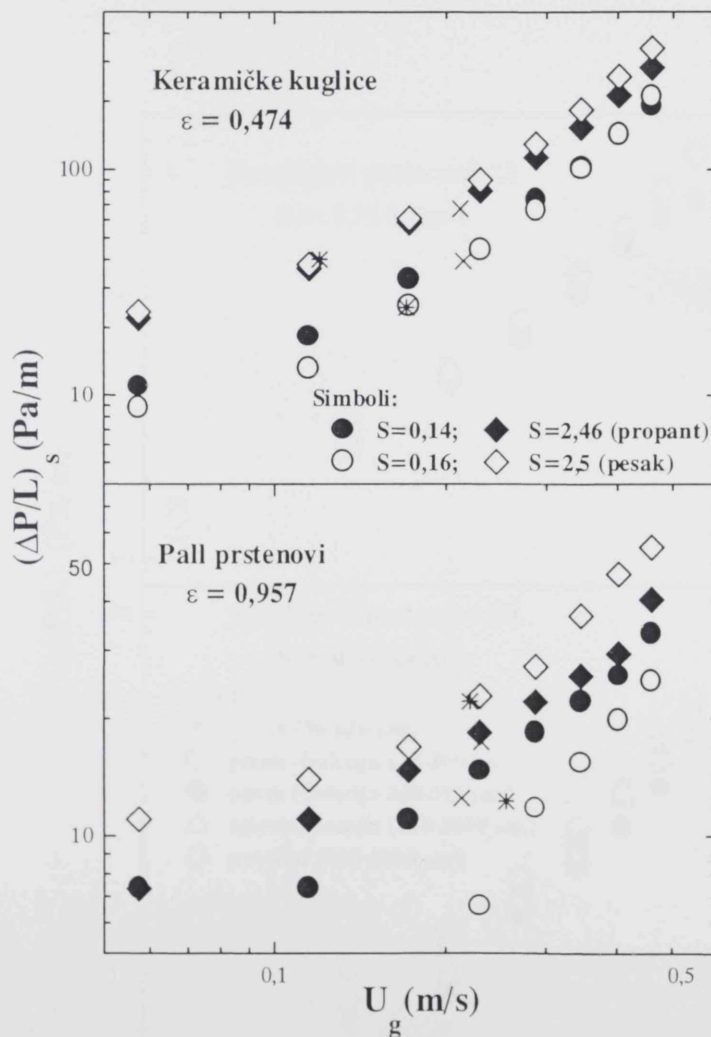
peska i propanta, kao frakcija sa širim granulometrijskim sastavom i na osnovu dobijenih rezultata vidljivo je sledeće:

- ◆ Pri minimalnom fluksu čvrste faze i malim brzinama gasa, čestice propanta uzrokuju veći pad pritiska u odnosu na proticanje peska. Veće razlike u dobijenim vrednostima pritiska, pri istoj brzini gasa, dobijaju se kod punjenja sa većom poroznošću (Raschigovi prstenovi-30, Pall prstenovi).



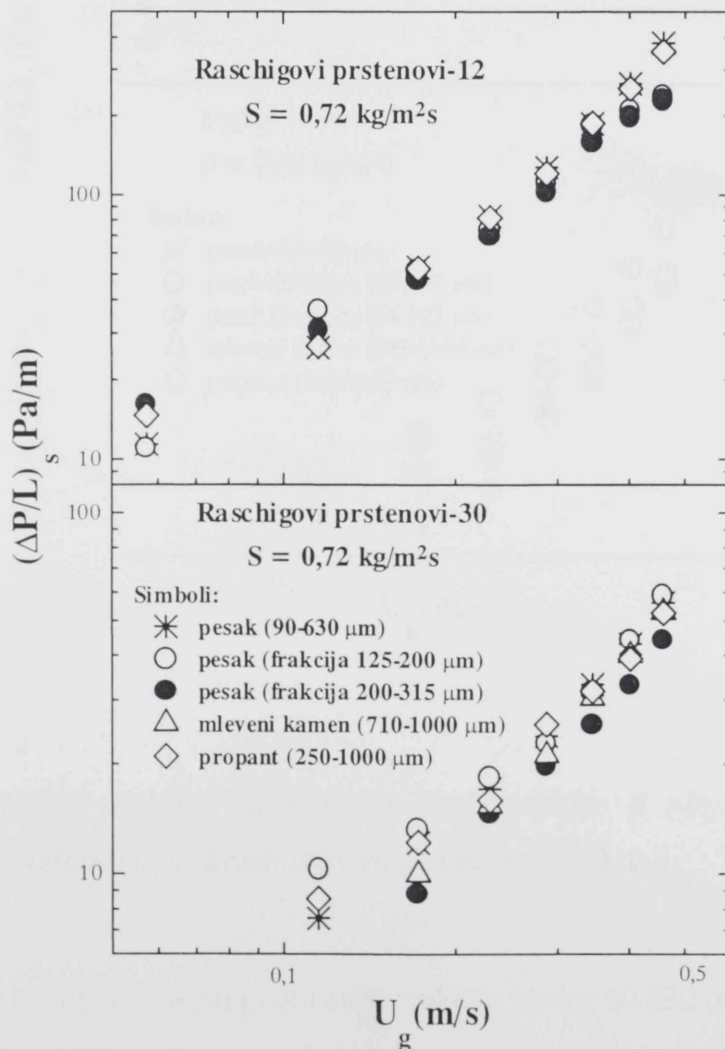
Slika 3.1.15. Uticaj veličine čestica čvrste faze na pad pritiska pri najmanjem i najvećem fluksu peska ($90-630 \mu\text{m}$) i propanta. Eksperimentalne vrednosti tačke nakupljanja; pesak (*); propant (x).

- ◆ Medjutim, sa povećanjem brzine gasa razlike u dobijenim vrednostima pada pritiska se smanjuju, a kod Raschigovih prstenova-12 i keramičkih kuglica dobijaju se neznatna odstupanja.
- ◆ Pri najvećem fluksu čvrste faze, kod sva četiri punjenja, veći pad pritiska dobija se pri proticanju peska u odnosu na propant.
- ◆ Pri proticanju propanta tačka nakupljanja postiže se pri manjim brzinama gasa u odnosu na pesak.
- ◆ Ni jedna vrsta čestica nije dovela do plavljenja kolone



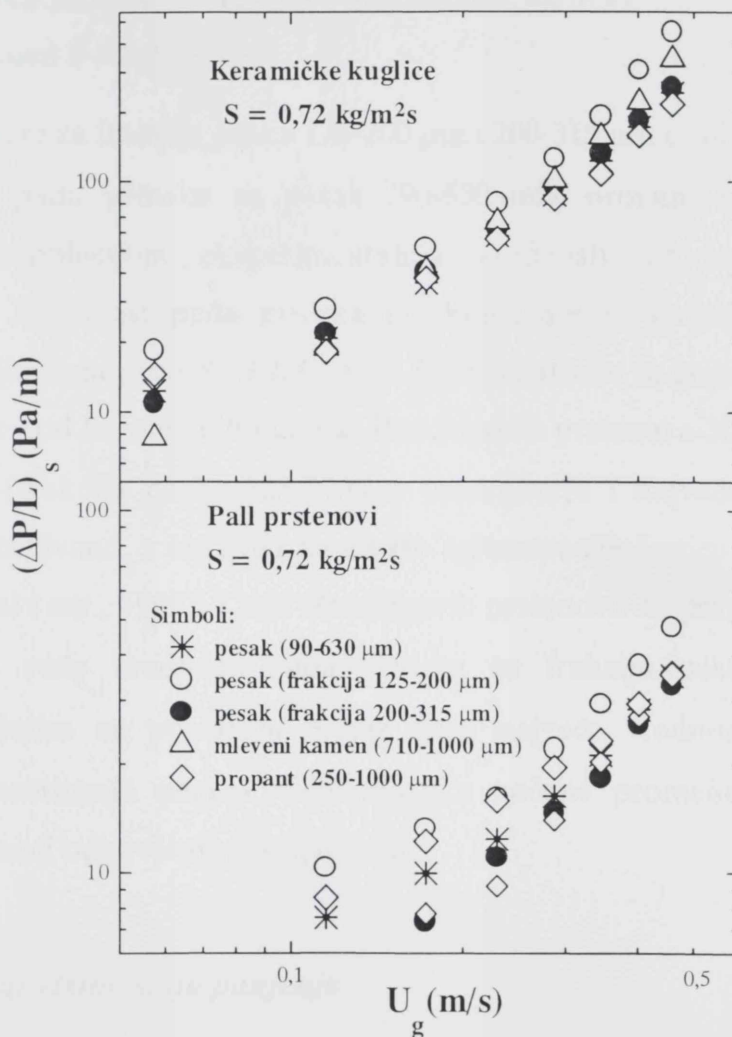
Slika 3.1.16. Uticaj veličine čestica čvrste faze na pad pritiska pri najmanjem i najvećem fluksu peska ($90-630 \mu\text{m}$) i propanta. Eksperimentalne vrednosti tačke nakupljanja; pesak (*); propant (x).

Različite vrednosti pada pritiska pri proticanju peska i propanta moguće je objasniti uticajem aglomeracije čestica koja se javlja kod čestica manjeg prečnika (Verver i van Swaaij, 1986a). Pri najmanjem fluksu čestica i malim brzinama gasa, usled odsustva efekta aglomeracije čestica peska, čestice propanta (čestice većeg srednjeg prečnika) dovode do većeg pada pritiska. Tek pri većim brzinama gasa dolazi do aglomeracije čestica peska tako da se vrednosti pada pritiska pri proticanju peska približavaju vrednostima pada pritiska pri proticanju propanta. Medjutim, pri najvećem fluksu čestica već pri malim brzinama gasa dolazi do aglomeracije čestica peska tako da se u celom opsegu brzina gasa dobijaju veće vrednosti pada pritiska pri proticanju peska kod svih punjenja.



Slika 3.1.17. Uticaj veličine čestica na pad pritiska za dva tipa Raschigovih prstenova pri konstantnom fluksu čvrstog.

Uticao veličine čestica na pad pritiska pri fluksu $S = 0,72 \text{ kg/m}^2\text{s}$, prikazan je na Sl. 3.1.17. i 3.1.18.



Slika 3.1.18. Uticaj veličine čestica na pad pritiska u sloju kuglica i Pall prstenova pri konstantnom fluksu čvrste faze.

Posmatran je pad pritiska pri proticanju frakcija peska 90-630 μm ($d = 253,5 \mu\text{m}$), uske frakcije peska veličine čestica od 125 do 200 μm ($d = 167,2 \mu\text{m}$) i od 200 do 315 μm ($d = 257,5 \mu\text{m}$), propanta 250-1000 μm ($d = 642,2 \mu\text{m}$), i frakcije mlevenog kamena 710-1000 μm ($d = 855 \mu\text{m}$). Uticaj veličine na pad pritiska posmatran je pri

jednom otvoru blende ($\phi = 6 \text{ mm}$) za sve ispitivane faze. Zbog različitog granulometrijskog sastava dobijeni su i različiti fluksevi za:

- pesak (90-630 μm) $S = 0,5 \text{ kg/m}^2\text{s}$,
- propant $S = 0,49 \text{ kg/m}^2\text{s}$,
- frakcije peska 125-200 μm i 200-315 μm $S = 0,72 \text{ kg/m}^2\text{s}$ i
- mleveni kamen $S = 0,39 \text{ kg/m}^2\text{s}$.

S obzirom da je za frakcije peska 125-200 μm i 200-315 μm dobijena ista vrednost fluksa, vrednosti pada pritiska za pesak (90-630 μm), propant i mleveni kamen dobijene su interpolacijom eksperimentalnih vrednosti. za isti fluks čvrstog ($S = 0,72 \text{ kg/m}^2\text{s}$). Zavisnost pada pritiska pri konstantnom fluksu svih ispitivanih veličina čestica prikazana je na *Sl. 3.1.17. i 3.1.18.* Posmatrano za pojedinačna punjenja vidljivo je sledeće: kod keramičkih kuglica, Raschigovih prstenova-30 i Pall prstenova, najmanje čestice (frakcija peska 125-200 μm uslovljavaju i najveće vrednosti pada pritiska što je i očekivano, s obzirom na efekte aglomeracije čestica manjeg prečnika (Verver, 1984; Kiel i sar., 1993). I kod Raschigovih prstenova-12 pri manjim brzinama gasa dobijaju se veće vrednosti pada pritiska za frakciju peska 125-200 μm i 200-315 μm , međutim sa porastom brzine gasa najveće vrednosti pada pritiska dobijaju se pri proticanju peska 90-630 μm . Za uočene promene kod ovog tipa punjenja teško je naći odgovarajuće objašnjenje.

3.1.2.4. Uticaj visine sloja punjenja

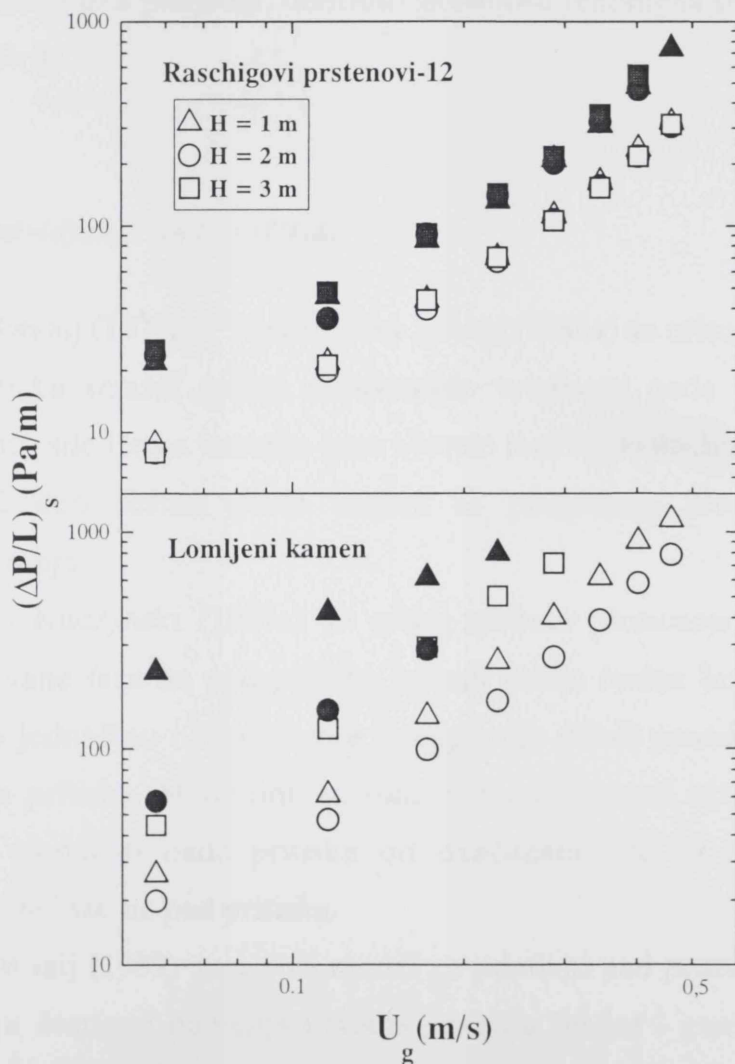
U literaturi nema podataka o uticaju visine sloja na pad pritiska bez protoka čvrstog, niti je posmatran ovaj uticaj pri proticanju čvrste faze, pa izvedena zapažanja do kojih se došlo u ovom radu predstavljaju doprinos saznanjima o uticaju ovog faktora na fluidodinamičke karakteristike sistema gas-čvrsto-punjenje.

Zaključci do kojih se došlo u vezi sa uticajem visine punjenja na pad pritiska kod suvog punjenja, odnosno bez proticanja čvrste faze, potvrđeni su i pri proticanju peska kroz sloj Raschigovih prstenova-12 i lomljenog kamena. Uticaj visine na pad pritiska prikazan je na *Sl. 3.1.19.* Dominirajući faktor na pad pritiska bila je poroznost sloja koja se smanjivala sa povećavanjem visine sloja, što je dovodilo do porasta pritiska.

Pri minimalnom fluksu čvrstog kod Raschigovih prstenova dobija se neznatna

razlika izmedju eksperimentalnih i izračunatih vrednosti poroznosti, posmatrano po visini sloja, pa se ne uočavaju ni veća odstupanja izmedju izmerenih vrednosti pada pritiska.

Pri najvećem fluksu ($S = 2,5 \text{ kg/m}^2\text{s}$) dolazi do gomilanja čestica tako da porastom visine raste i pad pritiska, a pri najvećoj brzini gasa ($U_g = 0,459 \text{ m/s}$), za visinu od 2 i 3 m dolazi do plavljenja kolone.



Slika 3.1.19. Pad pritiska u zavisnosti od visine sloja pri minimalnom ($S = 0,16 \text{ kg/m}^2\text{s}$ - svetli simboli) i maksimalnom fluksu peska ($90 - 630 \mu\text{m}$) ($S = 2,5$ - popunjeni simboli).

Kod lomljenog kamena pri minimalnom fluksu dobijene su manje vrednosti pritiska za visinu od 2 m zbog veće poroznosti i eksperimentalne i izračunate. Sa

porastom visine sloja, zbog nepravilnog oblika i oštih ivica, dolazi do gomilanja čestica tako da pri visini od 3 m dolazi do plavljenja kolone pri brzini gasa ($U_g = 0,287$ m/s) manjoj u odnosu na Raschigove prstenove. Pri maksimalnom fluksu efekti plavljenja javljaju se još pri manjim visinama i manjim brzinama gasa i to za $H = 1$ m pri $U_g = 0,229$ m/s, za $H = 2$ m pri $U_g = 0,172$ m/s a za $H = 3$ m do plavljenja kolone došlo je već pri minimalnoj brzini gasa, $U_g = 0,0574$ m/s. Pojava efekta plavljenja kod ovog tipa punjenja je posledica ne samo male poroznosti sloja već i uticaja oštih ivica i oblika punjenja, odnosno složenosti fenomena proticanja kroz sloj nepravilne geometrije.

3.1.2.5. Predviđjanje pada pritiska

Roes i van Swaaij (1979a) i Verver i van Swaaij (1986a) su uticaj proticanja čvrste faze na pad pritiska izrazili preko redukovane vrednosti pada pritiska, koju su definisali kao odnos sile trenja izmedju gasa i čvrste faze i gravitacione sile čvrste faze, pošto se najveći deo čestica posle sudara sa punjenjem kreće pod uticajem gravitacionog ubrzanja.

Westerterp i Kuczynski (1987a) su uticaj efekata proticanja čestica u obliku mlaza i suspendovane faze na pad pritiska izrazili preko realne brzine gasa koju su uveli u Ergunovu jednačinu i za zonu pre nakupljanja dobili pouzdanu korelaciju za predviđjanje pada pritiska. Medjutim, za zonu nakupljanja, ovi autori su dobili veće eksperimentalne vrednosti pada pritiska od izračunatih što su objasnili uticajem suspendovane čvrste faze na pad pritiska.

Kiel i van Swaaij (1989) su u svoj model za relativni pad pritiska, kao posledice sile trenja izmedju čestica i punjenja i trenja izmedju čestica i gasne faze, uveli dva empirijska parametra: brzinu čestica u momentu posle sudara sa elementom punjenja i efektivnu brzinu gasa. Ovim parametrima su obuhvatili uticaj aksijalnog profila poroznosti sloja punjenja, radijalnu nehomogenost u proticanju gasa i čvrste faze i koncentraciju čestica čvrste faze, medjutim njihov model je ipak specifičan i složen.

Predloženi modeli za predviđjanje pada pritiska pri protivstrujnom proticanju gasa i čvrste faze kroz nasut sloj, do sada dati u literaturi, prikazani su u *Tabeli 3.1.4.*

Tabela 3.1.4. Dosadašnji modeli za predviđanje pada pritiska u kontaktorima gas-čvrsto-punjenje.

$$\text{Roes i van Swaaij (1979a)} \quad \gamma = S^{-0,5} \left[1,15 (U_g / u_{fl})^{1,2} + 0,25 \right]$$

gde je u_{fl} brzina gasa pri plavljenju

$$\text{Verver i van Swaaij (1986a)} \quad \gamma = \frac{C_D}{C_{D,t}} \frac{\bar{u}_r^2}{u_t^2}$$

gde je: C_D i $C_{D,t}$ koeficijent trenja koji je funkcija Reynoldosovog broja (jed. 3.1.3);
indeks t – se odnosi na krajnje uslove

$u_r = u_p - u_g$; brzina klizanja čestica, m/s

u_t - krajnja brzina kretanja jedne čestice, m/s

Westerterp i Kuczynski (1987)

$$\left(\frac{\Delta P}{L} \right)_o \frac{d_e}{\rho_g \cdot U_g^2} \cdot \frac{\varepsilon^3}{(1-\varepsilon)} = K_L \left(\frac{1-\varepsilon}{Re} \right) + K_t$$

$$u_\beta = \frac{\frac{G}{\rho_g} + \frac{S}{\rho} \cdot \frac{\varepsilon_{g,tr}}{1-\varepsilon_{g,tr}}}{\left(\varepsilon - \beta_s \frac{\rho}{\rho_{fb}} - \frac{S}{\rho u_p^o (1-\varepsilon_{g,tr})} \right)}$$

gde je: u_β - realna brzina gasa, m/s

$\varepsilon_{g,tr}$ - udeo praznina u mlazu čestica, konstantna veličina koja zavisi od karakteristika sistema (punjenja i čestica koje protiču u vidu mlaza).
Može se odrediti na osnovu eksperimentalnih podataka za pad pritiska.

ρ_{fb} - nasipna gustina čvrste faze, kg/m^3

u_p^o - brzina čestica u zoni pre nakupljanja, m/s

Kiel i van Swaaij (1989)

$$\gamma = 1 - \frac{1}{g t_{Lv}} (u_{sLv} - u_{so})$$

gde je: u_{sLv} - brzina čestica neposredno pre sudara sa elementom punjenja, m/s

u_{so} - brzina čestica u momentu neposredno posle sudara sa elementom punjenja, m/s

t_{Lv} - srednje vreme boravka čestica u jediničnom sloju punjenja

Prikazane korelacije pored poznatih veličina ispitivanog sistema (poroznost sloja, ε , visina sloja, L , gustina čvrste faze, ρ) zahtevaju poznavanje pada pritiska, ΔP_s , i statičkog sadržaja pokretne čvrste faze, β_s . Kod predloženih modela za predviđanje pada pritiska potrebno je ili koristiti eksperimentalne vrednosti ovih parametara, što povećava obim eksperimenata, ili jednačine za predviđanje ovih parametara čime model za pad pritiska postaje znatno složeniji.

U ovom radu u predloženim korelacionim jednačinama za predviđanje pada pritiska pri protivstrujnom proticanju gasa i čvrste faze kroz nepokretan sloj punjenja, obuhvaćeni su osnovni parametri koji utiču na pad pritiska: brzina gasa, fluks čvrste faze, veličina čestica čvrste faze, karakteristike punjenja (ekvivalentni prečnik i poroznost sloja) i prečnik kolone. Izvedene jednačine zasnivaju se na poredjenju naših i literaturnih podataka (Roes i van Swaaij, 1979a; Large i sar., 1981; Westerterp i Kuczynski, 1987a; vidi Tabelu 1.1.).

Pri izvodjenju jednačina za predviđanje pada pritiska korišćene su eksperimentalne vrednosti pada pritiska dobijene u sloju Raschigovih prstenova-12, Raschigovih prstenova-30, keramičkih kuglica, Pall prstenova, cilindričnih mrežica, Intaloks sedala i lomljenog kamena pri proticanju peska (frakcije 125-200 μm , 200-315 μm , i 90-630 μm), propanta sa česticama veličine 250-1000 μm i mlevenog kamena sa veličinom čestica 710-1000 μm . Izvedene jednačine odnose se na zonu pre nakupljanja i zonu nakupljanja zbog različitih režima proticanja čestica u ovim zonama. U zoni pre nakupljanja, pri malim brzinama gasa, čestice protiču u obliku mlaza i na povećanje pada pritiska utiče i porast brzine gasa i porast fluksa čvrstog. U zoni nakupljanja usled povećanja brzine gasa dolazi do fluidizacije čestica oko mlaza, odnosno deo čestica biva zahvaćen gasom i počinje da se kreće nezavisno od mlaza. U ovoj zoni pad pritiska je uglavnom uzrokovan suspendovanim česticama. Udeo suspendovanih čestica se povećava sa povećanjem brzine gasa pa i pad pritiska raste (Roes i van Swaaij 1979a). Na različite režime proticanja ukazuje i promena nagiba pravih koje se mogu provući kroz eksperimentalne tačke pada pritiska prikazanih u funkciji brzine gasa (*Sl. 3.1.8. - 3.1.12.*)

Za zonu pre nakupljanja na osnovu 175 eksperimentalnih podataka za pad pritiska dobijena je korelacija sledećeg oblika:

$$(\Delta P / L)_s = 1,24 K_w^{0,40} U_g^{0,86} S^{0,21} d^{-0,15} d_e^{-1,11} (1 - \varepsilon)^{0,91} \quad (3.1.7)$$

sa koeficijentom korelacije $R = 0,91$ i standardnom greškom eksponenata izmedju 5,1 i 36,0%. Veće greške dobijene su za eksponent uz član d_p od 33,2% i uz član K_w od 36,0%. Poredjenje eksperimentalnih i izračunatih vrednosti pada pritiska za zonu pre nakupljanja prikazano je na *Sl. 3.1.20*. Najveća odstupanja pokazuju Intaloks sedla pri proticanju peska, što se i moglo očekivati s obzirom na geometriju elemenata punjenja, odnosno generalni problem odredjivanja ekvivalentnog prečnika. Kod Intaloks sedala dobijena veća odstupanja su i posledica relativno malih vrednosti pada pritiska odnosno greške pri očitavanju ovih vrednosti zbog nepreciznosti mernog instrumenta. Veća odstupanja se dobijaju i pri proticanju mlevenog kamena kod kuglica i Pall prstenova.

Uticao brzine gasa, karakteristika punjenja i trenje izmedju gasa i zidova kolone obuhvaćen je faktorom zida, K_w (Mackowiak, 1991):

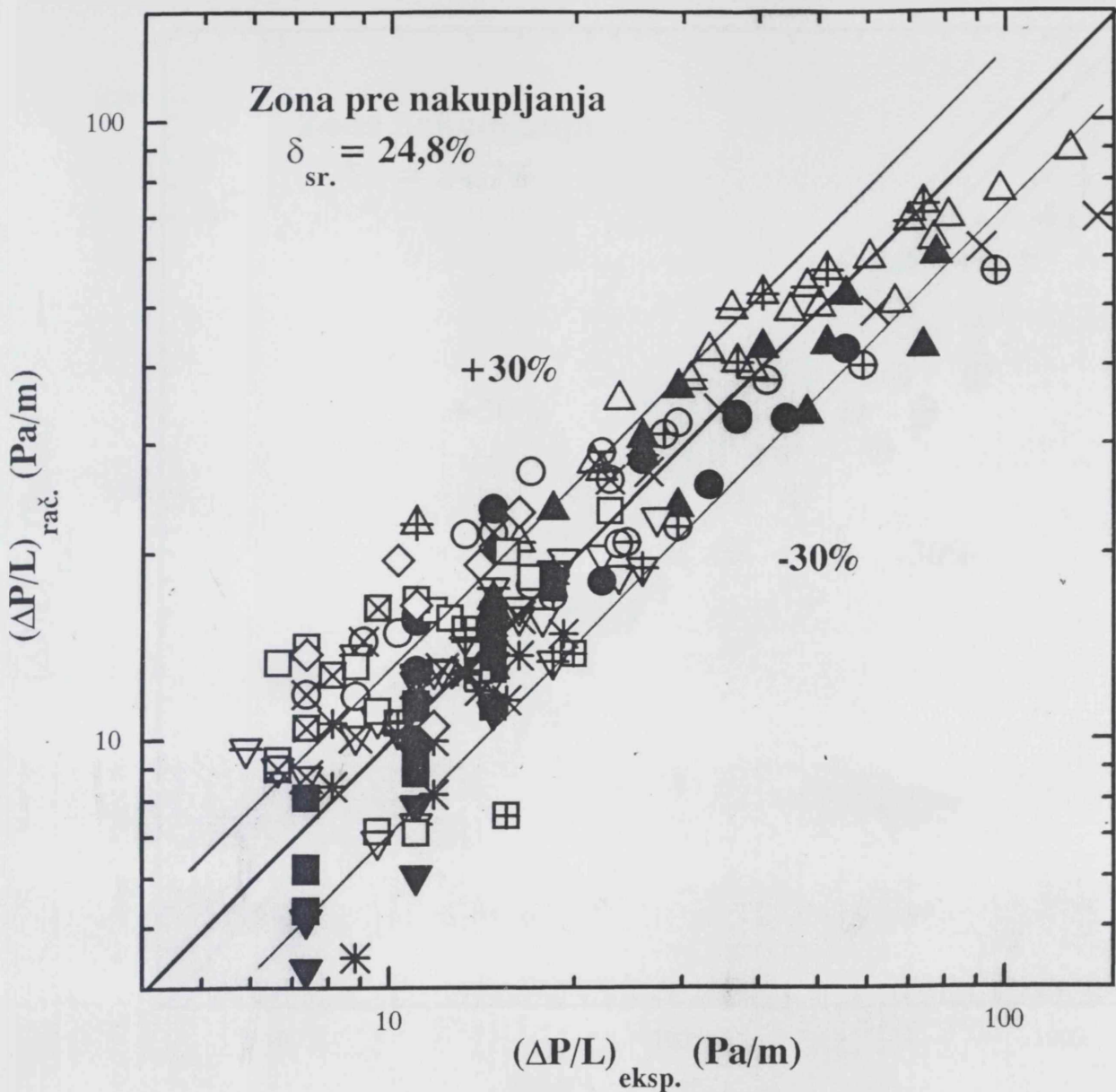
$$K_w = 1 + \frac{2}{3} \cdot \left(\frac{1}{1 - \varepsilon} \cdot \frac{d_e}{D} \right) \quad (3.1.8)$$

za koji je vrednost eksponenta dobijena na osnovu fitovanja eksperimentalnih rezultata dobijenih u ovom radu.

Izvedena korelaciona jednačina za zonu nakupljanja (korelisano 310 tačaka) je oblika:

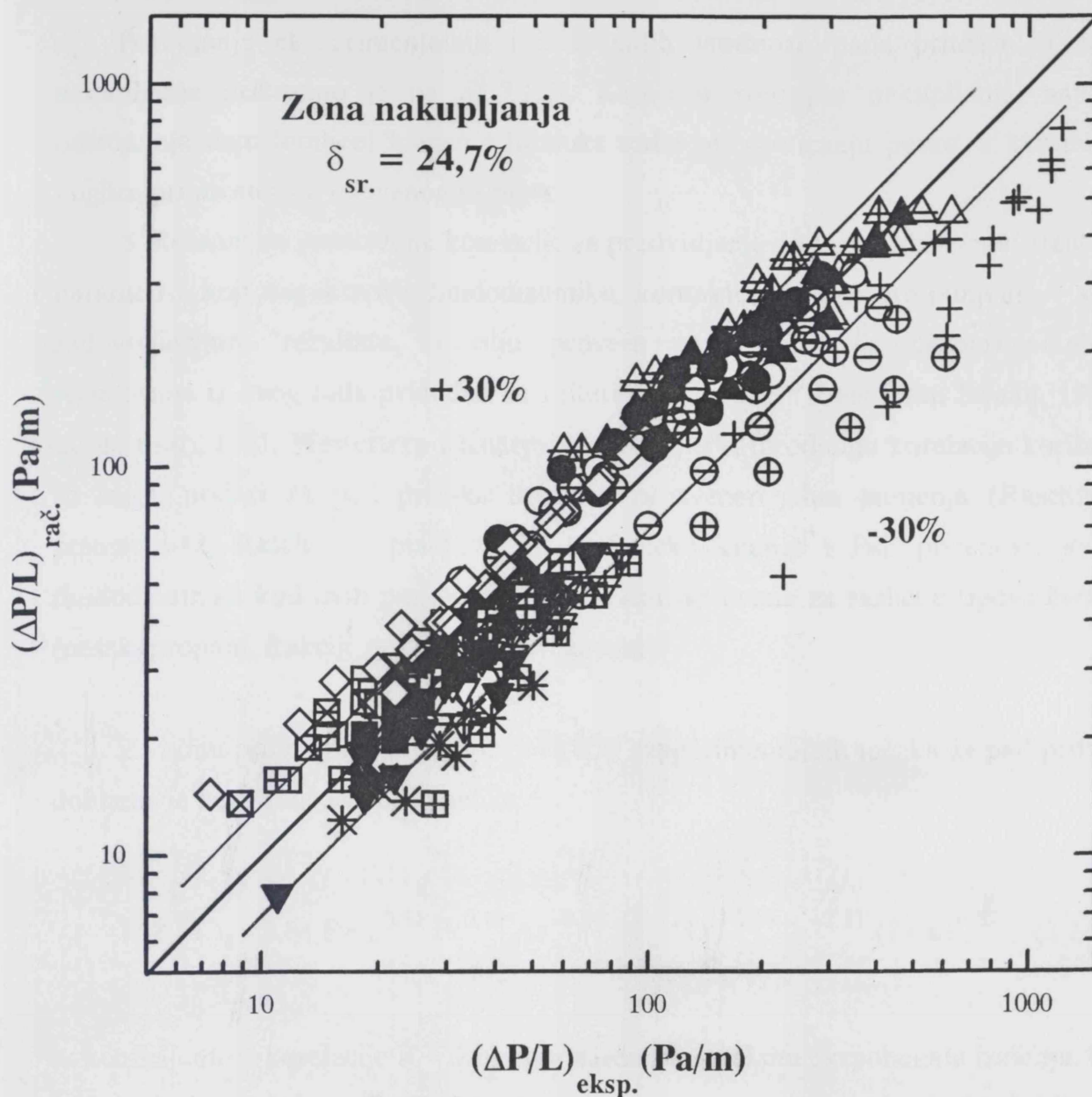
$$(\Delta P / L)_s = 0,95 K_w^{0,96} U_g^{1,46} S^{0,25} d^{-0,11} d_e^{-0,1,67} (1 - \varepsilon)^{1,48} \quad (3.1.9)$$

sa koeficijentom korelacije $R = 0,96$ i standardnom greškom eksponenata izmedju 2,8 i 31,6%. Ako se uporede eksponenti uz odgovarajuće članove u jed. 3.1.7. i 3.1.9., veće vrednosti eksponenata uz veličine K_w , U_g i d_e dobijene za zonu nakupljanja ukazuju da u ovoj zoni povećanje brzine gasa bitno utiče na povećanje pada pritiska, s obzirom na izmenjen režim proticanja čvrste faze (proticanje u obliku mlaza i suspendovane faze), a time i povećan uticaj tipa punjenja (na to ukazuju eksponenti članova K_w , odnosno

**Legenda:**

- | | |
|------------------------|---------------------------------------|
| △ Raschig-12(pesak) | △ Raschig-12(pesak 125-200 μm) |
| ▽ Raschig-30(pesak) | △ Raschig-12(pesak 200-315 μm) |
| ○ Ker.kuglice(pesak) | ▽ Raschig-30(pesak 125-200 μm) |
| □ Pall pr.(pesak) | ▽ Raschig-30(pesak 200-315 μm) |
| ▲ Raschig-12(propant) | ⊗ Raschig-30(mlev.kamen 710-1000 μm) |
| ▼ Raschig-30(propant) | ⊕ Ker.kuglice(pesak 125-200 μm) |
| ● Ker.kuglice(propant) | ⊖ Ker.kuglice(pesak 200-315 μm) |
| ■ Pall pr.(propant) | ⊗ Ker.kuglice(mlev.kamen 710-1000 μm) |
| * Cil. mrežice(pesak) | ⊞ Pall pr.(pesak 125-200 μm) |
| ◇ Intaloks(pesak) | ⊞ Pall pr.(pesak 200-315 μm) |
| × Lom.kamen(pesak) | ⊞ Pall pr.(mlev.kamen 710-1000 μm) |

Slika 3.1.20. Poredjenje eksperimentalnih i izračunatih vrednosti za pad pritiska na osnovu jednačine 3.1.7.

**Legenda:**

- | | |
|------------------------|---------------------------------------|
| △ Raschig-12(pesak) | ⊠ Raschig-12(pesak 125-200 μm) |
| ▽ Raschig-30(pesak) | ⊡ Raschig-12(pesak 200-315 μm) |
| ○ Ker.kuglice(pesak) | ⊣ Raschig-30(pesak 125-200 μm) |
| □ Pall pr.(pesak) | ⊤ Raschig-30(pesak 200-315 μm) |
| ▲ Raschig-12(propant) | ⊗ Raschig-30(mlev.kamen 710-1000 μm) |
| ▼ Raschig-30(propant) | ⊕ Ker.kuglice(pesak 125-200 μm) |
| ● Ker.kuglice(propant) | ⊖ Ker.kuglice(pesak 200-315 μm) |
| ■ Pall pr.(propant) | ⊗ Ker.kuglice(mlev.kamen 710-1000 μm) |
| * Cil. mrežice(pesak) | ⊞ Pall pr.(pesak 125-200 μm) |
| ◇ Intaloks(pesak) | ⊠ Pall pr.(pesak 200-315 μm) |
| + Lom.kamen(pesak) | ⊞ Pall pr.(mlev.kamen 710-1000 μm) |

Slika 3.1.21. Poređenje eksperimentalnih i izračunatih vrednosti za pad pritiska na osnovu jednačine 3.1.9.

d_e). Poredjenje eksperimentalnih i izračunatih vrednosti pada pritiska za zonu nakupljanja prikazano je na *Sl. 3.1.21*. Kao i u zoni pre nakupljanja, najveća odstupanja daju lomljeni kamen i Intaloks sedla pri proticanju peska, a keramičke kuglice pri proticanju mlevenog kamena.

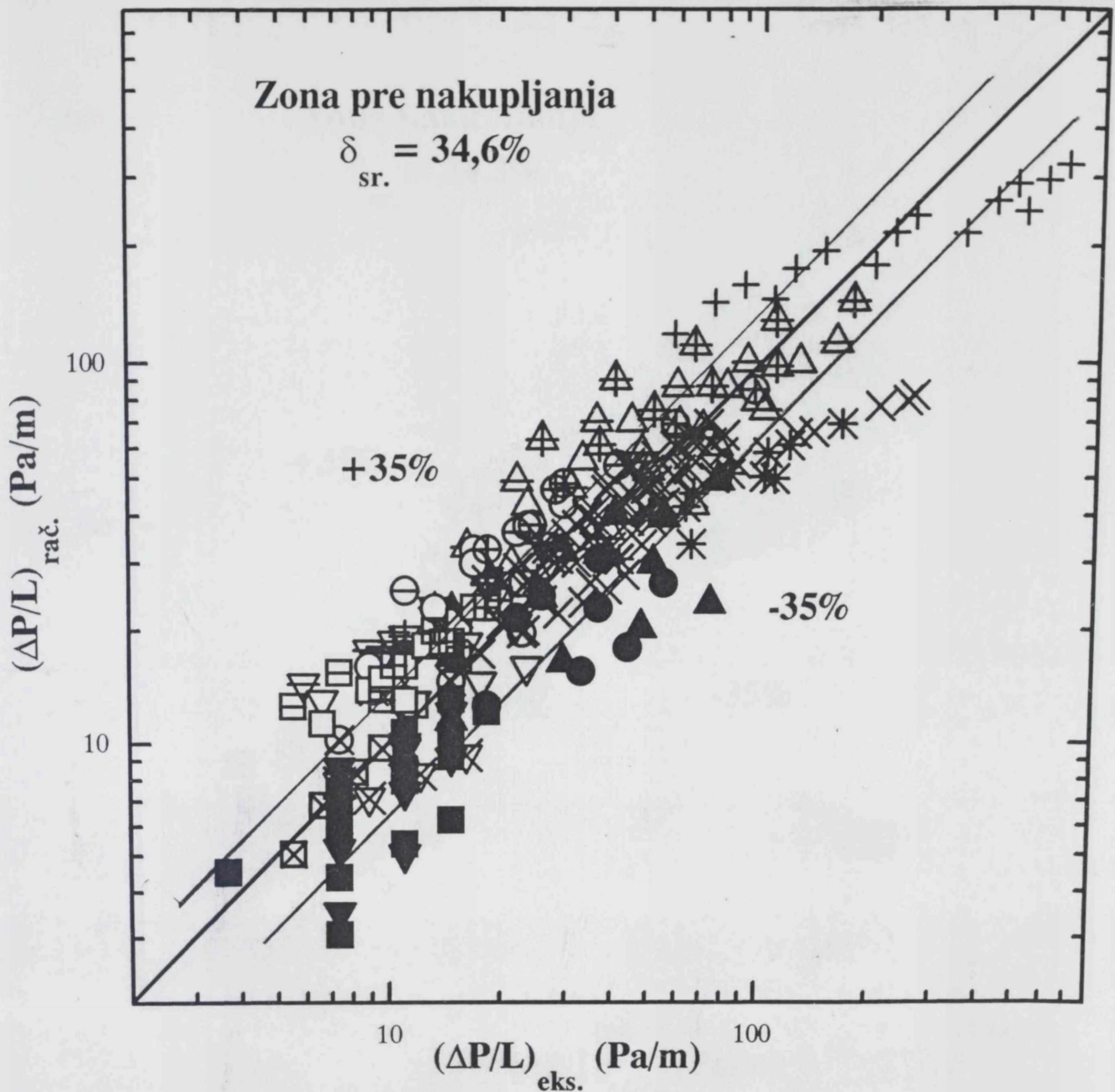
S obzirom da predložene korelacije za predviđanje pada pritiska obuhvataju sve parametre koji karakterišu fluidodinamiku kontaktora gas-čvrsto-punjenje i daju zadovoljavajuće rezultate, u cilju provere ovih korelacija eksperimentalnim rezultatima iz ovog rada pridodati su i literaturni podaci (Roes i van Swaaij, 1979a; Large i sar., 1981; Westerterp i Kuczynski, 1987a). Pri izvodjenju korelacija korišćeni su samo podaci za pad pritiska dobijeni za komercijalna punjenja (Raschigovi prstenovi-12, Raschigovi prstenovi-30, keramičke kuglice i Pall prstenovi) jer je fluidodinamika kod ovih punjenja u ovom radu ispitivana za različite tipove čvrstog (pesak, propant, frakcije peska i mleveni kamen).

Za zonu pre nakupljanja na osnovu 259 eksperimentalnih tačaka za pad pritiska dobijena je korelacija sledećeg oblika:

$$(\Delta P / L)_s = 3,84 \text{ Re}_w^{0,51} \text{ Fr}^{0,16} \text{ Ar}^{-0,19} (d_e / D)^{-1,16} \varepsilon^{-2,31} (1 - \varepsilon)^{0,57} \quad (3.1.10)$$

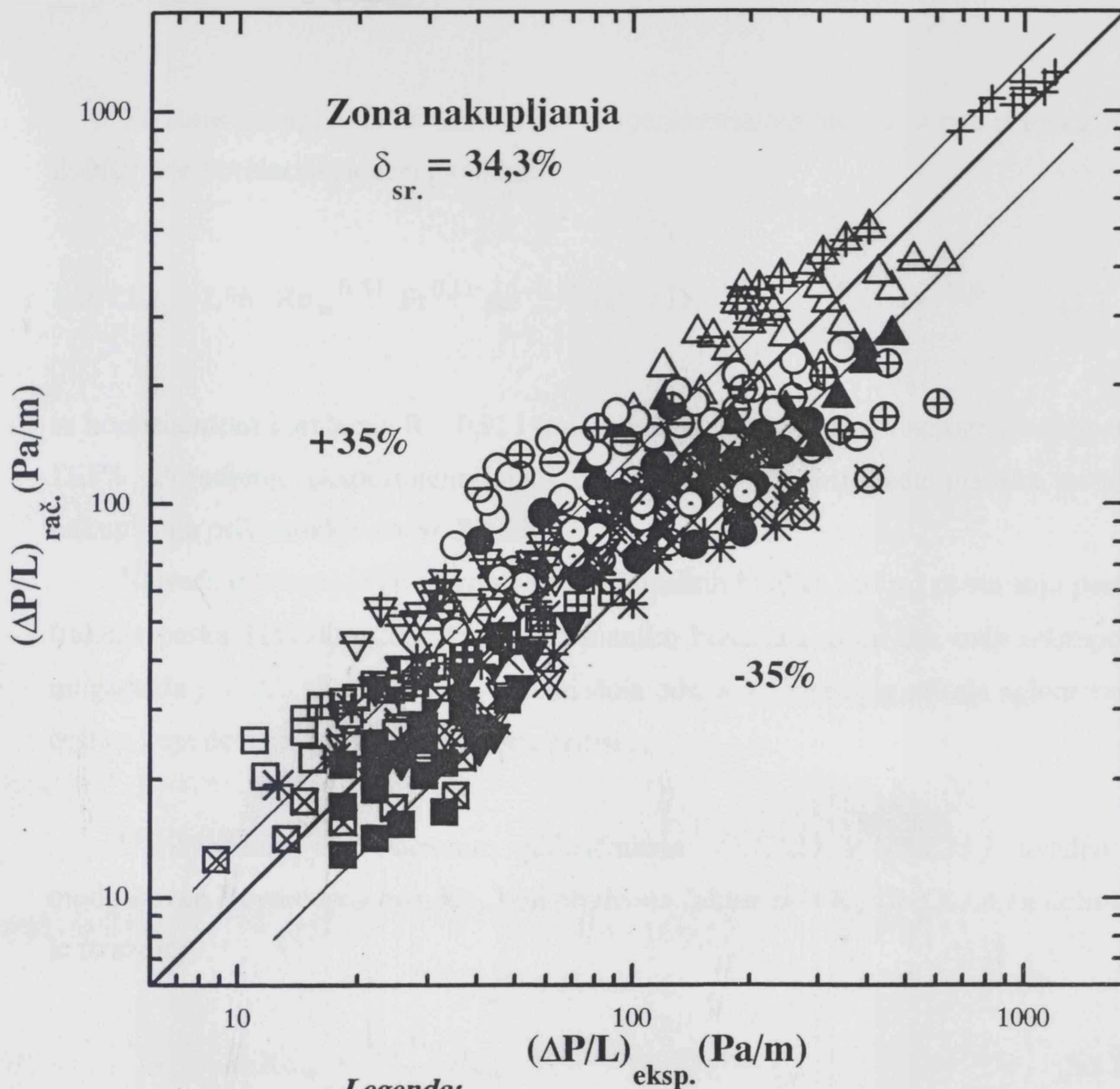
sa koeficijentom korelacije $R = 0,90$ i standardnom greškom eksponenata izmedju 4,5 i 14,2%. S obzirom da su literaturni eksperimentalni podaci za pad pritiska dobijeni u kolonama sa različitim prečnikom uticaj ovog faktora uveden je preko bezdimenzionog člana koji predstavlja odnos ekvivalentnog prečnika punjenja i prečnika kolone. Uticaj granulometrijskog sastava i gustine čvrste faze u korelaciji izražen je preko Arhimedovog broja. Poredjenje eksperimentalnih i izračunatih vrednosti pada pritiska za zonu pre nakupljanja prikazano je na *Sl. 3.1.22*. Najveća odstupanja od ispitivanih punjenja daju Pall prstenovi, a od literaturnih rezultati Largea i sar. (1981), koji su kao punjenje takodje koristili Pall prstenove. Na dobijene greške kod literaturnih podataka uticala je i greška pri očitavanju podataka sa odgovarajućih grafika.

Za zonu nakupljanja na osnovu 356 eksperimentalnih tačaka za pad pritiska

**Legenda:**

- | | |
|------------------------|-----------------------------------|
| △ Raschig-12(pesak) | ⊠ Raschig-12(pesak 125-200 μm) |
| ▲ Raschig-12(propant) | ⊡ Raschig-12(pesak 200-315 μm) |
| ▽ Raschig-30(pesak) | ⊣ Raschig-30(pesak 125-200) |
| ▼ Raschig-30(propant) | ⊤ Raschig-30(pesak 200-315) |
| ○ Ker.kuglice(pesak) | ⊗ Raschig-30(mlev.kam. 710-1000) |
| ● Ker.kuglice(propant) | ⊕ Ker.kuglice(pesak 125-200) |
| □ Pall(pesak) | ⊖ Ker.kuglice(pesak 200-315) |
| ■ Pall(propant) | ⊗ Ker.kuglice(mlev.kam. 710-1000) |
| ⊞ Pall(pesak 125-200) | ⊠ Pall(mlev.kam. 710-1000) |
| ⊠ Pall(pesak 200-315) | |
| × Roes-Raschig pr. | ✱ Westerterp-RR |
| × Roes-Pall pr. | + |
| × Roes-Cil.pr. | Large-Pall |

Slika 3.1.22. Poredjenje eksperimentalnih i izračunatih vrednosti za pad pritiska na osnovu jed. 3.1.10. za ispitivana punjenja u ovom radu i podatke iz literature (Tabela 1.1).

**Legenda:**

- | | |
|------------------------|-----------------------------------|
| △ Raschig-12(pesak) | △ Raschig-12(pesak 125-200 μm) |
| ▲ Raschig-12(propant) | △ Raschig-12(pesak 200-315 μm) |
| ▽ Raschig-30(pesak) | ▽ Raschig-30(pesak 125-200) |
| ▼ Raschig-30(propant) | ▽ Raschig-30(pesak 200-315) |
| ○ Ker.kuglice(pesak) | ⊗ Raschig-30(mlev.kam. 710-1000) |
| ● Ker.kuglice(propant) | ⊕ Ker.kuglice(pesak 125-200) |
| □ Pall(pesak) | ⊖ Ker.kuglice(pesak 200-315) |
| ■ Pall(propant) | ⊗ Ker.kuglice(mlev.kam. 710-1000) |
| ⊞ Pall(pesak 125-200) | ⊞ Pall(mlev.kam. 710-1000) |
| ⊠ Pall(pesak 200-315) | |
| × Roes-Raschig pr. | ○ Ker.kuglice (poliamid) |
| × Roes-Pall pr. | * Westerterp-RR |
| × Roes-Cil.pr. | + Large-Pall |

Slika 3.1.23. Poredjenje eksperimentalnih i izračunatih vrednosti za pad pritiska na osnovu jed. 3.1.10. za ispitivana punjenja u ovom radu i podatke iz literature (Tabela 1.1).

Za zonu nakupljanja na osnovu 356 eksperimentalnih tačaka za pad pritiska dobijena je korelacija sledećeg oblika:

$$(\Delta P / L)_s = 1,96 \cdot Re_w^{0,54} Fr^{0,11} Ar^{-0,15} (d_e / D)^{-1,56} \varepsilon^{-2,45} (1 - \varepsilon)^{1,08} \quad (3.1.11)$$

sa koeficijentom korelacije $R = 0,91$ i standardnom greškom eksponenata izmedju 3,5 i 11,5%. Poredjenje eksperimentalnih i izračunatih vrednosti pada pritiska za zonu nakupljanja prikazano je na *Sl. 3.1.23*.

Najveća odstupanja javila su se kod keramičkih kuglica i to pri proticanju peska i frakcija peska 125-200 i 200-315 μm pri manjim brzinama gasa. Do ovih odstupanja moguće da je došlo zbog male poroznosti sloja odnosno izrazitijeg uticaja aglomeracije čestica koja dovodi do povećanja pada pritiska.

U izvedenim korelacionim jednačinama (3.1.10.) i (3.1.11.) uveden je modifikovan Reynoldsov broj Re_w koji obuhvata faktor zida K_w (jed.3.1.6.) a definisan je izrazom:

$$Re_w = \frac{U_g d_e}{\nu_g} / K_w \quad (3.1.12)$$

S obzirom da su korelisani podaci za pad pritiska dobijeni pri veoma različitim eksperimentalnim uslovima, kolonama sa unutrašnjim prečnikom od 0,025 do 0,32 m, kao i veoma različitim karakteristikama čvrste faze sa srednjim prečnikom od 70 μm do 855 μm , imajući u vidu uticaj efekta faktora zida, kao i efekta nakupljanja i aglomeracije čestica manjeg prečnika na pad pritiska, dobijene korelacione jednačine za ispitivana punjenja i literaturne podatke daju zadovoljavajuće rezultate za obe zone.

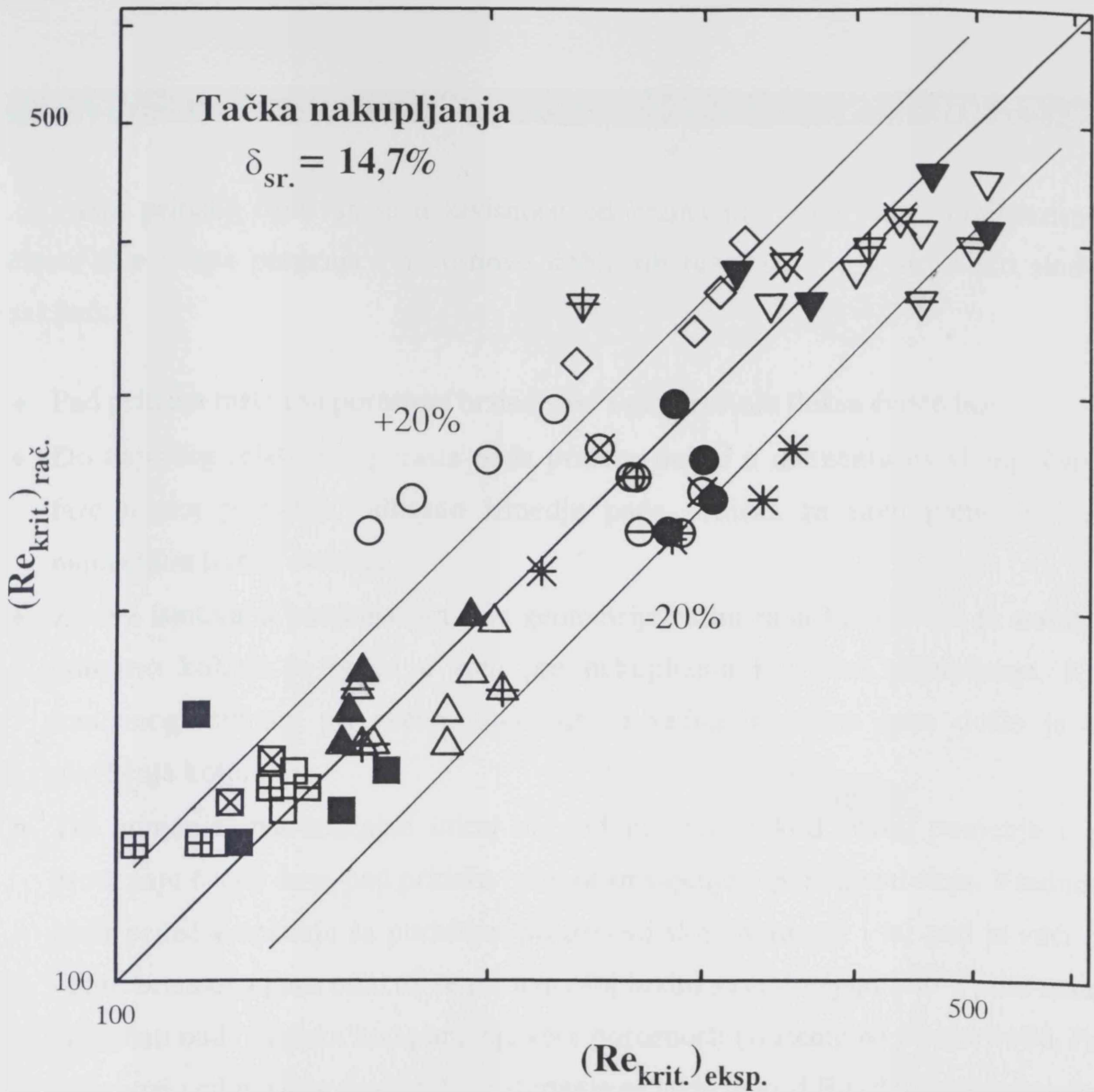
Da bi se definisala granica izmedju režima pre nakupljanja i nakupljanja, izvedena je i korelacija za tačku nakupljanja. Roes i van Swaaij (1979a) i Westerterp i Kuczynski (1987a) su pri definisanju granice izmedju ova dva režima uključili pored poroznosti sloja i dinamički i statički sadržaj čvrste faze. Pošto su pri definisanju korelacione jednačine za predviđanje pada pritiska u ovom radu uključene samo

veliĉine koje karakterišu sistem gas-čvrsto-punjenje, bez medjusobne funkcionalne zavisnosti fluidodinamiĉkih karakteristika, izvedena je korelacija za taĉku nakupljanja izraŹena preko kritiĉnog Reynoldsovog broja. Dobijena je korelacija oblika:

$$\text{Re}_{\text{kr.}} = 12,5 \cdot 10^3 \text{Fr}^{-0,04} d_e^{1,04} \varepsilon^{0,54} \quad (3.1.13)$$

Korelacija je izvedena na osnovu podataka o padu pritiska kod sledećih punjenja: Raschigovi prstenovi-12, Raschigovi prstenovi-30, keramiĉke kuglice, Pall prstenovi, cilindriĉne mreŹice i Intaloks sedla, a pri proticanju peska (frakcije 125-200 μm , 200-315 μm i 90-630 μm), propanta 250-1000 μm i mlevenog kamena 710-1000 μm . Dobijen je koeficijent korelacije $R = 0,89$ a standardna greška eksponenata kretala se od 7,5% do 33,9%. Veća odstupanja pokazale su keramiĉke kuglice pri proticanju obe čvrste faze. Poredjenje eksperimentalnih i izraĉunatih vrednosti za taĉku nakupljanja dato je na *Sl. 3.1.24*.

Pokušaj ukljuĉivanja i literaturnih podataka za taĉke nakupljanja nije dao zadovoljavajuće rezultate.

**Legenda:**

- | | |
|-------------------------|---|
| △ Raschig-12(pesak) | ⊕ Raschig-12(pesak 125-200 μm) |
| ▽ Raschig-30(pesak) | ⊕ Raschig-12(pesak 200-315 μm) |
| ○ Ker.kuglice(pesak) | ⊖ Raschig-30(pesak 125-200 μm) |
| □ Pall pr.(pesak) | ⊖ Raschig-30(pesak 200-315 μm) |
| * Cilin. mrežice(pesak) | ⊗ Raschig-30 (mlev. kamen 710-100 μm) |
| ◇ Intaloks (pesak) | ⊕ Ker.kuglice(pesak 125-200 μm) |
| ▲ Raschig-12(propant) | ⊖ Ker.kuglice(pesak 200-315 μm) |
| ▼ Raschig-30(propant) | ⊗ Ker.kuglice(mlev.kamen 710-1000 μm) |
| ● Ker.kuglice(propant) | ⊕ Pall pr.(pesak 125-200 μm) |
| ■ Pall pr.(propant) | ⊖ Pall pr.(pesak 200-315 μm) |
| | ⊗ Pall pr.(mlev.kamen 710-1000 μm) |

Slika 3.1.24. Poređenje eksperimentalnih i izračunatih kritičnih vrednosti Reynoldsovog broja za tačku nakupljanja (jed. 3.1.13.).

3.1.3. ZAKLJUČCI: Pad pritiska

Pad pritiska ispitivan je u zavisnosti od brzina pokretnih faza, karakteristika čvrste faze i tipa punjenja i na osnovu dobijenih rezultata mogu se izvesti sledeći zaključci:

- ◆ Pad pritiska raste i sa porastom brzine gasa i sa porastom fluksa čvrste faze.
- ◆ Do najvećeg relativnog porasta pada pritiska dolazi u momentu uvođenja čvrste faze u sloj punjenja, odnosno između pada pritiska za suvo punjenje i pri najmanjem fluksu čvrstog.
- ◆ Za sva ispitivana punjenja pravilne geometrije režim rada kolone bio je stabilan, odnosno kolona je radila u zoni pre nakupljanja i u zoni nakupljanja. Kod lomljenog kamena pri većim fluksevima i većim brzinama gasa došlo je do plavljenja kolone.
- ◆ Tip punjenja ima značajan uticaj na pad pritiska. I kod suvog punjenja i pri proticanju čvrste faze, pad pritiska raste sa smanjenjem poroznosti sloja. Vrednosti pada pritiska opadaju sa porastom poroznosti sloja punjenja i taj pad je veći pri većim brzinama gasa tako da se pri najvećoj brzini gasa dobijaju i do 7 puta manje vrednosti pada pritiska kod punjenja veće poroznosti (Raschigovi prstenovi-30, Pall prstenovi i cilindrične mrežice). Odstupanja se javljaju kod Raschigovih prstenova-12 i keramičkih kuglica gde dolazi do izražaja veći uticaj oblika punjenja na pad pritiska u odnosu na poroznost sloja.
- ◆ Veličina čestica čvrste faze utiče na pad pritiska. Pri najmanjem fluksu čvrstog i malim brzinama gasa veći pad pritiska imaju veće čestice. Pri najvećem fluksu manje čestice dovode do većeg pada pritiska zbog efekta aglomeracije.
- ◆ Tačka nakupljanja kod većih čestica pomerena je ka manjim brzinama gasa.
- ◆ Povećanje visine sloja punjenja smanjuje poroznost sloja što utiče na povećanje pada pritiska.
- ◆ Predložena korelaciona jednačina za predviđanje pada pritiska bez proticanja čvrste faze pokazala je dobro slaganje eksperimentalnih i izračunatih vrednosti. Postignuto je bolje slaganje u odnosu na Ergunovu jednačinu, bilo sa originalnim Ergunovim konstantama ili sa Ergunovim konstantama dobijenim fitovanjem

eksperimentalnih podataka za pojedinačna punjenja.

- ◆ Korelacione jednačine za predviđanje pada pritiska za zonu pre nakupljanja i nakupljanja takodje su dale zadovoljavajuće rezultate kako u odnosu na sopstvene rezultate tako i u odnosu na literaturne podatke.
- ◆ Korelacija za tačku nakupljanja data u radu takodje se pokazala zadovoljavajućom u odnosu na sopstvene eksperimentalne rezultate.

3.2. DINAMIČKI SADRŽAJ ČVRSTE FAZE

Dinamički sadržaj čvrste faze (β_d), koji se izražava kao zapreminski udeo čvrstog u odnosu na ukupnu zapreminu kolone, predstavlja onaj deo čvrste faze koja je napustila sloj punjenja posle istovremenog zaustavljanja i dovoda i odvoda čvrstog.

Kod kontaktora gas-čvrsto-punjenje u procesima razmene, adsorpcije ili hemijskim procesima, poželjno je koristiti takve tipove punjenja koja omogućuju postizanje većih vrednosti dinamičkog sadržaja čvrstog. Međutim, veće vrednosti β_d , ostvaruju se kod punjenja manje poroznosti koja istovremeno dovode i do većeg pada pritiska što je nepoželjno za vodjenje procesa, pa se pri izboru punjenja za određeni proces mora voditi računa o optimalnim vrednostima ovih karakteristika.

Kao i pad pritiska, i ova fluidodinamička karakteristika ispitivana je za stabilne režime, odnosno režim pre nakupljanja i nakupljanja, u zavisnosti od:

- ◆ prividne brzine gasne faze u opsegu 0,06-0,46 m/s,
- ◆ fluksa čvrste faze u opsegu 0,14-2,59 kg/m²s,
- ◆ veličine čestica čvrste faze,
- ◆ tipa punjenja i
- ◆ visine sloja punjenja.

3.2.1. Uticaj brzina pokretnih faza

I brzina gasa i fluks čvrste faze utiču na dinamički sadržaj čvrste faze. Pri malim brzinama gasa (U_g) i konstantnom fluksu čvrste faze (S), više autora (Roes i van Swaaij 1979a; Westerterp i Kuczynski, 1987a) uočilo je da je proticanje čestica kroz punjenje u obliku mlazeva (zona pre nakupljanja) i da dinamički sadržaj čvrste faze ostaje konstantan, bez obzira na povećanje brzine gasa, sve do postizanja tačke nakupljanja, odnosno granice između režima pre nakupljanja i nakupljanja. Ovi autori, kao i Claus i sar. (1976), takodje su ukazali da u zoni pre nakupljanja postoji linearna zavisnost β_d od fluksa čvrste faze.

Povećavanjem brzine gasa iznad zone pre nakupljanja, pri istom fluksu čvrstog, dolazi do promene režima strujanja odnosno dostiže se zona nakupljanja u kojoj se

pored proticanja čestica u obliku mlazeva javlja i proticanje čestica nezavisno od mlazeva, jer čestice bivaju zahvaćene strujom gasa (Roes i van Swaaij, 1979a; Westerterp i Kuczynski, 1987a). U ovoj zoni dolazi do povećanja β_d , bilo samo zbog porasta U_g , bilo samo zbog porasta S ili sa porastom i U_g i S .

Daljim povećavanjem brzine gasa povećava se udeo suspendovanih čestica u izlaznoj struji gasa i, zavisno od konstrukcionog rešenja kolone, ukazano je na dve pojave:

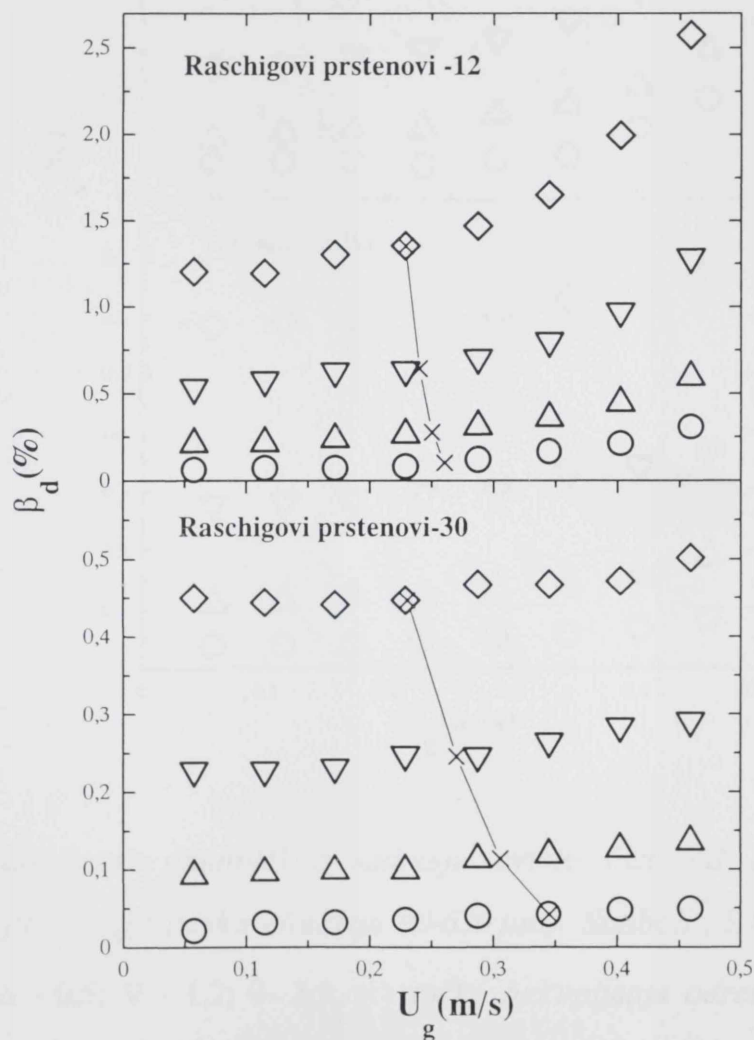
a) povećavanjem brzine gasa, *bez refleksa čestica čvrste faze* iz izlazne struje gasa, Verver i van Swaaij (1986a), kao i Kiel i sar. (1993) ukazali su da β_d prolazi kroz maksimum, a daljim povećavanjem U_g dolazi do opadanja vrednosti β_d zbog odnošenja čestica čvrstog iz kolone. Da bi sprečili odnošenje sitnih čestica čvrste faze iz kolone, različiti autori su određenim konstrukcionim rešenjima kolone pokušali da spreče ovu pojavu ali su doveli do plavljenja kolone. Tako su, na primer, Claus i sar. (1976) koristili filtere, dok su Roes i van Swaaij (1979a) imali prošireni deo pri vrhu kolone,

b) povećavanjem brzine gasa, *sa refleksom čestica čvrste faze* iz izlazne struje gasa pomoću ciklona postavljenog na vrhu kolone, Verver i van Swaaij (1986a) su postigli mnogo veće vrednosti β_d i to bez pojave plavljenja kolone.

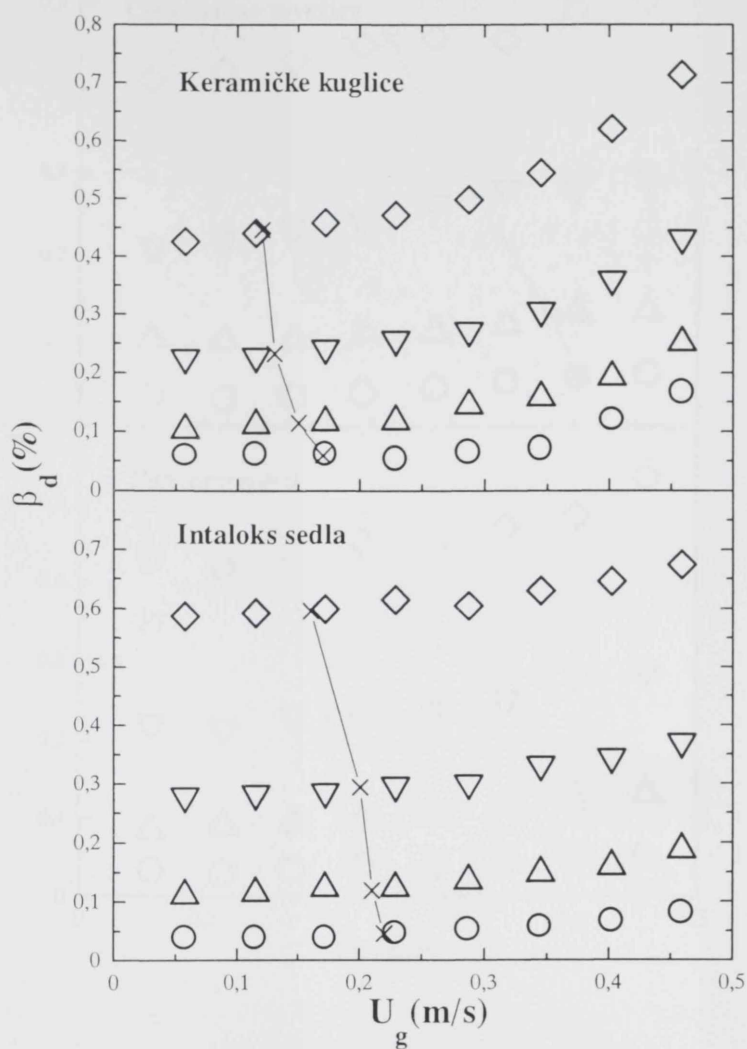
Ispitivanja u ovom radu su potvrdila dosad zapaženu funkcionalnu zavisnost dinamičkog sadržaja čvrstog od brzine gasa i fluksa peska (90-630 μm), kao što se vidi na *Sl. 3.2.(1, 2, i 3)*. Pri malim brzinama gasa (zona pre nakupljanja) kod svih punjenja dinamički sadržaj čvrste faze neznatno se povećava. Sa porastom brzine gasa raste i β_d i pri većem fluksu čvrstog kod punjenja sa manjom poroznošću (Raschigovi prstenovi-12, keramičke kuglice), veće vrednosti β_d se postižu pri manjim brzinama gasa. Kod punjenja sa većom poroznošću, kao što su Raschigovi prstenovi-30 ($\varepsilon = 0,852$), cilindrične mrežice ($\varepsilon = 0,939$) i Pall prstenovi ($\varepsilon = 0,957$), dobijaju se približno konstantne vrednosti β_d , za ceo ispitivani opseg U_g i pored porasta S . Na osnovu uočenog mogao bi se izvesti zaključak da se proticanje faza kod ovih punjenja odvijalo samo u jednom režimu, tj. u režimu pre nakupljanja. Međutim, dobijene vrednosti za pad pritiska (*Sl. 3.1.8.-3.1.12.*), poglavlje 3.1.2.1.) ukazuju da se proticanje faza ipak odvijalo u oba režima, s obzirom da su dobijena dva nagiba za krive pada pritiska u funkciji brzine gasa. Ucertane tačke koje predstavljaju granicu između zone pre

nakupljanja i nakupljanja za pesak (x) i propant (*) (vidi poglavlje 3.2.1) ukazuju na dva režima proticanja i kod punjenja veće poroznosti.

Sa porastom fluksa čvrstog, pri istoj brzini gasa, povećavala se i vrednost dinamičkog sadržaja čvrste faze kod svih tipova punjenja.

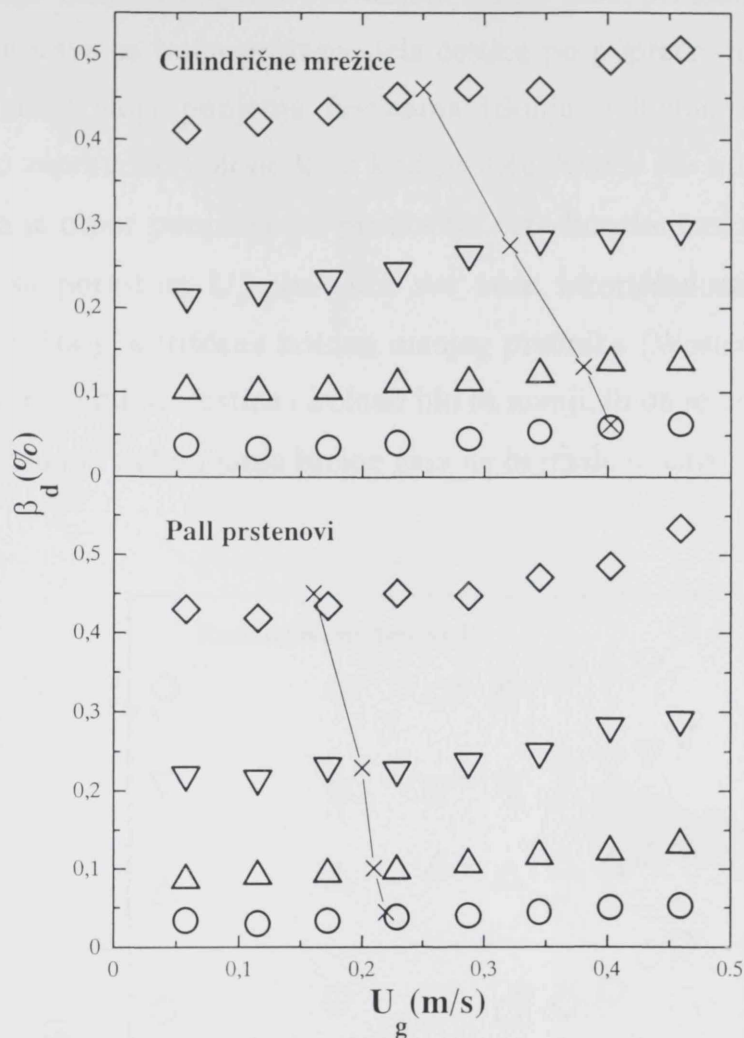


Slika 3.2.1. Zavisnost dinamičkog sadržaja čvrste faze od brzine gasa pri proticanju peska (frakcija 90-630 μm). Simboli : S (kg/m³): \circ -0,16; Δ - 0,5; ∇ - 1,2; \diamond - 2,5; x - tačke nakupljanja određene regresijom na osnovu podataka o padu pritiska.



Slika 3.2.2. Zavisnost dinamičkog sadržaja čvrste faze od brzine gasa pri proticanju peska (frakcija 90-630 μm). Simboli : S (kg/m²s): ○-0,16; △ - 0,5; ▽ - 1,2; ◇- 2,5; x - tačke nakupljanja određene regresijom na osnovu podataka o padu pritiska.

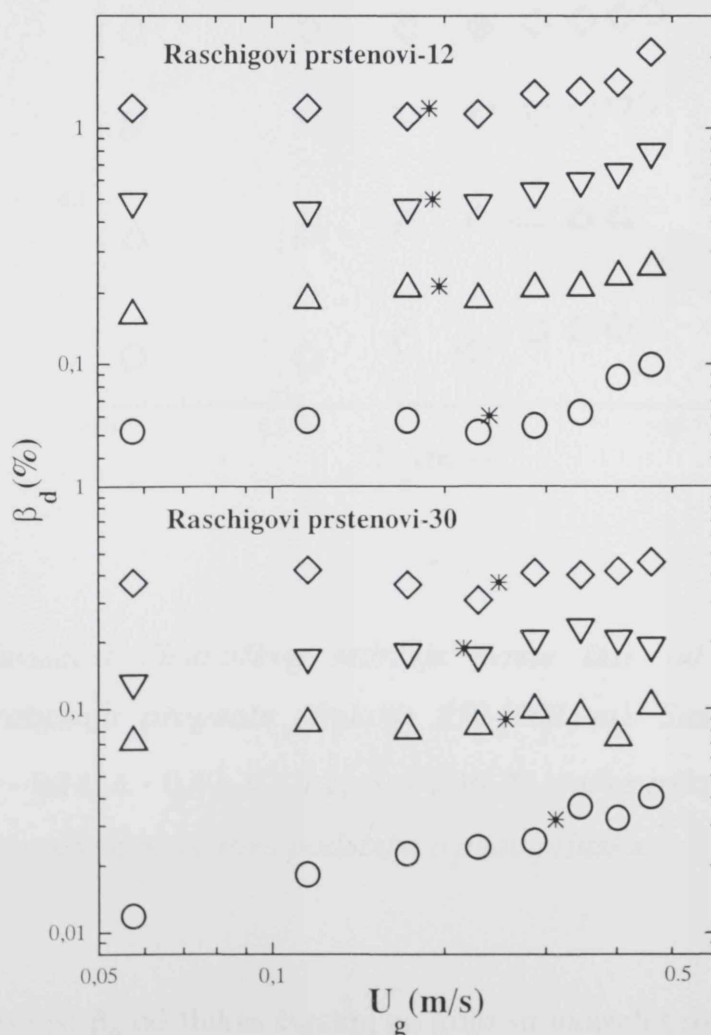
U zoni pre nakupljanja, uticaj brzine gasa na vrednosti β_d pri proticanju propanta je uočljiviji u odnosu na proticanje peska, što se vidi na Sl. 3.2.4. i 3.2.5. Zbog ovih odstupanja verovatno dolazi zbog samog oblika čestica propanta koje su skoro sfernog oblika pa je i lakša migracija i pri malim brzinama gasa.



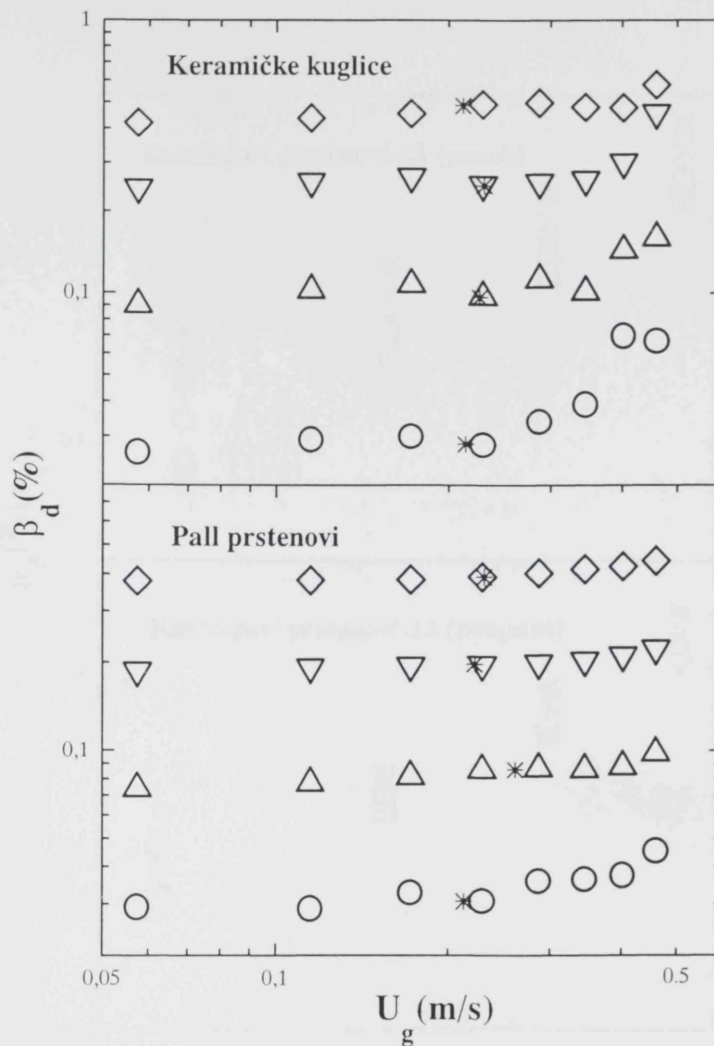
Slika 3.2.3. Zavisnost dinamičkog sadržaja čvrste faze od brzine gasa pri proticanju peska (frakcija 90-630 μm). Simboli : S (kg/m^2): \circ -0,16; Δ - 0,5; ∇ - 1,2; \diamond - 2,5; x - tačke nakupljanja određene regresijom na osnovu podataka o padu pritiska.

Za razliku od literaturnih zapažanja o konstantnoj vrednosti β_d u zoni pre nakupljanja (Roes i van Swaaij, 1979a; Westerterp i Kuczynski, 1987a), kod ispitivanih punjenja u ovom radu uočen je neznatan uticaj U_g na vrednosti β_d što je moguće objasniti na osnovu velike razlike prečnika dozatora čvrste faze i prečnika kolone (prečnik kolone je 0,111 m a prečnici dozatora od 4 do 10 mm). Pri maloj brzini gasa čestice čvrste faze protiču uglavnom kroz centralni deo kolone jer nema distributora čvrste faze. Ulogu distributora čvrste faze ima samo punjenje. Zbog loše distribucije sloja punjenja i ovakvog proticanja čestica nije iskorišćena cela zapremina kolone (V_k)

što utiče i na manje vrednosti β_d . Povećavanjem brzine gasa, pri istom fluksu čvrstog i u istom režimu, uočava se bolja preraspodela čestica po poprečnom preseku kolone. Veća je popunjenost sloja punjenja česticama (donja polovina kolone), odnosno povećan je udeo zapremine kolone kroz koji protiču čestice što utiče i na povećanje β_d . Smatrajući da je otpor punjenja pri proticanju faza konstantan, može se zaključiti da je porast β_d sa porastom U_g posledica sve veće iskorišćenosti zapremine sloja punjenja u koloni. Da je korišćena kolona manjeg prečnika (Westerterp i Kuczynski, 1987a) odnos prečnika mlaza čestica i kolone bio bi manji, ili da je korišćen distributor čvrste faze, u režimu pre nakupljanja brzine gasa ne bi imale uticaja na vrednosti β_d .

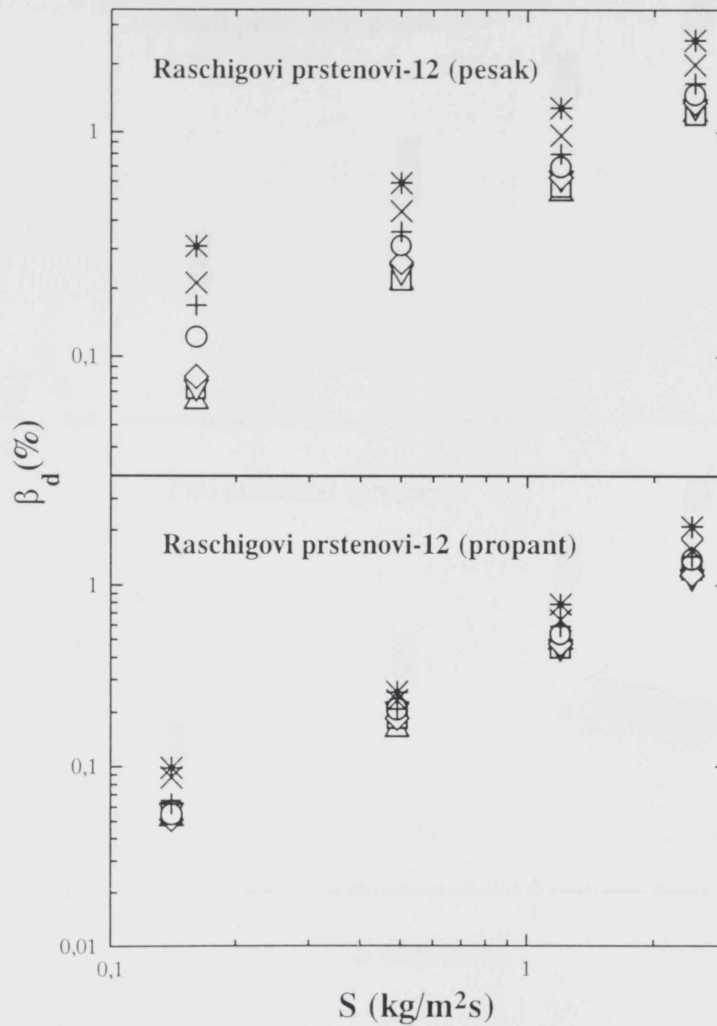


Slika 3.2.4. Zavisnost dinamičkog sadržaja čvrste faze od brzine gasa pri proticanju propanta (frakcija 250-1000 μ m). Simboli : S (kg/m²s): \circ - 0,14; Δ - 0,49; ∇ - 1,2; \diamond - 2,46; * - tačke nakupljanja određene regresijom na osnovu podataka o padu pritiska.

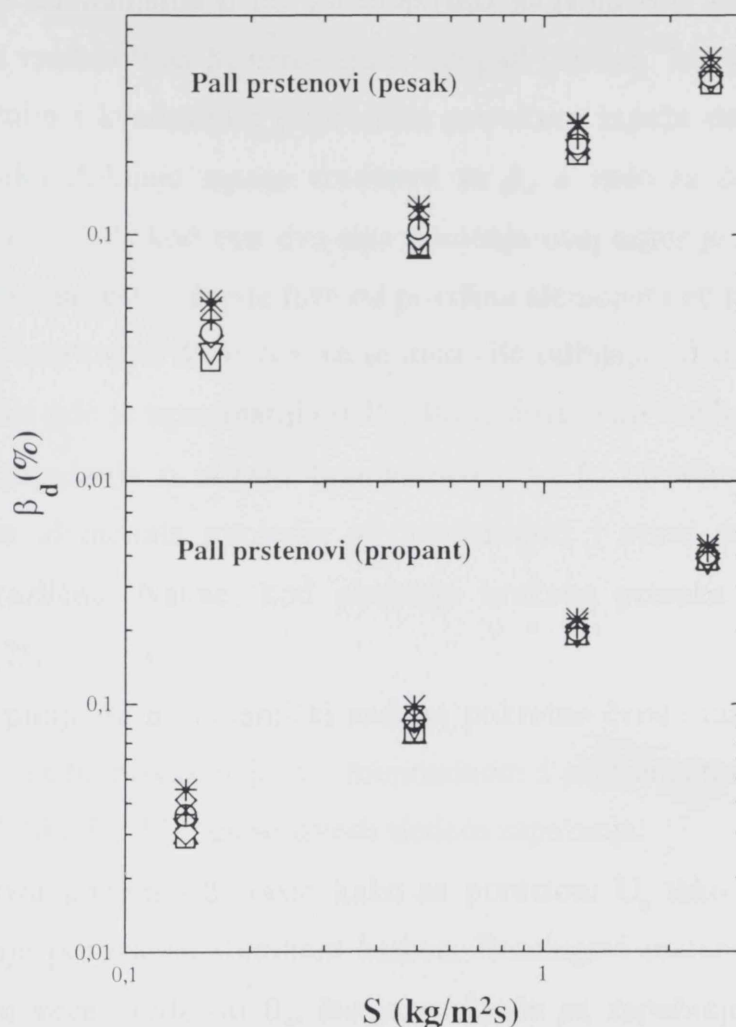


Slika 3.2.5. Zavisnost dinamičkog sadržaja čvrste faze od brzine gasa pri proticanju propanta (frakcija 250-1000 μm). Simboli : S ($\text{kg/m}^2\text{s}$):
 o - 0,14; Δ - 0,49; ∇ - 1,2; \diamond - 2,46; * - tačke nakupljanja određene regresijom na osnovu podataka o padu pritiska.

Linearna zavisnost β_d od fluksa čvrstog na koju su ukazali brojni autori (Claus i sar., 1976; Roes i van Swaaij, 1979a; Westerterp i Kuczynski, 1987a) prikazana je pri proticanju peska i propanta na Sl. 3.2.6. za Raschigove prstenove-12, kao punjenje male poroznosti ($\epsilon = 0,611$), a na Sl. 3.2.7. za Pall prstenove, kao punjenje velike poroznosti ($\epsilon = 0,957$).



Slika 3.2.6. Zavisnost dinamičkog sadržaja čvrste faze od fluksa peska (frakcija 90-630 μm) i propanta. Simboli : U_g (m/s): Δ - 0,0574; \square - 0,115; ∇ -0,172; \diamond - 0,229; \circ - 0,287; $+$ - 0,345; \times - 0,402; $*$ - 0,459.



Slika 3.2.7. Zavisnost dinamičkog sadržaja čvrste faze od fluksa peska (frakcija 90-630 μm) i propanta. Simboli : U_g (m/s): Δ - 0,0574; \square - 0,115; ∇ -0,172; \diamond - 0,229; \circ - 0,287; $+$ - 0,345; \times - 0,402; $*$ - 0,459.

3.2.2. Uticaj tipa punjenja

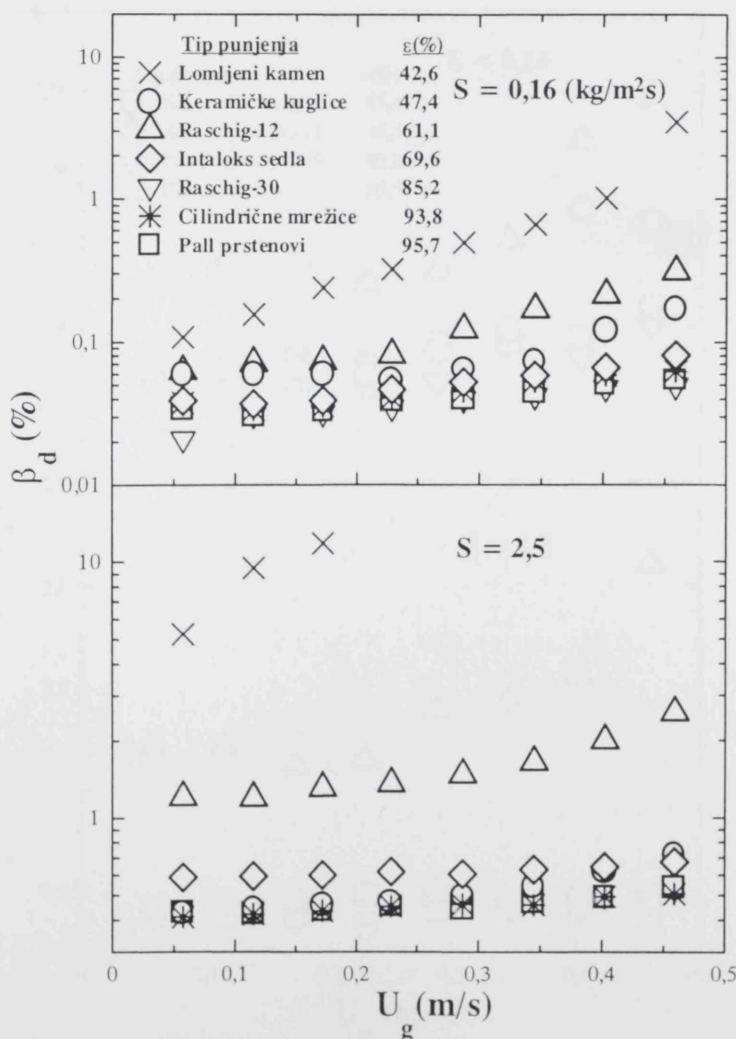
Roes i van Swaaij (1979a) i Verver i van Swaaij (1986b) ukazali su da tip punjenja ima uticaja na fluidodinamičke karakteristike kolone sa punjenjem više analizirajući uticaj punjenja na pad pritiska i brzinu proticanja čestica čvrste faze nego na njen dinamički sadržaj. Westerterp i Kuczynski (1987a) su zapazili da Kerapak i pored veće poroznosti i malog pada pritiska u odnosu na Raschigove prstenove ima već pri malim

brzinama gasa veće vrednosti β_d i režim proticanja samo u zoni nakupljanja. Kiel (1990) je zapazio da punjenja u obliku unakrsno slaganih cevi kružnog poprečnog preseka sa većim vrednostima β_d uzrokuju i veći pad pritiska. Isti autor upoređujući punjenja sa kružnim i kvadratnim poprečnim presekom zapaža da se kod punjenja kvadratnog preseka dobijaju manje vrednosti za β_d a veće za Δp . Ove razlike u dobijenim vrednostima β_d kod ova dva tipa punjenja ovaj autor je objasnio uticajem veličine ugla odbijanja čestica čvrste faze od površina elemenata punjenja kvadratnog i kružnog preseka, smatrajući da se čestice mnogo više odbijaju od cilindrične površine elemenata punjenja gde je ugao manji od 45° , što je dovelo do većih vrednosti β_d . Kiel (1990) je svoja zapažanja o uticaju tipa punjenja na β_d izvodio samo na osnovu geometrije oblika elemenata punjenja ne analizirajući i uticaj poroznosti iako je poroznost bila različita. Naime, kod punjenja kružnog preseka $\varepsilon = 0,607$, a kod kvadratnog $\varepsilon = 0,75$.

Uticaj tipa punjenja na dinamički sadržaj pokretne čvrste faze kod ispitivanih punjenja u ovom radu prikazan je pri minimalnom i maksimalnom fluksu peska i propanta na *Sl. 3.2.8 i 3.2.9*. Mogu se izvesti sledeća zapažanja:

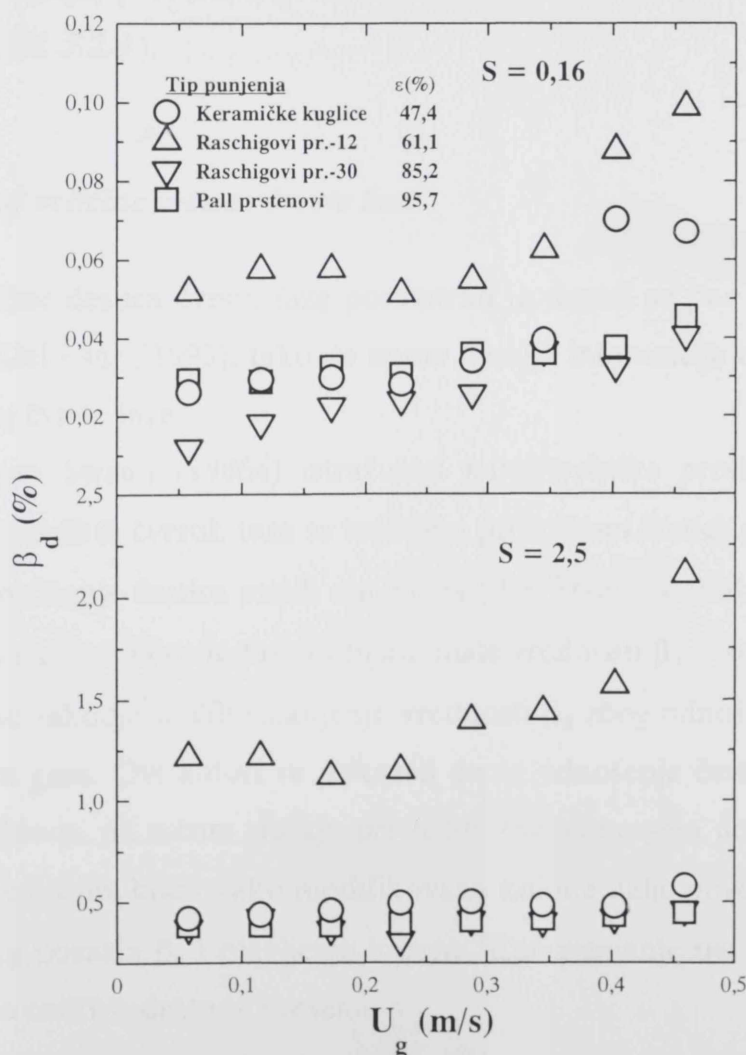
- ◆ Kod svih tipova punjenja β_d raste kako sa porastom U_g tako i sa porastom S . Punjenja manje poroznosti (lomljeni kamen, Raschigovi prstenovi-12, keramičke kuglice) imaju veće vrednosti β_d , što je u skladu sa zapažanjima Kiela (1990). Medjutim, ovo je u suprotnosti sa Westerterpom i Kuczynskim (1987a) koji su za Kerapak ($\varepsilon = 0,75$) dobili veće vrednosti β_d u odnosu na Raschigove prstenove ($\varepsilon = 0,45$). Do istih zapažanja došlo se i u ovom radu kod Raschigovih prstenova-12 i keramičkih kuglica. Naime, veće vrednosti β_d dobijene su za Raschigove prstenove u odnosu na keramičke kuglice iako ove imaju manju poroznost. Ovo odstupanje je posledica uticaja geometrije elemenata punjenja na uslove proticanja pokretnih faza na koji su ukazali brojni autori (Verver i van Swaaij, 1986b; Kiel, 1990).
- ◆ Kod punjenja sa većom poroznošću (Raschigovi prstenovi-30, Pall prstenovi, cilindrične mrežice) dobijaju se manje vrednosti β_d . Sa porastom fluksa peska i brzine gasa smanjuju se razlika u vrednostima β_d i vrednostima pada pritiska (*Sl. 3.1.14*, poglavlje 3.1.2.2.). Mala odstupanja β_d i ΔP sa povećanjem U_g i S , kod ovih punjenja, moguće je objasniti malom razlikom u poroznosti sloja.

- ♦ Uticaj geometrije elemenata punjenja na β_d uočljiviji je kod punjenja manje poroznosti i to keramičkih kuglica u poredjenju sa lomljenim kamenom, Raschigovim prstenovima-12 i Intaloks sedlima. Lomljeni kamen ($\varepsilon = 0,426$) i keramičke kuglice ($\varepsilon = 0,474$) iako slične poroznosti imaju veoma različite vrednosti β_d , dobijene pri proticanju peska. Pri minimalnom fluksu peska dobijene vrednosti β_d za lomljeni kamen su i 8,5 puta veće od vrednosti dobijenih za kuglice, a pri maksimalnom fluksu peska, već pri malim brzinama gasa, kod lomljenog kamena dolazi do naglog povećanja vrednosti β_d zbog plavljenja kolone.



Slika 3.2.8. Zavisnost dinamičkog sadržaja čvrste faze od tipa punjenja i poroznosti sloja pri minimalnom i maksimalnom fluksu peska (frakcija 90-630 μm).

- ◆ Ako se uporede keramičke kuglice i Raschigovi prstenovi-12, iako Raschigovi prstenovi-12 imaju veću poroznost ($\varepsilon = 0,611$) uslovljavaju i veće vrednosti β_d pri proticaju i peska i propanta. Sa porastom fluksa čvrstog povećavaju se i razlike u dobijenim vrednostima β_d . Pri minimalnom fluksu peska, dobijaju se veće vrednosti β_d za kuglice u odnosu na Inaloks, što je i očekivano zbog manje poroznosti kuglica. Međutim, pri maksimalnom fluksu uticaj geometrije postaje dominantniji, pa se dobijaju veće vrednosti β_d za Intaloks sedla. Na uticaj geometrije elemenata punjenja na β_d ukazali su i drugi autori: Verver i van Swaaij (1986b); Westerterp i Kuczynski (1987a); Kiel (1990).



Slika 3.2.9. Zavisnost dinamičkog sadržaja čvrste faze od tipa punjenja i poroznosti sloja pri minimalnom i maksimalnom fluksu propanta.

- ◆ Geometrija elemenata punjenja ima uticaja i na preraspodelu čestica čvrste faze po poprečnom preseku kolone, s obzirom da su eksperimenti radjeni bez distributora čestica. Uočeno je da lomljeni kamen, keramičke kuglice i Raschigovi prstenovi-12 (punjenja sa manjom poroznošću sloja) utiču na raspodelu čestica već pri vrhu kolone tako da je veća iskorišćenost zapremine sloja punjenja za protok čestica, što utiče i na povećanje vrednosti β_d (vidi *Sl. 3.2.8.*). Punjenja sa većom poroznošću sloja (Intaloks sedla, Raschigovi prstenovi-30, Pall prstenovi i cilindrične mrežice) imaju loše distributivne osobine, tako da čestice pri vrhu kolone protiču kroz središnji deo kolone. Bolja preraspodela čestica po poprečnom preseku kolone ostvaruje se kod ovih punjenja u donjoj polovini kolone. Dobijene vrednosti β_d kod ovih punjenja su manje (vidi *Sl. 3.2.8.*).

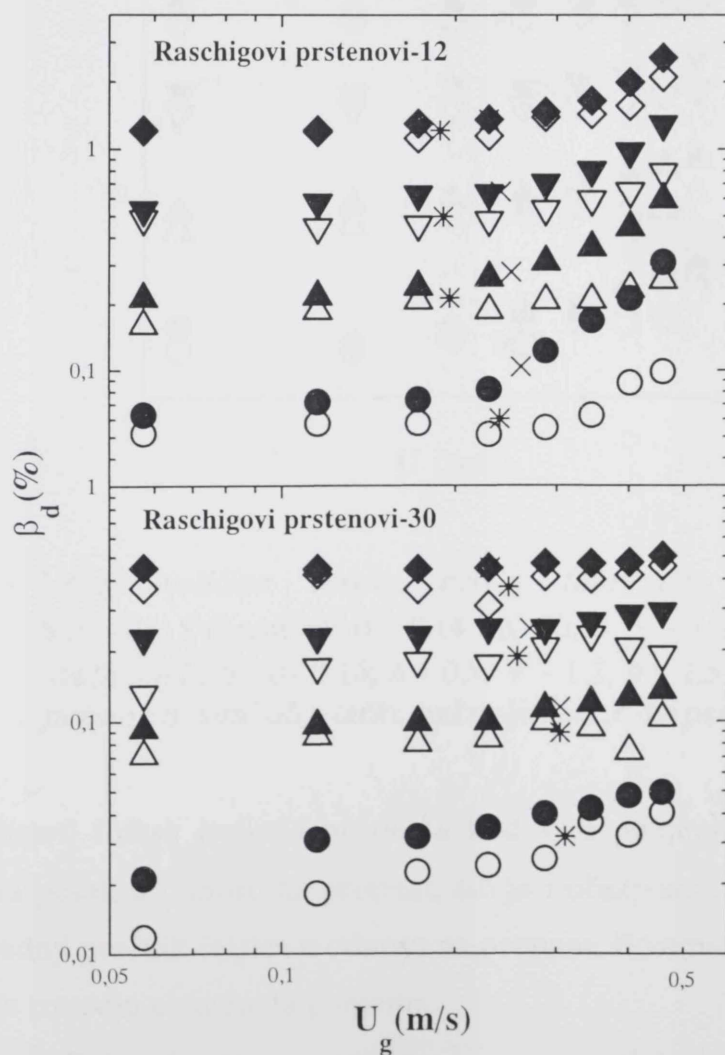
3.2.3. Uticaj veličine čestica čvrste faze

Uticaj veličine čestica čvrste faze posmatran je dosad na pad pritiska i srednju brzinu čestica (Kiel i sar., 1993), tako da nema mnogo informacija o ovom uticaju na dinamički sadržaj čvrste faze.

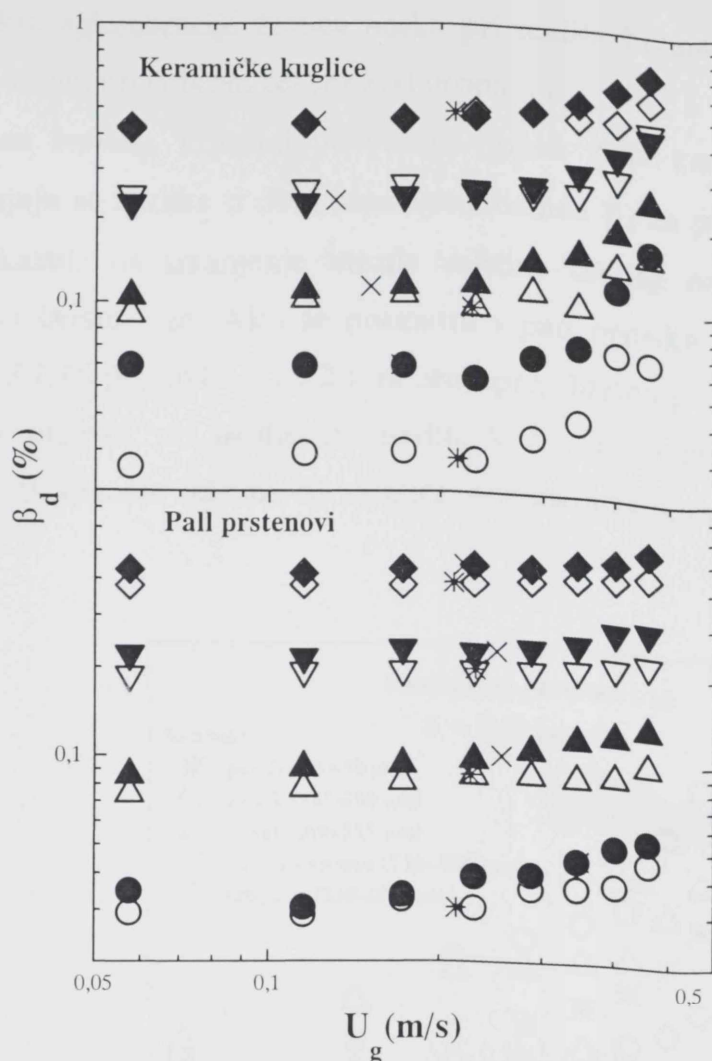
Verver i van Swaaij (1986a) istražujući karakteristike proticanja čvrste faze (koristili su pet različitih čvrstih faza sa srednjim prečnikom čestica od 70 do 880 μm), uočili su da je proticanje čestica malih dimenzija ($d = 70 \mu\text{m}$) u obliku mlazeva i da se pri malim brzinama gasa i čvrste faze dobijaju male vrednosti β_d . Povećavanjem brzine gasa ovi autori su takodje uočili smanjenje vrednosti β_d zbog odnošenja sitnih čestica izlaznom strujom gasa. Ovi autori su pokazali da se odnošenje čestica može smanjiti postavljanjem ciklona, ali u tom slučaju pri većim brzinama gasa dolazi do značajnog povećanja β_d . Medjutim, kod ovako modifikovane kolone dalje povećanje brzine gasa dovodi do naglog porasta β_d i plavljenja kolone. Kao punjenje ovi autori su koristili unakrsno slagane cevi kvadratnog preseka.

Kiel i sar. (1993) su ispitivali uticaj dve veličine čestica ($d = 640 \mu\text{m}$ i $2200 \mu\text{m}$) na β_d i uočili da se zona nakupljanja, koju karakteriše nagli porast β_d , javlja pri relativno malim brzinama gasa kod čestica milimetarske veličine.

U ovom radu uticaj veličine čestica čvrste faze na β_d posmatran je za punjenja pravilne geometrije: Raschigove prstenove-12, Raschigove prstenove-30, keramičke kuglice i Pall prstenove, pri najmanjem i najvećem fluksu čvrstih faza: peska od 90 do 630 μm , uske frakcije peska od 125 do 200 μm i frakcije od 200 do 315 μm , propanta frakcije od 250 do 1000 μm i frakcije mlevenog kamena 710-1000 μm . Razlike u gustinama ovih čestica bile su zanemarljive (vidi *Tabelu 2.2.*) tako da je mogao biti posmatran samo uticaj veličine čestica na β_d . Na *Sl. 3.2.10. i 3.2.11.* prikazan je dinamički sadržaj čvrste faze pri proticanju peska (frakcije 90-630 μm) i propanta, kao frakcija sa širim granulometrijskim sastavom i dobijeni rezultati ukazuju na sledeće:



*Slika 3.2.10. Uticaj veličine čestica čvrste faze na dinamički sadržaj. Simboli : S ($\text{kg/m}^2\text{s}$): \circ - 0,14; Δ - 0,49; ∇ - 1,2; \diamond - 2,46 (propant, svetli simboli); \circ - 0,16; Δ - 0,5; ∇ - 1,2; \diamond - 2,5 (pesak 90-630 μm , popunjeni simboli); tačke nakupljanja : x - za pesak, * - za propant*

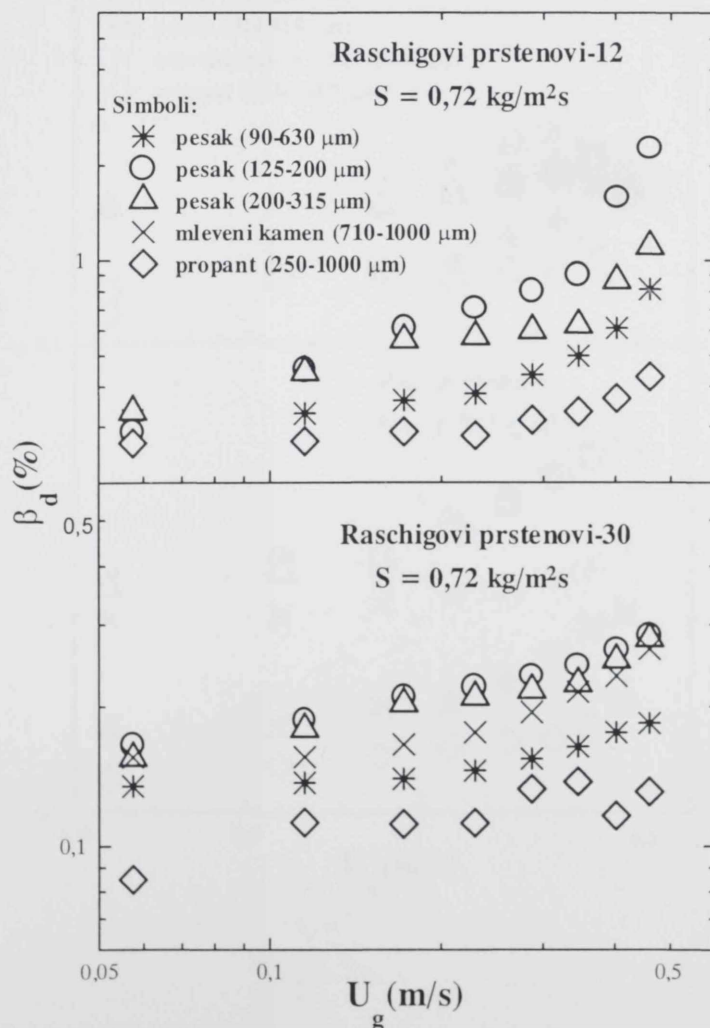


Slika 3.2.11. Uticaj veličine čestice čvrste faze na dinamički sadržaj. Simboli : S (kg/m² s): ○ - 0,14; △ - 0,49; ▽ - 1,2; ◇ - 2,46 (propant, svetli simboli); ○ - 0,16; △ - 0,5; ▽ - 1,2; ◇ - 2,5 (pesak 90-630 μm, popunjeni simboli); tačke nakupljanja : x - za pesak, * - za propant

- ◆ Za sve vrednosti fluksa peska i propanta kod svih punjenja veće vrednosti β_d dobijaju se za pesak u odnosu na propant, što je i očekivano, s obzirom da pesak ima manji srednji prečnik čestica u odnosu na propant, što omogućava njihovu veću koncentraciju između elemenata punjenja.
- ◆ Pri minimalnom fluksu čvrstog sa porastom brzine gasa dobijaju se veća odstupanja između vrednosti β_d dobijenih pri proticanju peska u odnosu na propant kod punjenja manje poroznosti (Raschigovi prstenovi-12, keramičke kuglice). Međutim, ako se posmatra pad pritiska kod ovih punjenja, manje vrednosti se

dobijaju pri proticanju peska nego pri proticanju propanta, što se može objasniti odsustvom efekta aglomeracije čestica peska pri malim brzinama gasa i malom fluksu čvrstog i većim prečnikom čestica kod propanta.

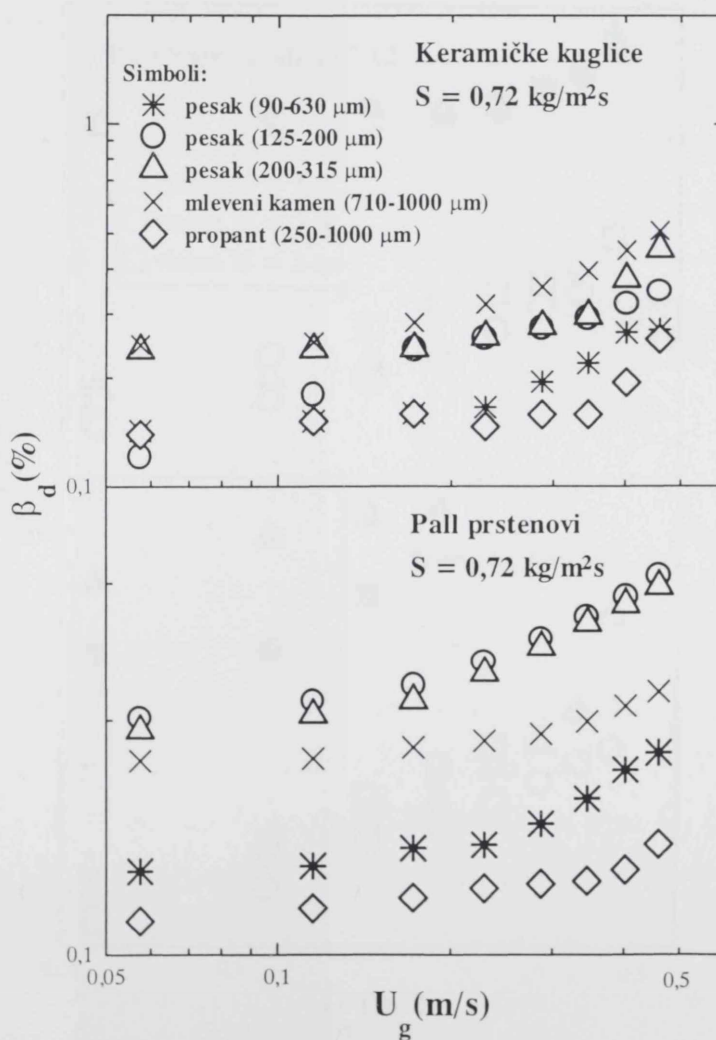
- ◆ Porastom fluksa čvrstog, i pored povećanja brzine gasa kod svih ispitivanih punjenja, smanjuju se razlike u dobijenim vrednostima β_d za pesak u odnosu na propant što ukazuje na smanjenje uticaja veličine čestica na vrednosti β_d sa porastom fluksa čvrste faze. Ako se posmatra i pad pritiska pri maksimalnom fluksu (vidi *Sl. 3.1.15.* poglavlje 3.1.2.2.), za ceo opseg brzina gasa dobijaju se veće vrednosti pada pritiska pri proticanju peska, kod svih punjenja, zbog efekta aglomeracije čestica manje veličine čiji se uticaj povećava sa porastom fluksa čvrste faze.



Slika 3.2.12. Uticaj veličine čestica čvrste faze na dinamički sadržaj pri konstantnom fluksu čvrstog.

Uticaj veličine čestica na β_d posmatrano pri jednom fluksu ispitivanih čvrstih faza (čiji uticaj je posmatran i na pad pritiska, poglavlje 3.1.2.3.) prikazan je na Sl. 3.2.12. i 3.2.13.

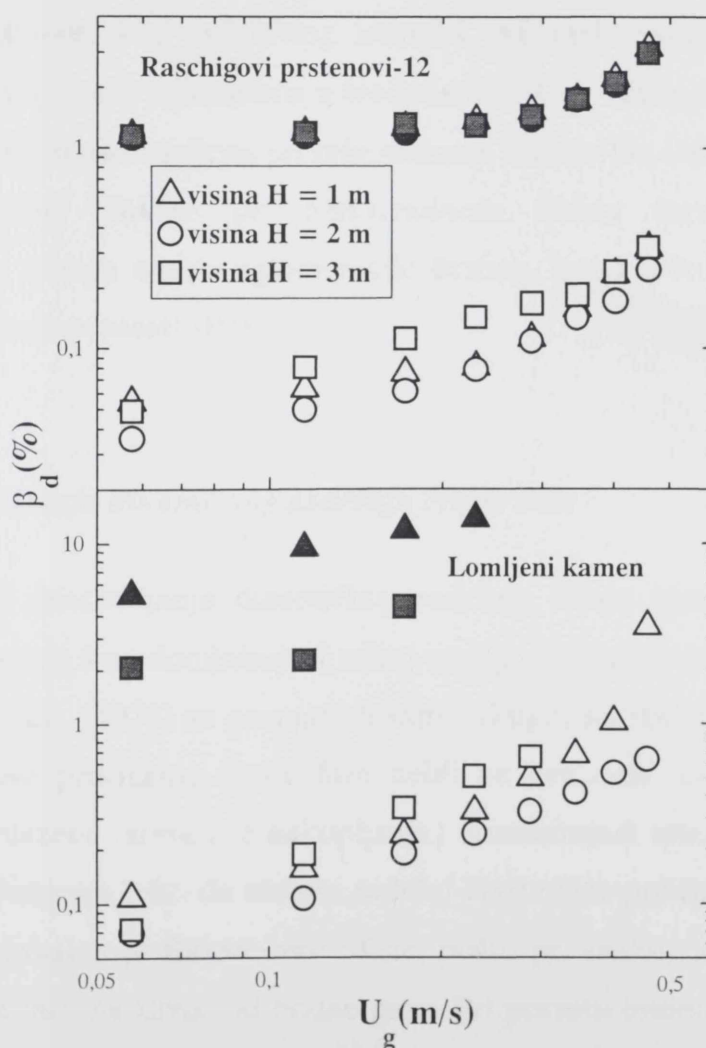
Kao i kod pada pritiska i za dinamički sadržaj čvrste faze najveće vrednosti se dobijaju pri proticanju najmanjih čestica. Međutim, kod keramičkih kuglica neznatno veće vrednosti za β_d se dobijaju pri proticanju mlevenog kamena u odnosu na uske frakcije peska od 125 do 200 μm i od 200 do 315 μm .



Slika 3.2.13. Uticaj veličine čestica čvrste faze na dinamički sadržaj pri konstantnom fluksu čvrstog.

3.2.4. Uticaj visine sloja

S obzirom da su pad pritiska i dinamički sadržaj čvrste faze karakteristične veličine sistema gas-čvrsto-punjenje koje se uporedo eksperimentalno određuju za isti sloj odnosno istu poroznost, zapažanja do kojih se došlo pri posmatranju uticaja visine na ΔP kod Raschigovih prstenova-12 i lomljenog kamena potvđena su i kod β_d . Na osnovu grafika na kome je prikazan uticaj visine sloja na β_d u funkciji brzine gasa, Sl. 3.2.14., može se zaključiti sledeće:



Slika 3.2.14. Dinamički sadržaj čvrste faze u zavisnosti od visine sloja punjenja u koloni pri minimalnom ($S = 0,16 \text{ kg/m}^2\text{s}$ - svetli simboli) i maksimalnom ($S = 2,5$, popunjeni simboli) fluksu peska ($90\text{-}630 \mu\text{m}$).

- ◆ Pri minimalnom fluksu peska i istoj brzini gasa, porastom visine sloja β_d raste kod oba punjenja ali su veće vrednosti dobijene za visinu sloja od 1 m u odnosu na 2 m, s obzirom da su za visinu sloja od 1 m dobijene manje vrednosti poroznosti (*Tabela 3.1.1*, poglavlje 3.1.1.2.). Isto je uočeno i za pad pritiska (*Sl. 3.1.19*, poglavlje 3.1.2.4.).
- ◆ Pri maksimalnom fluksu čvrstog kod Raschigovih prstenova ne uočavaju se veće razlike u dobijenim vrednostima β_d , posmatrano za pojedinačne visine sloja (isto je uočeno i kod pada pritiska), što je i očekivano jer su dobijena mala odstupanja u izračunatim vrednostima poroznosti sloja pri ovom fluksu (*Tabela 3.1.1*, poglavlje 3.1.1.2.). Medjutim, kod lomljenog kamena pri maksimalnom fluksu čvrstog dobijaju se mnogo veća odstupanja u vrednostima β_d za visinu od 1 m, posmatrano u odnosu na vrednosti dobijene pri minimalnom fluksu. Do ovih odstupanja, kao i pojave plavljenja kolone pri maksimalnom fluksu čvrstog, dolazi zbog dominirajućeg uticaja efekta aglomeracije čestica, kao i usled oblika elemenata punjenja i male poroznosti sloja.

3.2.5. Predviđanje dinamičkog sadržaja čvrste faze

Korelacije za predviđanje dinamičkog sadržaja čvrste faze date u literaturi, generalno posmatrano, kao dominirajući uticaj na β_d , obuhvatale su proticanje čestica čvrste faze. Claus i sar. (1976) su posmatrali samo ukupni sadržaj čvrste faze koji su u zavisnosti od uslova proticanja čvrste faze delili na dva dela. U slučaju proticanja čestica u obliku mlazeva (zona pre nakupljanja) dominirajući uticaj imaju sile trenja izmedju čestica i punjenja tako da ukupni sadržaj čvrste faze potiče samo od punjenja ($\beta = \beta_p$) i proporcionalan je fluksu čvrste faze, pošto pri malim brzinama proticanja gasa sadržaj čvrste faze ne zavisi od brzine gasa. Pri porastu brzine gasa, prema ovim autorima, proticanje je u obliku zgusnute faze i raste trenje izmedju čestica i gasa pa polovina obrazovanog sadržaja čvrste faze potiče usled trenja izmedju čestica i gasa (β_g) a polovina usled trenja izmedju čestica i punjenja (β_p). Ovi autori su ove udele prikazali relacijama:

$$\beta = \beta_g + \beta_p \quad (3.2.1)$$

$$\beta_g = (-dp/dz - F_{gp}) / (\rho - \rho_g) \cdot g \quad (3.2.2)$$

$$\beta_p = F_{sp} / (\rho - \rho_g) \cdot g \quad (3.2.3)$$

Roes i van Swaij (1979a) su takodje posmatralij uticaj proticanja čestica čvrste faze na β_d i prepostavili da je u zoni pre nakupljanja srednja brzina čestica (u_p) konstantna i da se β_d može izračunati na osnovu izraza:

$$u_p = \frac{S}{\rho \beta_d} = \text{const} \quad (3.2.4)$$

Za zonu nakupljanja navedeni autori su β_d računali na osnovu izraza za brzinu klizanja čestica (u_{slip}), koju su takodje smatrali konstantnom:

$$u_{\text{slip}} = \frac{S}{\rho \beta_d} + \frac{G}{(\varepsilon - \beta_d - \beta_s) \cdot \rho_g} = \text{const} \quad (3.2.5)$$

Verver i van Swaij (1987), kao i Westerterp i Kuczynski (1987a) pozivaju se takodje na predložen izraz Roesa i van Swaija (1979a) za izračunavanje β_d u zoni pre nakupljanja. Za zonu nakupljanja Verver i van Swaij (1987) su β_d izračunavali na osnovu srednjeg vremena zadržavanja čestica u koloni:

$$\beta_d = \frac{S}{\rho L} \cdot \bar{\tau} \quad (3.2.6)$$

S druge strane, Westerterp i Kuczynski (1987a) su zaključili da u zoni nakupljanja β_d potiče od dela čestica čije je proticanje u obliku mlaza i dela čestica koje su slobodno suspendovane oko mlaza zbog uticaja veće brzine gasa koji dovodi do suspendovanja čestica tako da su predložili izraz oblika:

$$\beta_d = \beta_{tr} + \beta_{susp} = \frac{S}{\rho u_p} + \beta_{susp} \quad (3.2.7)$$

Pored toga ovi autori su opovrgli tvrdnju Roesa i van Swaaija (1979a) da je brzina klizanja čestica konstantna (*jed. 3.2.5.*), i ukazali da u_{slip} izrazito zavisi od geometrije punjenja i karakteristika gasne faze.

Kiel (1990) je izveo model za predviđanje srednjeg dinamičkog sadržaja čvrste faze na osnovu momentne i jednačine kontinuiteta postavljenih i za gasnu i za čvrstu fazu. Model obuhvata uticaje aksijalne poroznosti punjenja, radijalne nehomogenosti pri proticanju obeju faza, efekte nakupljanja kao i interakciju čestica-čestica. Ove uticaje u modelu autor je obuhvatio sa dva predložena emirijska parametra i to brzinom čestica neposredno posle sudara sa elementom punjenja, u_{so} , i efektivnom brzinom gasa koju je izrazio:

$$u_{gef} = \xi \frac{G}{\varepsilon \rho_g} \quad (3.2.8)$$

gde je ξ empirijski faktor hidrodinamičke efektivnosti. Srednji dinamički sadržaj pokretne čvrste faze na osnovu razvijenog modela Kiel (1990) je definisao izrazom:

$$\bar{\beta} = \frac{S}{\rho u_s} \quad (3.2.9)$$

Prikazani izrazi sa predviđanje β_d predloženi u literaturi obuhvataju ili eksperimentalne vrednosti pada pritiska (Claus i sar., 1976), ili statičkog sadržaja čvrstog (Roes i van Swaaij, 1979a) ili poznavanje empirijskih parametara (Kiel, 1990), što povećava obim eksperimenata ili čini model kompleksnim ili nedefinisanim (na primer β_{susp} u *jed. 3.2.7.*).

Pri izvodjenju korelacije za predviđanje dinamičkog sadržaja čvrste faze, kao i kod korelisanja pada pritiska, predložene korelacije u ovom radu obuhvatile su uticaj brzina pokretnih faza, karakteristike punjenja, veličine čestica čvrste faze i dimenzije kolone na β_d . Izvodjenjem korelacija za predviđanje jedne fluidodinamičke

karakteristike samo na osnovu uticaja osnovnih parametara koji definišu sistem gas-čvrsto-punjenje, omogućeno je da se predviđanje jedne veličine ne uslovljava drugom npr. predviđane β_d poznavanjem eksperimentalnih vrednosti za ΔP ili β_s ili obrnuto. Predložene korelacije za predviđanje β_d izvedene su i za režim pre nakupljanja i za režim nakupljanja, a za granicu izmedju ovih režima kod β_d prihvaćena je podela na osnovu eksperimentalnih vrednosti za pad pritiska (vidi objašnjenje u poglavlju 3.1.2.1.).

Za zonu pre nakupljanja za ispitivana punjenja i sve ispitivane čvrste faze izvedena je korelacija:

$$\beta_d = 6,65 \cdot 10^{-3} S^{0,92} d^{-0,09} d_e^{-0,83} (1 - \varepsilon)^{0,43} \quad (3.2.10)$$

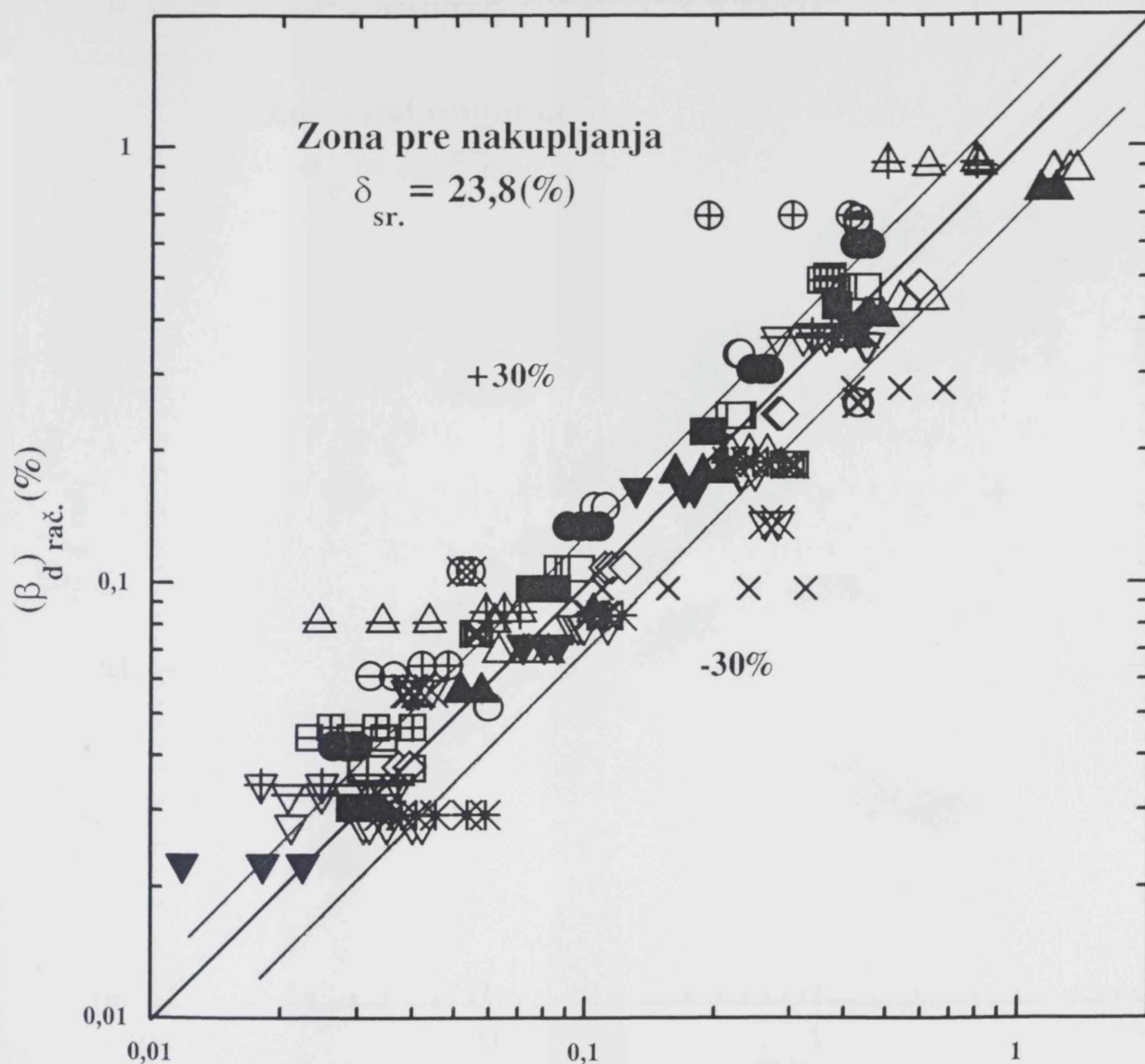
sa koeficijentom korelacije $R = 0,94$ i standardnom greškom eksponenata izmedju 2,6 i 54,3% za 214 eksperimentalnih tačaka. Najveća greška eksponenta dobijena je za član koji obuhvata srednji prečnik čestica (54,3%). U zoni pre nakupljanja β_d ne zavisi od brzine gasa (Claus i sar., 1976; Roes i van Swaaij, 1979a; Westerterp i Kuczynski, 1987a) tako da korelacija ne obuhvata ovaj uticaj. Poredjenje eksperimentalnih i izračunatih vrednosti β_d za zonu pre nakupljanja prikazano je na *Sl. 3.2.15*. Kao i kod korelacije za predviđanje pada pritiska, najveća odstupanja izmedju izračunatih i eksperimentalnih vrednosti dinamičkog sadržaja čvrste faze dobijena su za lomljeni kamen zbog male poroznosti sloja i geometrije elemenata punjenja, odnosno definisanja ekvivalentnog prečnika, kao i kod keramičkih kuglica za sve tipove čvrste faze.

Za zonu nakupljanja dobijena je korelacija na osnovu fitovanja 296 eksperimentalnih tačaka za β_d :

$$\beta_d = 7,4 \cdot 10^{-4} U_g^{0,40} S^{0,83} d^{-0,21} d_e^{-1,43} (1 - \varepsilon)^{0,73} \quad (3.2.11)$$

sa koeficijentom korelacije $R = 0,92$ i standardnom greškom eksponenata 3,1-24,4%. U izvedenim izrazima, jed. 3.2.10. i 3.2.11., dobijeni eksponent za S je približan jedinici što je u saglasnosti sa Sl. 3.2.6. i 3.2.7. koje ukazuju na linearnu zavisnost β_d od fluksa čvrstog, na šta je uostalom ukazano i u literaturi (Claus i sar., 1976; Roes i van Swaij, 1979a; Westerterp i Kuczynski, 1987a). Poredjenje eksperimentalnih i izračunatih vrednosti β_d za zonu nakupljanja prikazano je na Sl. 3.2.16. Još izrazitije odstupanje u odnosu na odstupanje kod zone pre nakupljanja daje lomljeni kamen što se moglo i očekivati s obzirom da u režimu nakupljanja kod ovog punjenja dolazi do nestabilnosti u proticanju faza odnosno do plavljenja kolone. Keramičke kuglice takodje daju najveće odstupanje izmedju eksperimentalnih i izračunatih vrednosti β_d .

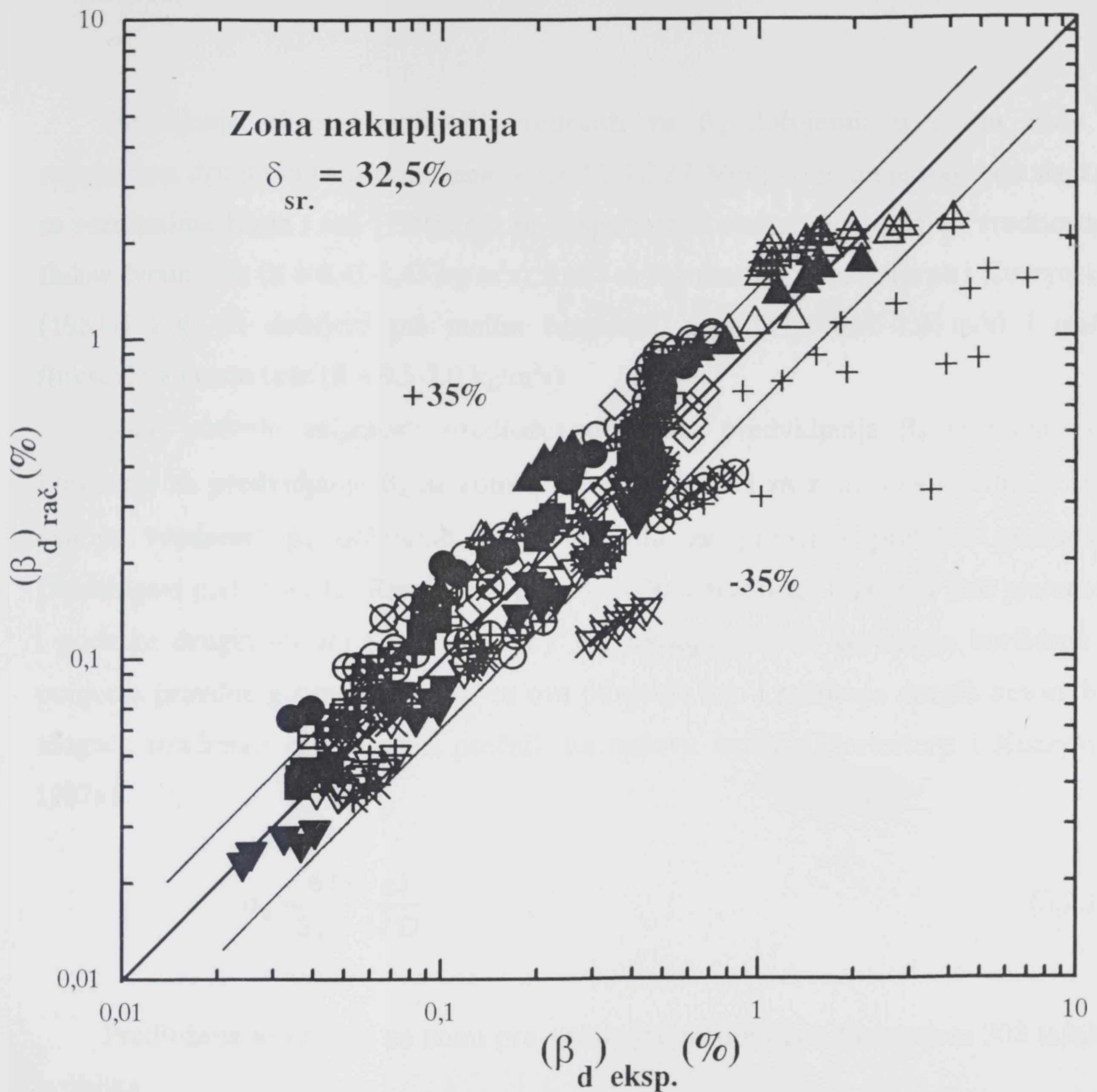
Upoređujući pojedinačne vrednosti srednje relativne greške (δ_{sr}) kod keramičkih kuglica uočeno je da se najveće greške dobijaju pri proticanju ili najmanjih čestica čvrste faze (frakcija peska 125-200 μm i 200-315 μm) ili najvećih čestica (mleveni kamen frakcija 710-1000 μm) nezavisno od režima strujanja. I pored pravilnosti geometrije elemenata ovog punjenja očito da mala poroznost sloja ($\varepsilon = 0,474$) bitno utiče na dinamički sadržaj čvrste faze.



Legenda:

△ Raschig-12(pesak)	⊕ Ker.kuglice(pesak 125-200 μm)
▽ Raschig-30(pesak)	⊖ Ker.kuglice(pesak 200-315 μm)
○ Ker.kuglice(pesak)	⊗ Ker.kuglice(mlev.kamen 710-1000 μm)
□ Pall pr.(pesak)	⊞ Pall pr.(pesak 125-200 μm)
▲ Raschig-12(propant)	⊟ Pall pr.(pesak 200-315 μm)
▼ Raschig-30(propant)	⊠ Pall pr.(mlev.kamen 710-1000 μm)
● Ker.kuglice(propant)	
× Lom.kamen(pesak)	
* Cil.mrežice(pesak)	
◇ Intaloks (pesak)	

Slika 3.2.15. Poređenje eksperimentalnih i izračunatih vrednosti za dinamički sadržaj čvrste faze na osnovu jednačine 3.2.10.

**Legenda:**

- | | |
|------------------------|---------------------------------------|
| △ Raschig-12(pesak) | ⊠ Raschig-12(pesak 125-200 μm) |
| ▽ Raschig-30(pesak) | ⊡ Raschig-12(pesak 200-315 μm) |
| ○ Ker.kuglice(pesak) | ⊣ Raschig-30(pesak 125-200 μm) |
| □ Pall pr.(pesak) | ⊤ Raschig-30(pesak 200-315 μm) |
| ▲ Raschig-12(propant) | ⊗ Raschig-30(mlev.kamen 710-1000 μm) |
| ▼ Raschig-30(propant) | ⊕ Ker.kuglice(pesak 125-200 μm) |
| ● Ker.kuglice(propant) | ⊖ Ker.kuglice(pesak 200-315 μm) |
| ■ Pall pr.(propant) | ⊗ Ker.kuglice(mlev.kamen 710-1000 μm) |
| + Lom.kamen(pesak) | ⊞ Pall pr.(pesak 125-200 μm) |
| * Cil.mrežice(pesak) | ⊠ Pall pr.(pesak 200-315 μm) |
| ◇ Intaloks (pesak) | ⊞ Pall pr.(mlev.kamen 710-1000 μm) |

Slika 3.2.16. Poređenje eksperimentalnih i izračunatih vrednosti za dinamički sadržaj čvrste faze na osnovu jednačine 3.2.11.

Poredjenje eksperimentalnih vrednosti za β_d dobijenih u ovom radu sa rezultatima drugih autora prikazano je na *Sl. 3.2.17*. Vidljivo je da je najbolje slaganje sa rezultatima Kiela i sar. (1993) čiji su eksperimenti vodjeni pri manjim vrednostima fluksa čvrste faze ($S = 0,41-1,43 \text{ kg/m}^2\text{s}$), kao i sa rezultatima Westerterpa i Kuczynskog (1987a) koji su dobijeni pri malim brzinama gasa ($U_g = 0,03-0,26 \text{ m/s}$) i malim fluksevima čvrste faze ($S = 0,5-2,0 \text{ kg/m}^2\text{s}$).

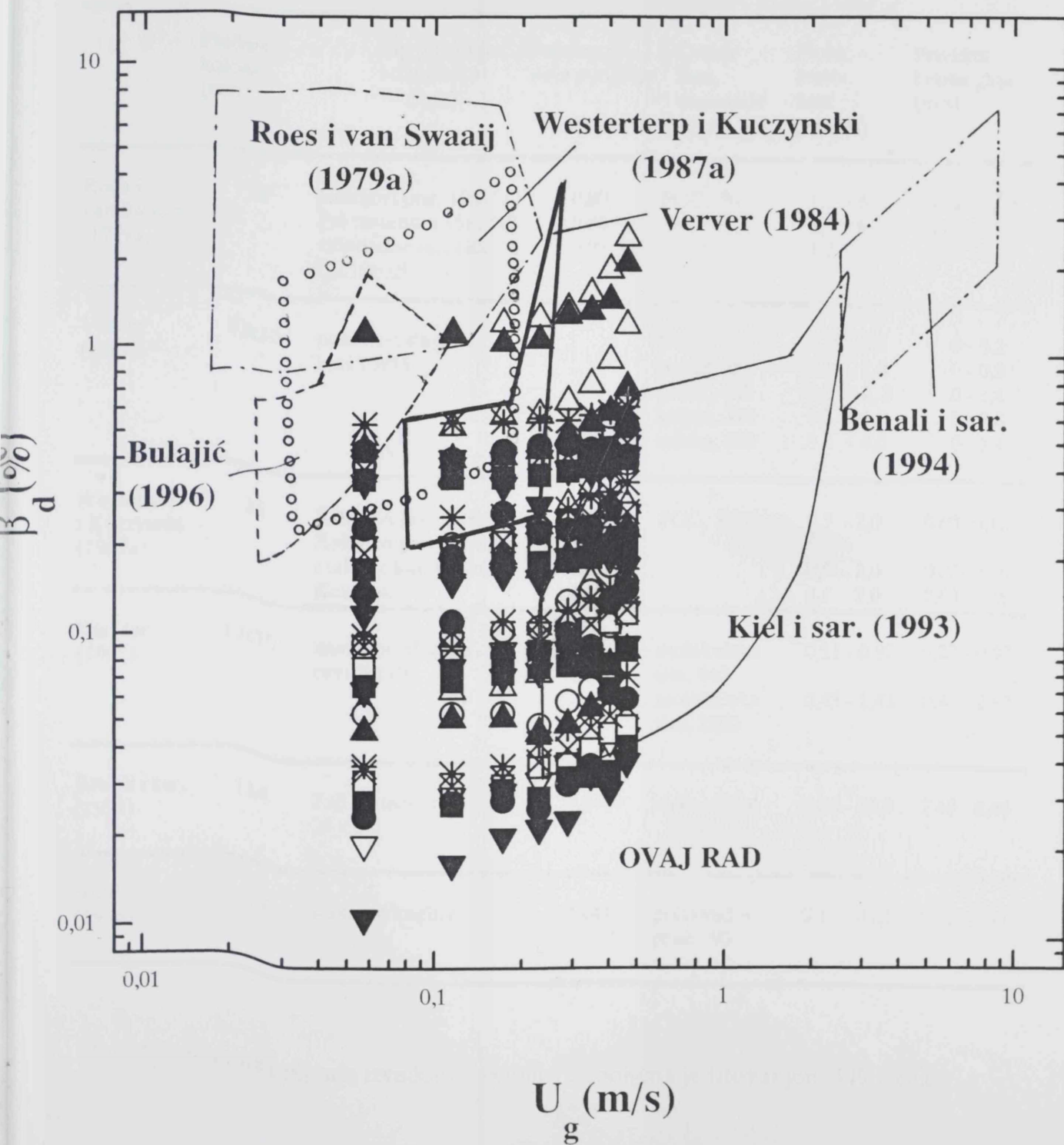
Radi potvrde valjanosti predloženog načina predviđanja β_d izvedene su i korelacije za predviđanje β_d za zonu pre nakupljanja i za zonu nakupljanja i to na osnovu vrednosti β_d dobijenih u ovom radu za punjenja pravilne geometrije (Raschigovi prstenovi-12, Raschigovi prstenovi-30, keramičke kuglice i Pall prstenovi) i podatke drugih autora (*Tabela 3.2.1.*). Pri izvodjenju ove korelacije korišćena su punjenja pravilne geometrije jer je za ova punjenja kao i punjenja drugih autora bilo moguće izračunati ekvivalentni prečnik na osnovu izraza (Westerterp i Kuczynski, 1987a):

$$d_e = \frac{6(1-\varepsilon)}{S_v + 4/D} \quad (3.2.12)$$

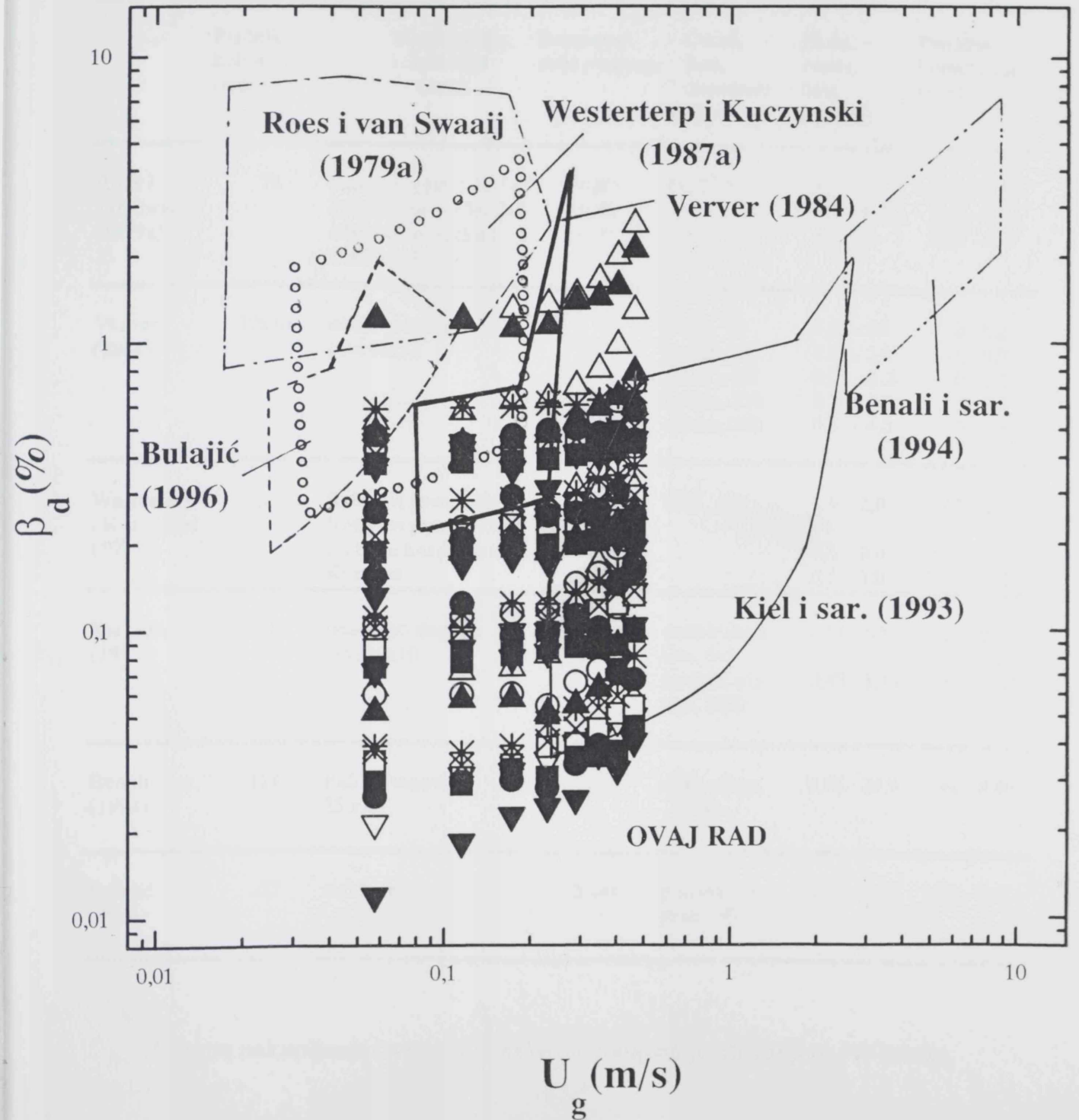
Predložena korelacija za zonu pre nakupljanja (dobijena fitovanjem 308 tačaka) je oblika:

$$\beta_d = 2237,12 \text{ Fr}^{0,52} \text{ Ar}^{-0,08} (d_e / D)^{0,09} \varepsilon^{0,60} (1-\varepsilon)^{0,64} \quad (3.2.13)$$

sa koeficijentom korelacije $R = 0,97$ i standardnom greškom eksponenata 1,9-44,9%. Najveća greška eksponenta dobijena je za član (d_e/D) . Poredjenje eksperimentalnih i izračunatih vrednosti β_d za zonu pre nakupljanja prikazano je na *Sl. 3.2.18*.



Slika 3.2.17. Poredjenje rezultata dosadašnjih ispitivanja sa rezultatima ovog rada za dinamički sadržaj čvrste faze.



Slika 3.2.17. Poredjenje rezultata dosadašnjih ispitivanja sa rezultatima ovog rada za dinamički sadržaj čvrste faze.

Tabela 3.2.1. Eksperimentalni uslovi fluidodinamičkih ispitivanja sistema gas-čvrsto-punjenje prikazanih u literaturi.

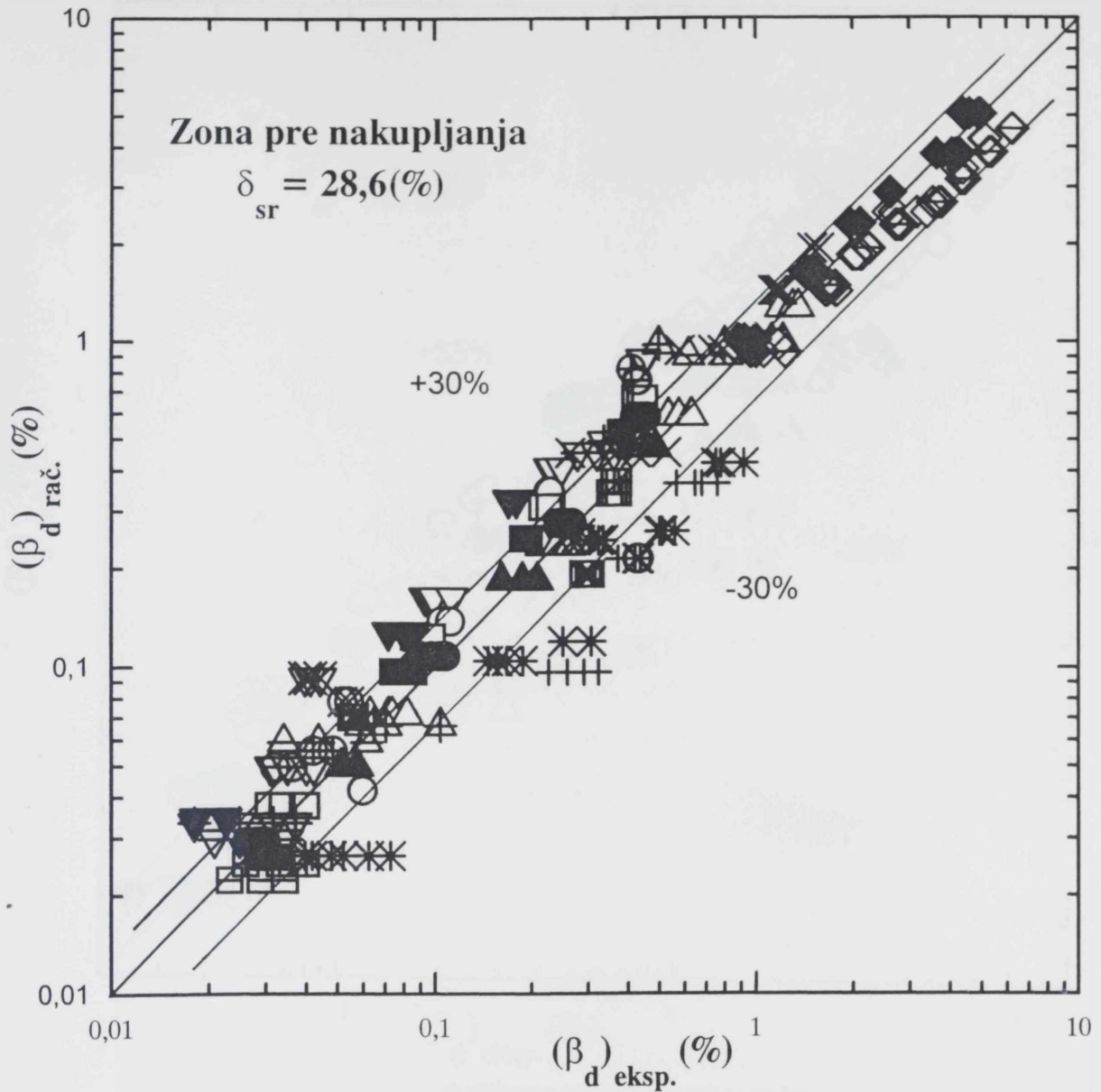
	Prečnik kolone (mm)	Tip punjenja i dimenzije (mm)	Poroznost sloja punjenja	Čvrsta faza, dimenzije (μm)	Fluks čvrste faze ($\text{kg/m}^2\text{s}$)	Prividna brzina gasa (m/s)
Roes i van Swaaij (1979a)	76	Rašigovi prst. 10x10x1	0,80	FCC, 70	1,1 - 6	0,02 - 0,19
		Pal prstenovi 15x15x2	0,86		1,3 - 6	0,02 - 0,23
		cilindrične mrežice 10x10x0,5	0,97		1,3 - 6	0,02 - 0,17
Verver (1984)	10x10	unakrsno slagane cevi 15x15		FCC, 70	0,03 - 0,8	0 - 0,2
				pesak, 255	0,1 - 2,4	0 - 0,9
				pesak, 425	0,2 - 2,2	0 - 1,4
				sačma, 310	0,3 - 4,8	0 - 2,8
				sačma, 880	0,3 - 4,0	0 - 5,4
Westerterp i Kuczynski (1987a)	25	Rašigovi prst. 8x8x3	0,45	FCC, 80	0,5 - 2,0	0,03- 0,16
		Rašigovi prst. 7x7x3 i tablete katalizatora	0,58			
		Kerapak	0,75			
Kiel sar. (1993)	10x10	unakrsno slagane cevi 10x10	0,75	molekulska sita, 640	0,11 - 0,92	0,22 - 0,92
				molekulska sita, 2200	0,43 - 1,43	0,46 - 2,62
Benali i sar. (1994)	114	Pall prstenovi 25 x 25	0,848	cirkonijum, 1320	6,86 - 24,9	2,49 - 8,46
Bulajić (1996)	27	staklene kuglice	0,444	poliamidni prah, 90	0,16 - 0,63	0,02 - 0,11

Za zonu nakupljanja izvedena korelacija dobijena je fitovanjem 449 tačaka:

$$\beta_d = 183,4 \text{ Re}^{0,10} \text{ Fr}^{0,41} \text{ Ar}^{-0,12} (d_e / D)^{-0,21} (1 - \varepsilon)^{0,48} \quad (3.2.14)$$

sa koeficijentom korelacije $R = 0,96$ i standardnom greškom eksponenata 2,5-24,5%. Poredjenje eksperimentalnih i izračunatih vrednosti β_d za zonu nakupljanja prikazano

je na *Sl. 3.2.19*. Najveća odstupanja i za zonu pre nakupljanja i za zonu nakupljanja pokazuju rezultati Ververa (1984) i Kiela i sar. (1993). Uočena odstupanja moguće je objasniti tipom punjenja koje su koristili navedeni autori. Verver (1984) je koristio punjenje u obliku unakrsno slaganih cevi kvadratnog preseka, a Kiel i sar. (1993) unakrsno slagane cevi kružnog poprečnog preseka čime su minimizirali statički sadržaj čvrstog. Iako se ovako dizajniran tip punjenja bitno razlikuje od komercijalnih nasutih punjenja koja su koristili ostali autori, čiji su podaci korišćeni pri izvodjenju korelacija *3.2.13* i *3.2.14* i ovi podaci su uzeti u obzir da bi se dobio što opštiji oblik korelacija. Kod punjenja korišćenih u ovom radu, najveća odstupanja daju keramičke kuglice, a do istih zapažanja se došlo i kod korelacija za predviđanje pada pritiska. Dobijena odstupanja su najverovatnije posledica male poroznosti sloja punjenja.



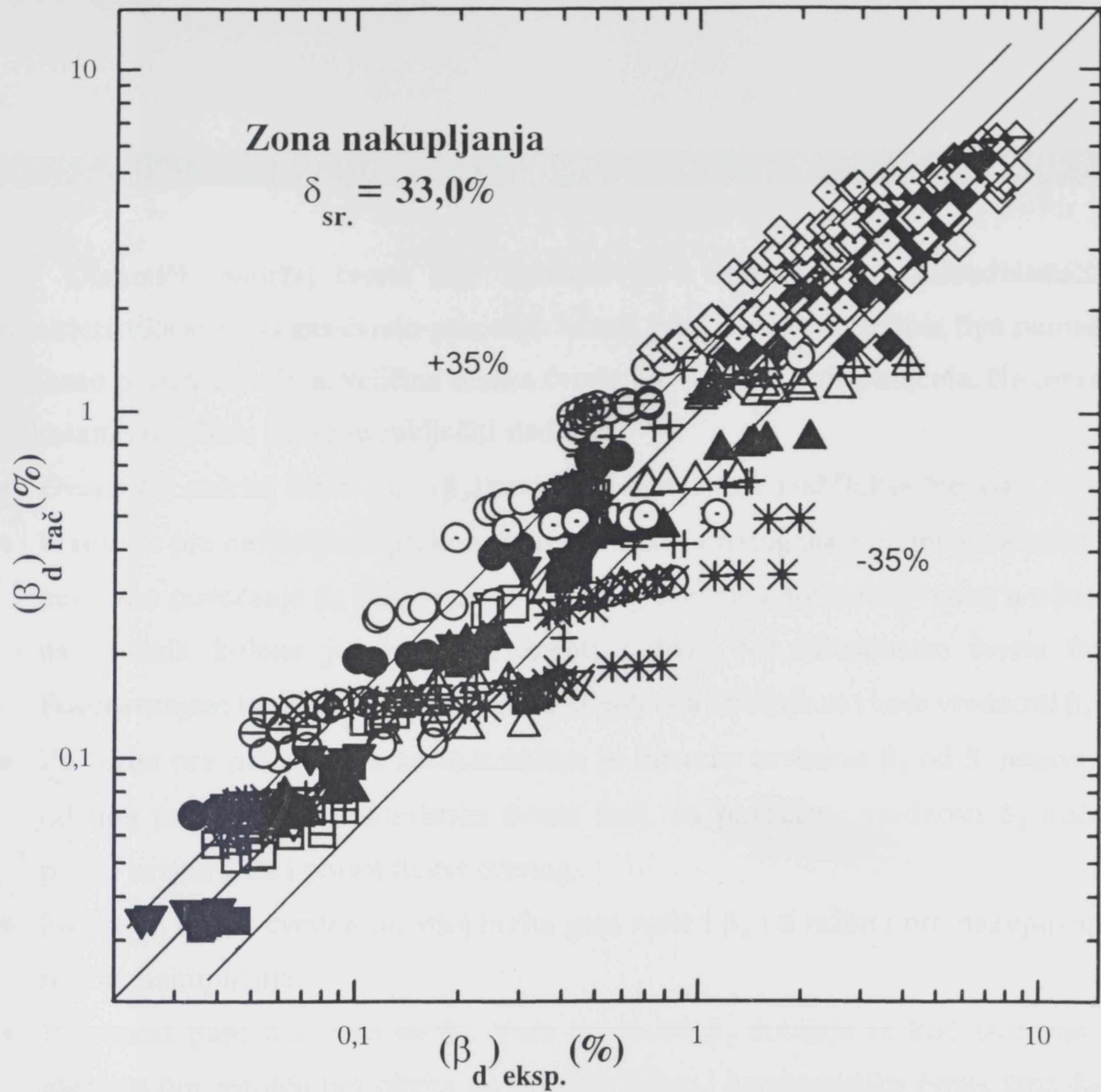
Ispitivana punjenja u ovom radu:

- | | |
|---------------------------------|---|
| △ Raschig-12(pesak) | ⊠ Raschig-12 (pesak 125-200 μm) |
| ▽ Raschig-30(pesak) | ⊡ Raschig-12(pesak 200-315 μm) |
| ○ Ker. kuglice (pesak) | ⊣ Raschig-30(pesak 125-200 μm) |
| □ Pall (pesak) | ⊤ Raschig-30(pesak 200-315 μm) |
| ▲ Raschig-12(propant) | ⊗ Raschig-30(mlev.kamen 710-1000 μm) |
| ▼ Raschig-30(propant) | ⊕ Ker. kuglice (pesak 125-200 μm) |
| ● Ker. kuglice (propant) | ⊖ Ker. kuglice (pesak 200-315 μm) |
| ■ Pall (propant) | ⊗ Ker. kuglice (mlev.kamen 710-1000 μm) |
| ⊞ Pall (pesak 125-200 μm) | |
| ⊠ Pall (pesak 200-315 μm) | |
| ⊡ Pall (mlev.kamen 710-1000 μm) | |

Literaturni podaci:

- | | |
|----------------------------|----------------------------|
| ◇ Roes (Raschig prstenovi) | × Westerterp (Raschig pr.) |
| ◆ Roes (Pall prstenovi) | * Kiel (kvadratne cevi) |
| ◊ Roes (cilindr. mrežice) | + Verver (kvadratne cevi) |

Slika 3.2.18. Poredjenje eksperimentalnih i izračunatih vrednosti za dinamički sadržaj čvrste faze na osnovu jednačine 3.2.13. (sopstveni rezultati i literaturni podaci)



Ispitivana punjenja u ovom radu:

- | | |
|---------------------------------|---|
| △ Raschig-12(pesak) | ⊕ Raschig-12(pesak 125-200 μm) |
| ▽ Raschig-30(pesak) | ⊖ Raschig-12(pesak 200-315 μm) |
| ○ Ker. kuglice (pesak) | ⊕ Raschig-30(pesak 125-200 μm) |
| □ Pall (pesak) | ⊖ Raschig-30(pesak 200-315 μm) |
| ▲ Raschig-12(propant) | ⊗ Raschig-30(mlev.kamen 710-1000 μm) |
| ▼ Raschig-30(propant) | ⊕ Ker. kuglice (pesak 125-200 μm) |
| ● Ker. kuglice (propant) | ⊖ Ker. kuglice (pesak 200-315 μm) |
| ■ Pall (propant) | ⊗ Ker. kuglice (mlev.kamen 710-1000 μm) |
| ⊕ Pall (pesak 125-200 μm) | |
| ⊖ Pall (pesak 200-315 μm) | |
| ⊗ Pall (mlev.kamen 710-1000 μm) | |

Literaturni podaci:

- | | |
|----------------------------|---------------------------|
| ◇ Roes (Raschig prstenovi) | * Kiel (kvadratne cevi) |
| ◆ Roes (Pall prstenovi) | + Verver (kvadratne cevi) |
| ◊ Roes (cilindr. mrežice) | ○ Bulajić(staklene kugl.) |
| × Westerterp (Raschig pr.) | ◇ Benali (Pall prstenovi) |
| + Westerterp (Kerapak) | |

Slika 3.2.19. Poređenje eksperimentalnih i izračunatih vrednosti za dinamički sadržaj čvrste faze (jed. 3.2.14.) za sopstvene i literaturne podatke.

3.2.3. ZAKLJUČCI: Dinamički sadržaj čvrste faze

Dinamički sadržaj čvrste faze ispitivan je u zavisnosti od fluidodinamičkih karakteristika sistema gas-čvrsto-punjenje: brzine gasa, fluksa čvrste faze, tipa punjenja odnosno poroznosti sloja, veličine čestica čvrste faze i visine sloja punjenja. Na osnovu prikazanih rezultata može se zaključiti sledeće:

- ◆ Dinamički sadržaj čvrste faze (β_d) zavisi i od brzine gasa i od fluksa čvrstog.
- ◆ U režimu pre nakupljanja pri konstantnom fluksu čvrstog male brzine gasa utiču na neznatno povećanje β_d što je posledica malog prečnika dozatora čvrstog u odnosu na prečnik kolone jer su eksperimenti radjeni bez distributora čvrste faze. Povećavanjem brzine gasa iznad tačke nakupljanja dobijaju se i veće vrednosti β_d .
- ◆ Za režim pre nakupljanja karakteristična je linearna zavisnost β_d od S , nezavisno od tipa punjenja i karakteristika čvrste faze. Na povećanje vrednosti β_d utiče i porast brzine gasa i porast fluksa čvrstog.
- ◆ Porastom fluksa čvrstog pri istoj brzini gasa raste i β_d i u režimu pre nakupljanja i režimu nakupljanja.
- ◆ Poroznost punjenja utiče na β_d . Veće vrednosti β_d dobijaju se kod punjenja sa manjom poroznošću bez obzira na veličinu fluksa i karakteristike čvrste faze. Kod punjenja sa većom poroznošću dobijaju se manje vrednosti β_d . Sa porastom U_g i S razlike u dobijenim vrednostima β_d između pojedinačnih punjenja se smanjuju.
- ◆ Oblik elemenata punjenja takodje utiče na β_d . Ovaj uticaj je uočljiviji kod punjenja sa manjom poroznošću gde oblik punjenja ima izrazit uticaj na β_d čak i u slučaju približnih poroznosti sloja (lomljeni kamen, $\varepsilon = 0,426$ i keramičke kuglice, $\varepsilon = 0,474$).
- ◆ Kod punjenja pravilne geometrije (Raschigovi prstenovi-12, Raschigovi prstenovi-30, keramičke kuglice i Pall prstenovi), uočeno je da manje čestice uzrokuju veće vrednosti β_d . Porastom fluksa čvrstog, i pored povećanja brzine gasa kod svih ispitivanih punjenja, smanjuje se uticaj veličine čestica na β_d .
- ◆ S obzirom da su eksperimenti radjeni bez distributora čvrste faze, uočeno je da punjenja manje poroznosti, nezavisno od oblika elemenata punjenja, imaju dobre

distributivne osobine. Čvrsta faza se preraspodeljuje već na vrhu kolone pri uvodjenju u sloj punjenja.

- ◆ Najveće vrednosti β_d se dobijaju pri visini sloja koja ima najmanju poroznost. Efekat aglomeracije čestica uzrokuje dodatno povećanje β_d . Pri visinama sloja od 2 i 3 m. javlja se plavljenje čak i pri minimalnim brzinama gasa i maksimalnom fluksu čvrstog.
- ◆ Izvedene korelacije za predviđanje β_d daju dobro slaganje između eksperimentalnih i izračunatih vrednosti β_d .
- ◆ Predviđanje β_d kao funkcije samo parametara sistema gas-čvrsto-punjenje, dalo je zadovoljavajuće rezultate pri korelisanju rezultata ovog rada i literaturnih podataka.

3.3. STATIČKI SADRŽAJ ČVRSTE FAZE

Statički sadržaj čvrste faze (β_s), odnosno zaostala količina čvrstih čestica između elemenata punjenja u sloju nakon izdvajanja dinamičkog sadržaja čvrste faze, kao i ostale fluidodinamičke karakteristike, zavisi od brzine gasne i fluksa čvrste faze, veličine čestica i osobina punjenja. S obzirom da statički sadržaj predstavlja gubitak aktivnog dela čvrste faze, bilo u procesu razmene toplote ili mase, ili kao adsorbensa u hemijskim reakcijama, pri izboru tipa punjenja potrebno je voditi računa o geometriji elemenata punjenja, načinu punjenja kolone odnosno udelu praznina u nasutom sloju, kako bi se mogućnost zaostajanja čestica između elemenata punjenja svela na minimum.

Ispitivanja fluidodinamike sistema gas-čvrsto-punjenje od strane brojnih autora (vidi *Tabelu 1.1.*) ukazala su na otežano eksperimentalno određivanje statičkog sadržaja čvrste faze zbog:

- ◆ nepostojanja pouzdane metode koja bi omogućavala razdvojeno određivanje statičkog od dinamičkog sadržaja čvrste faze i
- ◆ konstrukcionih rešenja kolone, odnosno otežanog razdvajanja elemenata punjenja i zaostalih čestica čvrste faze u prazninama nasutog sloja.

Roes i van Swaaij (1979a) su pri određivanju statičkog sadržaja čvrste faze, kod nasutog punjenja (Raschigovi prstenovi, Pall prstenovi i cilindrične mrežice) vibrirali kolonu pomoću dva vibratora u trajanju od 1 min u odsustvu protoka vazduha i merili prikupljenu masu čvrste faze. Zaostalu količinu čvrste faze u sloju punjenja posle vibriranja kolone, merili su jedanput nakon demontiranja kolone i odvajanja od punjenja. Westerterp i Kuczynski (1987a) su pri merenju β_s praznili kolonu, odvajali punjenje (Raschigovi prstenovi, mešavina Raschigovih prstenova i tableta katalizatora i Kerapak) od čvrste faze prosejavanjem i merili prikupljenu masu čvrste faze. Zbog otežanog eksperimentalnog postupka Large i sar. (1981) su merili ukupni sadržaj čvrste faze bez razdvajanja na statički i dinamički.

Da bi izbegli kako otežan eksperimentalni postupak, tako i negativan udeo β_s na efikasnost kontaktora gas-čvrsto-punjenje, Verver i van Swaaij (1986a,b), kao i Kiel i

sar. (1989, 1992, 1993), koristili su specijalno dizajnirano punjenje u obliku unakrsno slaganih metalnih cevi različitog poprečnog preseka (kružnog, kvadratnog ili trougaonog). Ovako slaganim punjenjem pravilne geometrije onemogućili su zadržavanje čvrste faze u sloju, odnosno sveli su na zanemarljivu meru statički sadržaj čvrste faze.

S obzirom da su u ovom radu fluidodinamičke karakteristike ispitivane kod slobodno nasutog sloja komercijalnih punjenja (vidi *Tabelu 3.3.1.*), eksperimentalno je meren i statički sadržaj čvrste faze. Da bi se postiglo zadovoljavajuće razdvajanje statičkog od dinamičkog sadržaja, kolona je dizajnirana tako da je posle izdvajanja β_d punjenje pražnjeno otvaranjem metalnog nosača pričvršćenog za dno kolone bez razdvajanja sastavnih elemenata kolone (vidi *Sl. 2.1.*). Metalni nosač dna kolone, sa svojim rešetkastim delom, bio je istovremeno i distributor gasne faze, nosač punjenja i držač sabirnika sa slavinom za prikupljanje dinamičkog sadržaja čvrste faze. Punjenje iz kolone je istovremeno prosejavano pri pražnjenju, a prikupljena masa čvrste faze je zatim merena. Statički sadržaj je zatim računat prema *jed. 2.4.*

Statički sadržaj čvrste faze meren je kod tri tipa punjenja pri proticanju dve čvrste faze i pri različitim visinama punjenja u koloni što je prikazano u *Tabeli 3.3.1.*

Tabela 3.3.1. Eksperimentalni uslovi merenja statičkog sadržaja čvrste faze.

Tip punjenja	Poroznost sloja ε (%)	Čvrsta faza d (μm)	Visina sloja (m)
Lomljeni kamen (frakcija 8-11 mm)	42,6	pesak, 253,3	1, 2 i 3
Keramičke kuglice (19 mm)	47,4	propant, 642,2	1
Raschigovi pr. (12 x 12)	61,1	pesak, 253,3 propant, 642,2	1, 2 i 3 1

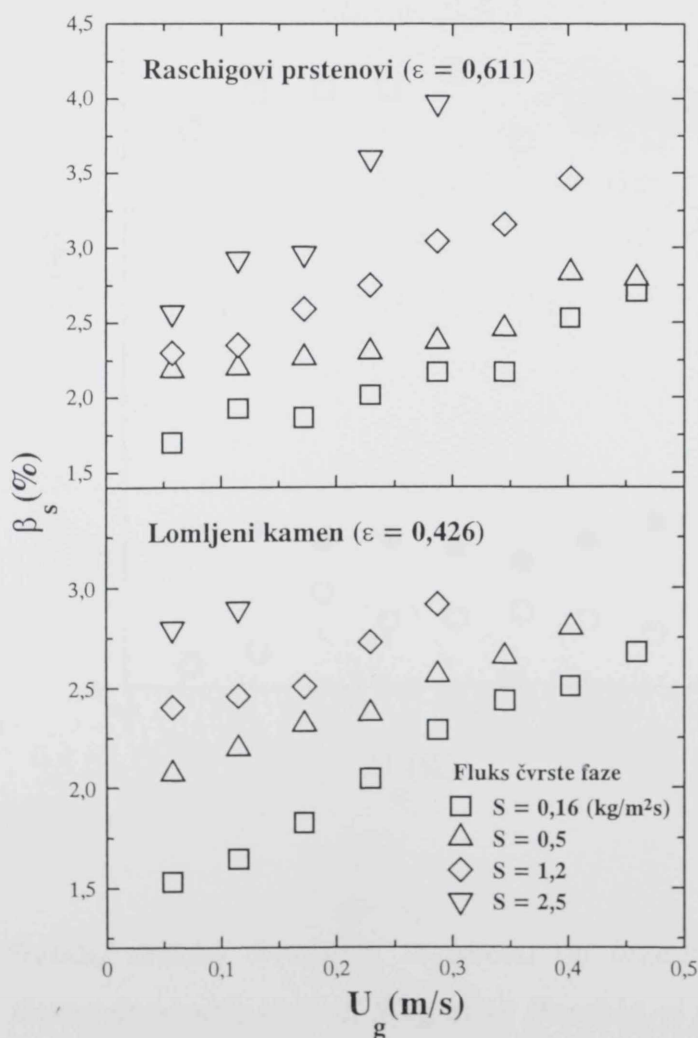
Zbog eksperimentalnog postupka određivanja statičkog sadržaja za pojedinačnu vrednost brzine gasa i fluksa čvrstog, svakim novim nasipanjem kolone istim tipom punjenja dolazi do drugačije prostorne orijentacije elemenata punjenja što utiče na promenljivost nasute mase i poroznost sloja. Zbog toga, svaka kombinacija punjenja i čvrste faze je specifična sa efektima koji se odigravaju pri interakciji gas-čvrsto-punjenje (vidi poglavlje *1.3.2.*, *Sl. 1.2.*) tako da uticaj ovih efekata čini eksperimentalno

merenje β_s još nepredvidljivijim i kompleksnijim u izvodjenju zaključaka o međusobnom uticaju parametara sistema (brzina gasa, fluks čvrste faze, karakteristike punjenja i veličine čestica) na ovu fluidodinamičku karakteristiku.

3.3.1. Uticaj brzina pokretnih faza

Ispitujući uticaj prividne brzine gasa i fluksa čvrste faze na statički sadržaj čvrste faze Roes i van Swaaij (1979a) su ukazali da pri malim brzinama gasa β_s ima konstantnu vrednost, a sa porastom brzine gasa neznatno se povećava. Na blago povećanje β_s sa porastom brzine gasa ukazali su i Westerterp i Kuczynski (1987a). Medjutim, navedeni autori ne ukazuju na zavisnost β_s od fluksa čvrste faze.

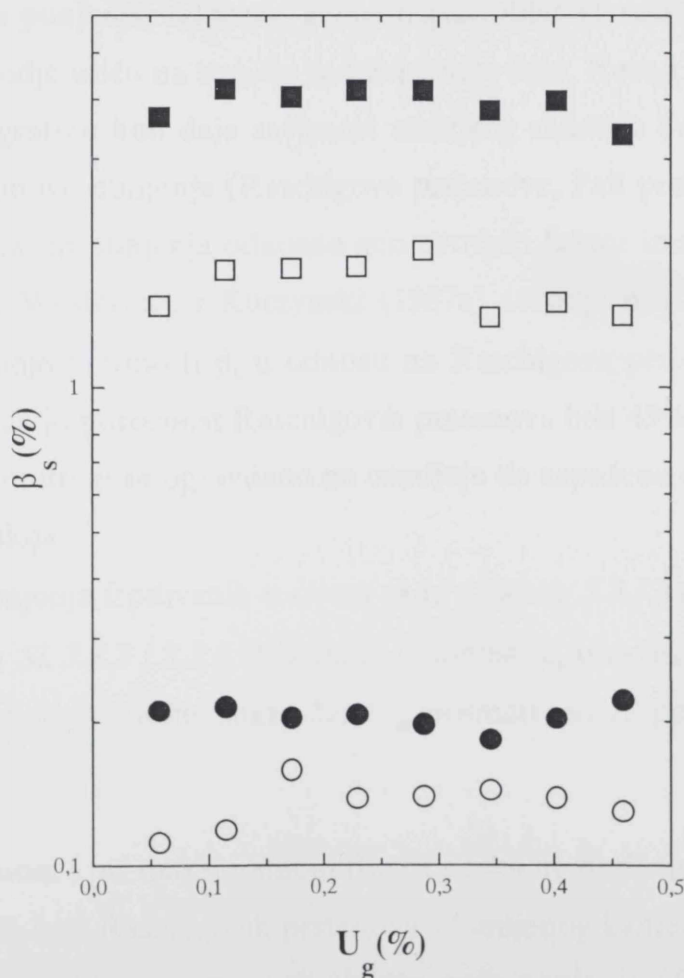
Eksperimentalne vrednosti statičkog sadržaja u zavisnosti od brzine gasa za



Slika 3.3.1. Statički sadržaj čvrstog u zavisnosti od brzine gasa pri različitom fluksu peska (90-630 μm).

ispitivanja punjenja (Tabela 3.3.1) prikazane su na Sl. 3.3.1. i 3.3.2. Dobijeni rezultati ukazuju na sledeće:

- ♦ Statički sadržaj (β_s) kod Raschigovih prstenova-12 i lomljenog kamena (Sl. 3.3.1.) raste i sa porastom U_g i sa porastom S nezavisno od tipa punjenja i karakteristika čvrste faze. Izrazitiji je uticaj fluksa čvrste faze na povećanje β_s u odnosu na uticaj U_g . Dok se pri brzinama gasa od 0,05-0,5 m/s i pri minimalnoj i pri maksimalnoj vrednosti fluksa peska β_s povećava oko 1,5 puta, dotle pri porastu fluksa peska od 0,16 na 2,5 kg/m²s, pri konstantnoj vrednosti brzine gasa, β_s se povećava oko 1,9 puta.



Slika 3.3.2. Statički sadržaj čvrstog u zavisnosti od brzine gasa pri različitom fluksu propanta; simboli S (kg/m²s): Raschigovi pr. □ - 0,14; ■ - 2,46; keramičke kuglice: ○ - 0,14; ● - 2,46.

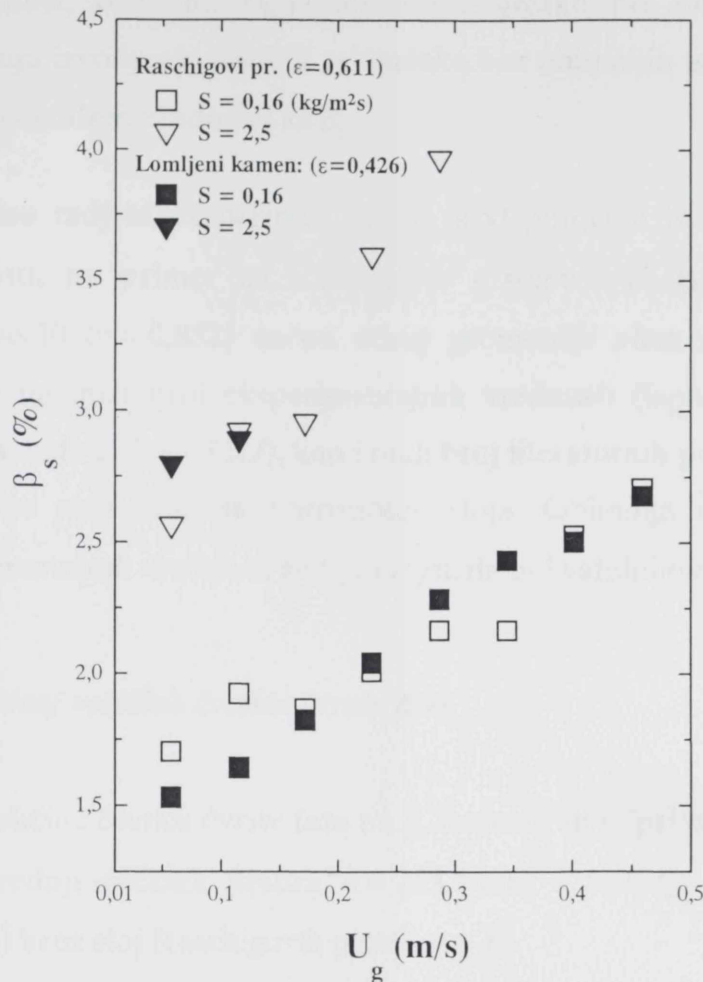
- ◆ Izrazitiji uticaj fluksa čvrste faze na povećanje vrednosti β_s u odnosu na uticaj brzine gasa je vidljiv i kod propanta (*Sl. 3.3.2.*). Ovde je sa porastom U_g i kod Raschigovih prstenova-12 i kod keramičkih kuglica β_s približno konstantan, dok porast fluksa čvrste faze pri istoj brzini gasa značajno utiče na povećanje vrednosti β_s ; kod keramičkih kuglica povećava se i do 1,8 puta, a kod Raschigovih prstenova do 2,5 puta.

3.3.2. Uticaj tipa punjenja

Karakteristike punjenja, odnosno geometrijski oblik elemenata punjenja, kao i poroznost sloja takodje utiču na statički sadržaj čvrste faze. Roes i van Swaaij (1979a) su na prikazanom grafiku koji daje zavisnost statičkog sadržaja čvrste faze od fluksa gasa za ispitivane tipove punjenja (Raschigove prstenove, Pall prstenove i cilindrične mrežice) pokazali da tip punjenja odnosno geometrijski faktor ima uticaja na statički sadržaj čvrste faze. Westerterp i Kuczynski (1987a) takodje navode da za Kerapak dobijaju znatno manje vrednosti β_s u odnosu na Raschigove prstenove, što je bilo i logično, s obzirom da je poroznost Raschigovih prstenova bila 45%, a Kerapaka 75%. Medjutim, ni jedni ni drugi se opravdano ne usudjuju da zapažene efekte pripisuju samo uticaju poroznosti sloja.

Uticaj tipa punjenja ispitivanih u ovom radu (*Tabela 3.3.1.*) na β_s pri proticanju gasa prikazan je na *Sl. 3.3.2 i 3.3.3.* Prikazane vrednosti β_s u zavisnosti od brzine gasa pri minimalnom i maksimalnom fluksu čvrstog posmatrano za pojedinačna punjenja ukazuju na sledeće:

- ◆ I pri minimalnom i pri maksimalnom fluksu peska ne dobijaju se velike razlike u vrednostima β_s kod Raschigovih prstenova i lomljenog kamena i pored razlika u geometrijskom obliku i poroznosti slojeva ovih punjenja (*Sl. 3.3.3.*). Medjutim, kod lomljenog kamena porastom fluksa čvrste faze već pri manjim brzinama gasa (0,287 m/s pri minimalnom, odnosno 0,115 m/s pri maksimalnom fluksu čvrste faze) dolazi do plavljenja kolone. Razlika u geometriji elemenata punjenja i poroznosti sloja očigledno imaju veći uticaj na promenu režima proticanja nego na vrednost β_s .



Slika 3.3.3. Uticaj tipa punjenja na statički sadržaj čvrste faze pri proticanju peska (90-630 mm).

- ♦ Uticaj geometrije elemenata punjenja na β_s veoma je izražen kada se porede Raschigovi prstenovi-12 sa keramičkim kuglicama, što je prikazano na Sl. 3.3.2. Iako je poroznost Raschigovih prstenova ($\epsilon = 61,1\%$) u odnosu na keramičke kuglice ($\epsilon = 47,4\%$) za oko 30% veća, dobijene vrednosti β_s kod Raschigovih prstenova su 12 odnosno 19 puta veće pri minimalnom, odnosno maksimalnom fluksu propanta. Naime, elementi ovog tipa punjenja imaju šupljine u kojima se takodje mogu zadržati čestice čvrstog. Iako se i kod lomljenog kamena kao i kod keramičkih kuglica može govoriti samo o poroznosti sloja a ne i o poroznosti elemenata punjenja, kao kod Raschigovih prstenova-12, pri proticanju peska nije uočena ovolika razlika u vrednostima β_s (Sl. 3.3.3.) kao pri proticanju propanta. Nedovoljno razjašnjeni efekti gomilanja čestica u sloju punjenja, kao i

nepreciznost, odnosno eksperimentalne greške pri razdvajanju β_d i β_s , ne omogućuju izvodjenje jasnijih zaključaka bez obimnijih istraživanja i većeg broja eksperimentalnih vrednosti za β_s .

- ◆ Pošto nisu radjeni eksperimenti za β_s kod punjenja iste geometrije a različite poroznosti, na primer za Raschigove prstenove-12 ($\varepsilon = 0,611$) i Raschigove prstenove-30 ($\varepsilon = 0,852$) uočen uticaj geometrije elemenata punjenja na β_s , s obzirom na mali broj eksperimentalnih vrednosti (ispitivana su samo tri tipa punjenja, vidi *Tabelu 3.3.1*), kao i mali broj literaturnih podataka, nije moguće sa sigurnošću povezivati sa poroznošću sloja. Obimnija istraživanja i veći broj eksperimentalnih vrednosti za β_s omogućila bi i validnije zaključke.

3.3.3. Uticaj veličine čestica čvrste faze

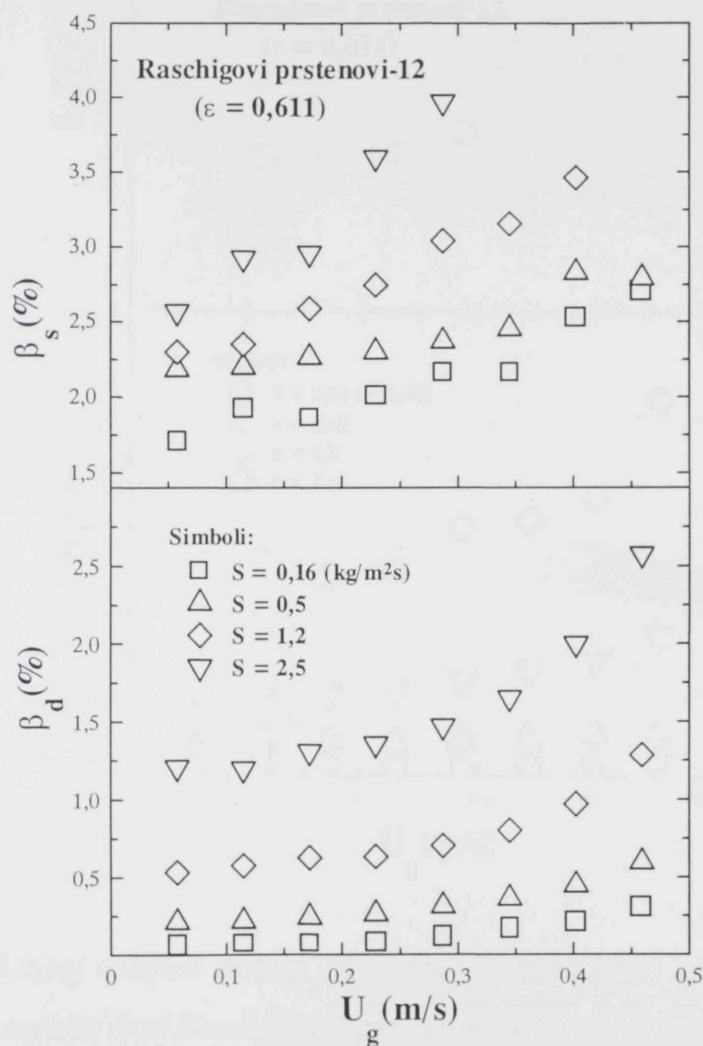
Uticaj veličine čestica čvrste faze na β_s posmatran je pri proticanju frakcije peska 90-630 μm (srednji prečnik čestica $d = 253,5 \mu\text{m}$) i frakcije propanta 250-1000 μm ($d = 642,2 \mu\text{m}$) kroz sloj Raschigovih prstenova-12.

Ako se posmatraju uporedo i β_s i β_d , uočeno je da ne samo veličina, već i oblik čestica ima uticaja na ove veličine.

Pri proticanju peska (*Sl. 3.3.4.* u režimu pre nakupljanja) β_d ne zavisi od brzine gasa dok β_s raste u celom opsegu brzina (0,06-0,46 m/s). Medjutim, pri proticanju propanta (*Sl. 3.3.5.*) uočeni su suprotni efekti. Brzina gasa utiče na povećanje vrednosti β_d u celom opsegu brzina, dok pri većim brzinama gasa dolazi i do opadanja vrednosti β_s .

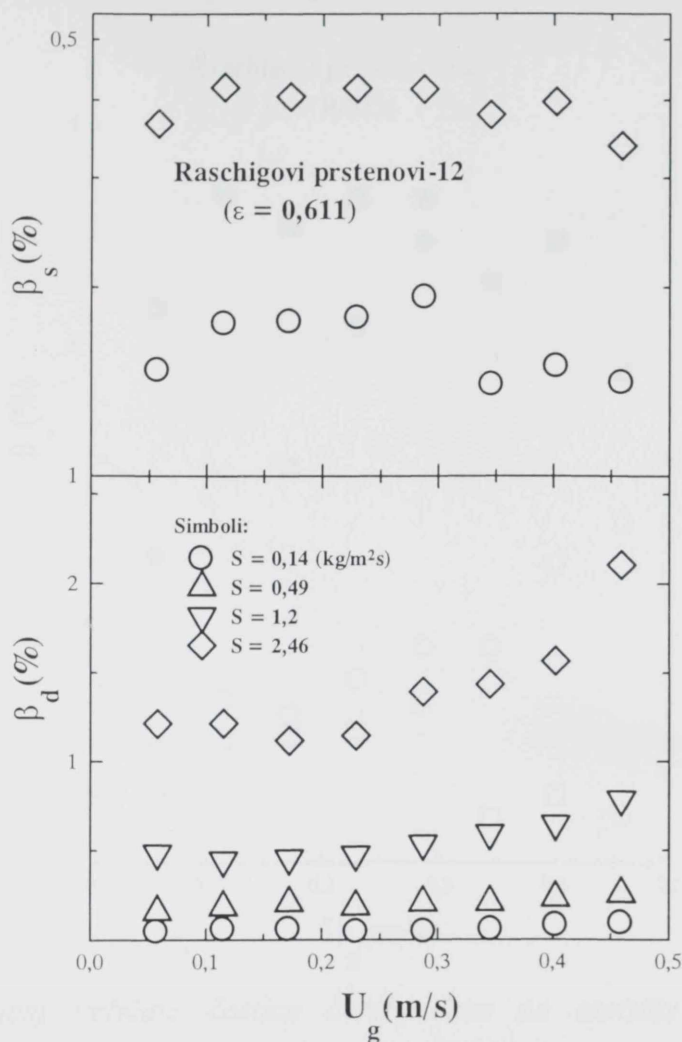
Uočene efekte čvrstih faza na ove dve karakteristike moguće je objasniti na osnovu oblika čestica. Kod peska (90-630 μm) iako najveći udeo čini frakcija 200-315 μm (do 53%) (vidi *Tabelu 2.1.*) tek pri većem fluksu i brzinama gasa dolazi do povećanja β_d . Medjutim, β_s raste pri svim vrednostima U_g i S , što bi se možda moglo povezati sa pljosnatim oblikom čestica peska i načinom popunjavanja praznina u sloju punjenja. Nasuprot tome, kod propanta najveći udeo ima frakcija 630-800 μm (do 66%), a za razliku od peska, čestice propanta su skoro sferične i lakše podležu

migraciji koja pri većim brzinama gasa utiče na povećavanje vrednosti β_d , odnosno smanjenje vrednosti β_s .



Slika 3.3.4. Uticaj veličine čestica peska (90-630 μm) na statički i dinamički sadržaj kod Raschigovih prstenova-12.

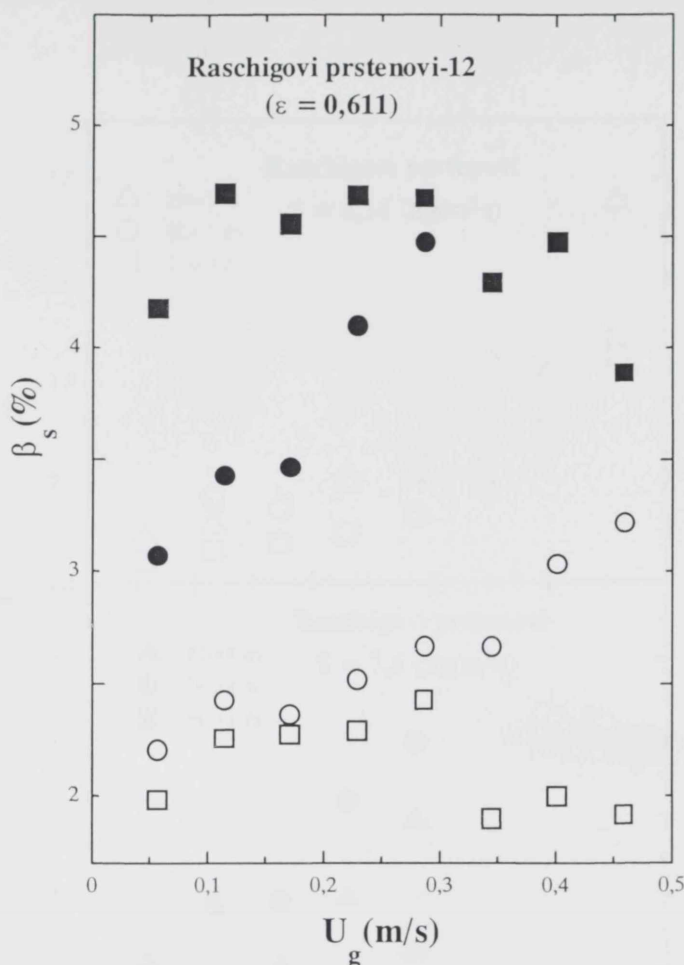
S obzirom da se uočeni efekti odnose samo na jedan tip punjenja (Raschigove prstenove-12), izvedene pretpostavke o uticaju ne samo veličine čestica već i oblika čestica na sadržaj čvrstog trebalo bi proveriti i kod drugih tipova punjenja.



Slika 3.3.5. Uticaj veličine čestica propanta (250-1000 μm) na statički i dinamički sadržaj kod Raschigovih prstenova-12.

Ako se uporedo posmatraju vrednosti β_s pri proticanju peska i propanta kroz sloj Raschigovih prstenova-12 (Sl. 3.3.6.) vidljivo je da se pri minimalnom fluksu dobijaju veće vrednosti β_s pri proticanju peska u odnosu na propant. Pri maksimalnoj vrednosti fluksa dobijaju se veće vrednosti β_s za propant u odnosu na pesak. Međutim, pri većim brzinama gasa β_s kod propanta opada.

I ovi rezultati idu u prilog pretpostavci o uticaju ne samo veličine već i oblika čestica na dobijene vrednosti statičkog sadržaja čvrstog.

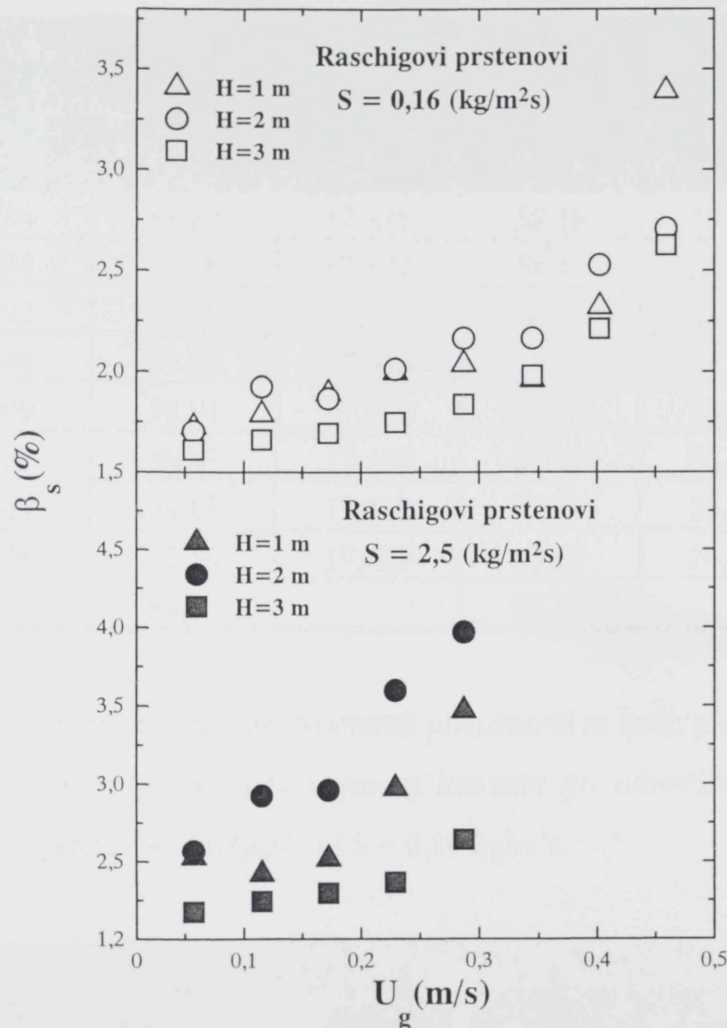


Slika 3.3.6. Uticaj veličine čestice čvrste faze na statički sadržaj. Simboli: S (kg/m²s): ○ - 0,16; ● - 2,5 (pesak, 90-630 μm); □ - 0,14, ■ - 2,46 (propant, 250-1000 μm).

3.3.4. Uticaj visine sloja punjenja

Uticaj visine sloja punjenja na statički sadržaj čvrste faze prikazan je na Sl. 3.3.7. i 3.3.8. Vidljivo je da se kod Raschigovih prstenova i pri minimalnoj i pri maksimalnoj vrednosti fluksa peska i istoj brzini gasa, dobijaju veće vrednosti β_s kod visine punjenja od 2 m (najmanja poroznost-vidi Tabelu 3.3.2.) u odnosu na visine 1 i 3 m. Ako se posmatra uticaj visine kolone na β_d (Sl. 3.2.14.) zapaža se suprotan efekat. Odnosno pri visini kolone od 2 m, i pri minimalnoj i pri maksimalnoj vrednosti fluksa peska dobijaju se manje vrednosti β_d u odnosu na visine punjenja 1 i 3 m. Pri maksimalnoj vrednosti fluksa peska najveće vrednosti β_s se takodje dobijaju za visinu sloja od 2 m.

Medjutim, različite visine sloja, pri maksimalnom flusku, bitno ne utiču na dobijanje različitih vrednosti β_d .



Slika 3.3.7. Uticaj visine punjenja na statički sadržaj čvrste faze za sloj Raschigovih prstenova-12 pri proticanju peska (90-630 μm).

Moguće objašnjenje za suprotan uticaj porasta visine punjenja na vrednosti β_s i β_d može se povezati sa poroznošću sloja. Naime, pri eksperimentalnom određivanju β_s za svaku pojedinačnu vrednost U_g , pri konstantnom flusku čvrstog, zbog pražnjenja kolone dobija se promenljiva masa punjenja, a time i poroznost što se vidi iz Tabela 3.3.2. i 3.3.3.

Tabela 3.3.2. Eksperimentalne vrednosti poroznosti za suvo punjenje (jed. 2.2) za različite visine Raschigovih prstenova-12 pri određivanju β_s pri fluksu peska (90-630 μm) od $S = 0,16 \text{ kg/m}^2\text{s}$.

Raschigovi prstenovi-12						
U_g (m/s)	H = 1 m		H = 2 m		H = 3 m	
	m (kg)	ε (%)	m (kg)	ε (%)	m (kg)	ε (%)
0,057	8,534	58,82	17,335	58,18	23,723	61,84
0,115	8,394	59,49	17,337	58,17	23,622	62,01
0,172	8,502	58,98	16,221	60,87	23,415	62,34
0,229	8,439	59,28	17,388	58,05	23,484	62,23
0,287	8,509	58,94	17,394	58,04	23,404	62,36
0,345	8,521	58,89	17,439	57,93	23,449	62,29
0,402	8,467	59,15	17,412	57,99	23,791	61,74
0,459	8,476	59,10	17,429	57,95	24,052	61,32
$(\varepsilon)_{\text{srednje}}$		59,08		58,39		62,02

Tabela 3.3.3. Eksperimentalne vrednosti poroznosti za suvo punjenje (jed. 2.2) za različite visine Lomljenog kamena pri određivanju β_s pri fluksu peska (90-630 μm) od $S = 0,16 \text{ kg/m}^2\text{s}$.

Lomljeni kamen						
U_g (m/s)	H = 1 m		H = 2 m		H = 3 m	
	m (kg)	ε (%)	m (kg)	ε (%)	m (kg)	ε (%)
0,057	12,901	39,55	25,409	40,47	39,286	38,64
0,115	112,932	39,41	24,981	41,48	38,981	39,12
0,172	12,957	39,29	24,708	42,11	38,885	39,27
0,229	13,093	38,65	24,797	41,91	38,782	39,43
0,287	12,856	39,76	25,027	41,37	39,042	39,02
0,345	12,797	40,04	25,238	40,87	39,279	38,65
0,402	12,812	39,97				
0,459	12,928	39,43				
$(\varepsilon)_{\text{srednje}}$		39,51		41,37		39,02

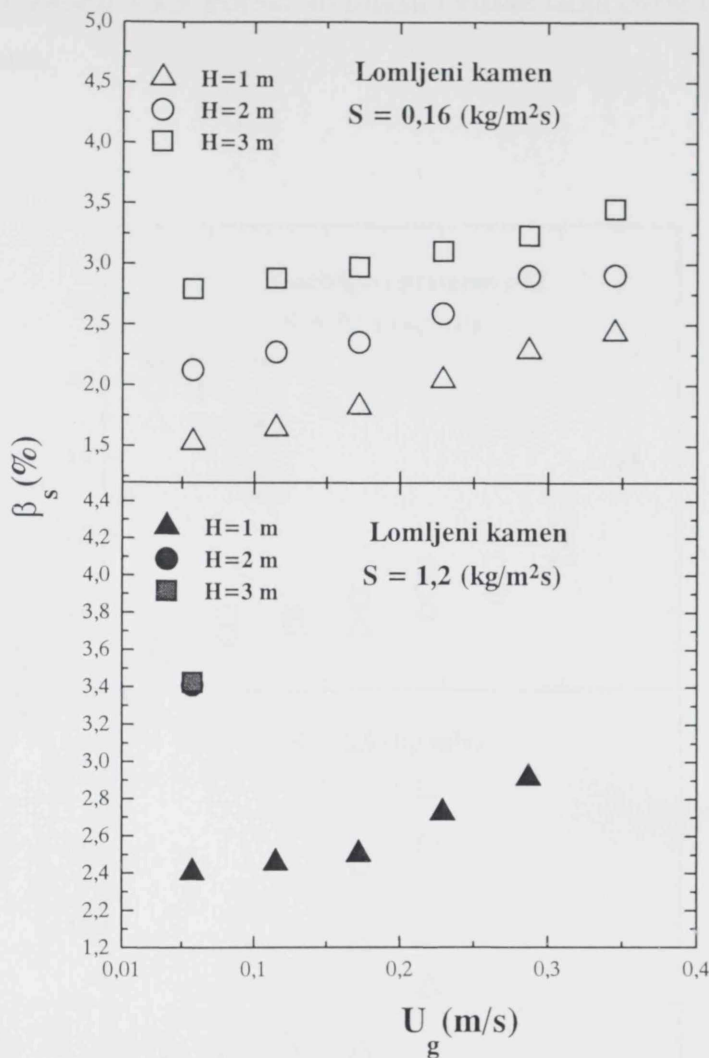
Medjutim, kod eksperimentalnog merenja β_d za ceo opseg brzina gasa (0,0574-0,459 m/s) i sve flukseve čvrstog, kolona je jednom punjena tako da je poroznost računata u odnosu na masu punjenja (*jed. 2.2.*) konstantna za pojedinačnu visinu (*Tabela 3.3.4.*).

Tabela 3.3.4. Eksperimentalne vrednosti poroznosti sloja pri ispitivanju uticaja visine sloja na β_d .

	Raschigovi prstenovi-12	Lomljeni kamen
Visina (m)	S = 0	S = 0
	ε (%)	ε (%)
1	61,10	42,60
2	63,12	44,51
3	62,52	38,21

Pri analizi uticaja visine na ovu karakteristike mora se uzeti u obzir i uticaj geometrije punjenja što pokazuju i podaci dobijeni za lomljeni kamen. Kod ovog tipa punjenja sa porastom visine kolone raste i statički sadržaj čvrste faze pri minimalnom fluksu peska (*Sl. 3.3.8.*) mada se takav trend ne bi mogao očekivati, s obzirom na poroznosti slojeva datih u *Tabeli 3.3.3.* Medjutim, već pri fluksu peska od 1,2 kg/m²s i najmanjoj brzini gasa javlja se efekat plavljenja pri visinama od 2 m i 3 m, tako da se ne može sa pouzdanošću govoriti o uticaju visine na β_s .

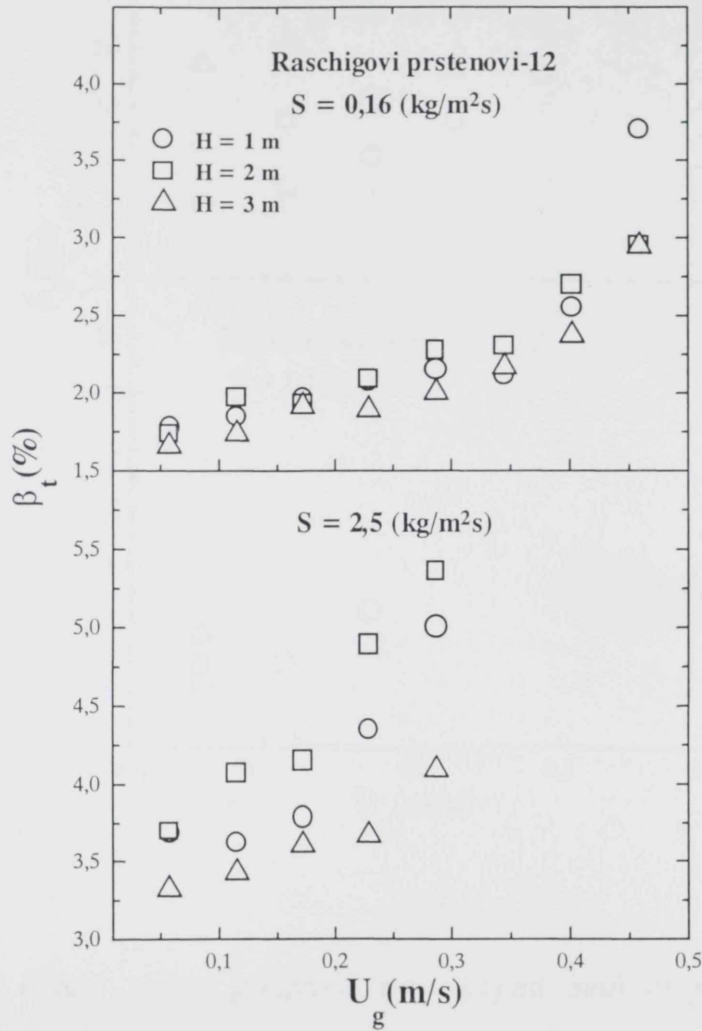
S obzirom da se i β_d i β_s izražavaju kao zapreminski udeo izmerene mase čvrste faze u odnosu na zapreminu kolone (*jed. 2.4.*) očito je da visina kolone ima uticaja na ove karakteristike. Medjutim, brza pojava plavljenja kolone kod lomljenog kamena pri većim visinama kolone, što smanjuje broj eksperimentalnih podataka, kao i različit uticaj visine kolone na vrednosti β_d i β_s kod Raschigovih prstenova ne daje mogućnost izvodjenja nekog opštijeg zaključka o uzrocima uticaja visine kolone na ove fluidodinamičke karakteristike.



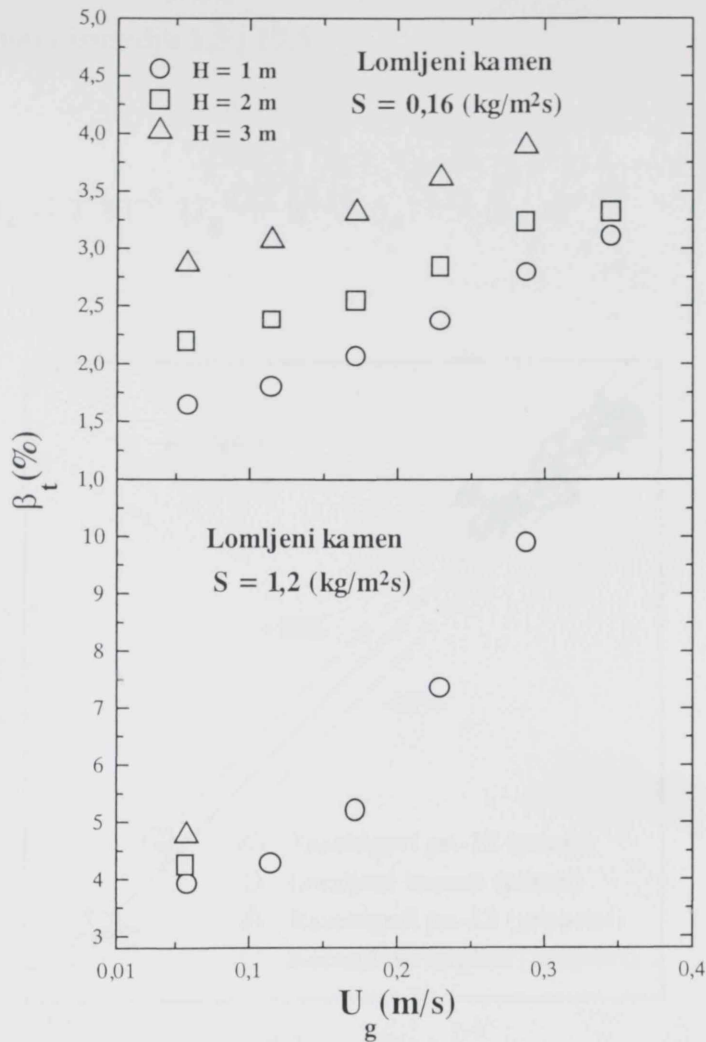
Slika 3.3.8. Uticaj visine punjenja na statički sadržaj čvrste faze za sloj lomljenog kamena pri proticanju peska ($90\text{-}630 \mu\text{m}$).

U dosadašnjim istraživanjima nije razradjena metoda tačnog razgraničenja dinamičkog i statičkog sadržaja čvrste faze, a uzimajući u obzir i manju tačnost pri eksperimentalnom određivanju ovih karakteristika u odnosu na pad pritiska, uputnije je uticaj visine posmatrati u odnosu na ukupni sadržaj čvrste faze, što je prikazano na Sl. 3.3.9. za Raschigove prstenove i Sl. 3.3.10. za lomljeni kamen. Kod Raschigovih prstenova-12 pri visini kolone od 2 m dobijaju se veće vrednosti β_t (najmanja poroznost- Tabela 3.3.2.) dok kod lomljenog kamena β_t raste sa porastom visine kolone pri minimalnom fluksu čvrstog što se, nažalost, ne može povezati sa poroznostiima

ovog sloja datim u *Tabeli 3.3.3*. Porastom fluksa i visine sloja ovog tipa punjenja dolazi do plavljenja kolone.



Slika 3.3.9. Uticaj visine punjenja na ukupan sadržaj čvrste faze za sloj Raschigovih prstenova pri proticanju peska (90-630 μm).



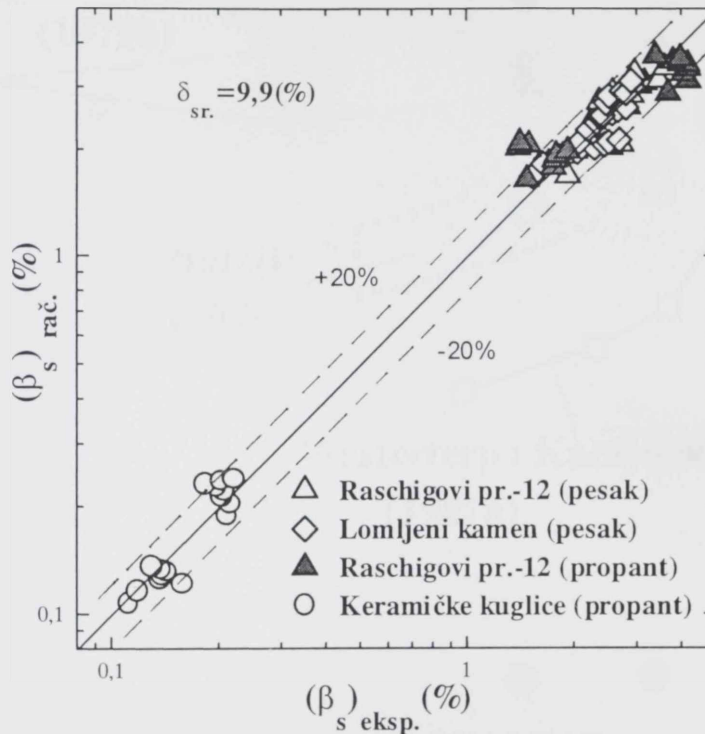
Slika 3.3.10. Uticaj visine punjenja na ukupan sadržaj čvrste faze za sloj lomljenog kamena pri proticanju peska (90-630 μm).

3.3.5. Predviđanje statičkog sadržaja čvrste faze

Pri izvodjenju korelacije za predviđanje β_s , uzete su sve eksperimentalne vrednosti za ceo opseg brzina gasa, odnosno fluksa čvrste faze, za visinu punjenja od 1 m, bez podele na režime kao pri izvodjenju korelacija za ΔP i β_d . Naime, na osnovu grafika koji prikazuju funkcionalnu zavisnost β_s od U_g i S (Sl. 3.3.1 i 3.3.2.) nije uočen prelaz iz zone pre nakupljanja u zonu nakupljanja, a pri najvećem fluksu peska došlo je i do plavljenja kolone. Kod propanta porast brzine gasa nije znatno uticao na povećanje β_s pri datom fluksu čvrste faze. Fitovanjem 82 eksperimentalne tačke

dobijena je sledeća korelacija, sa koeficijentom korelacije $R = 0,99$ i standardnom greškom eksponenata izmedju 1,5 i 19,5 :

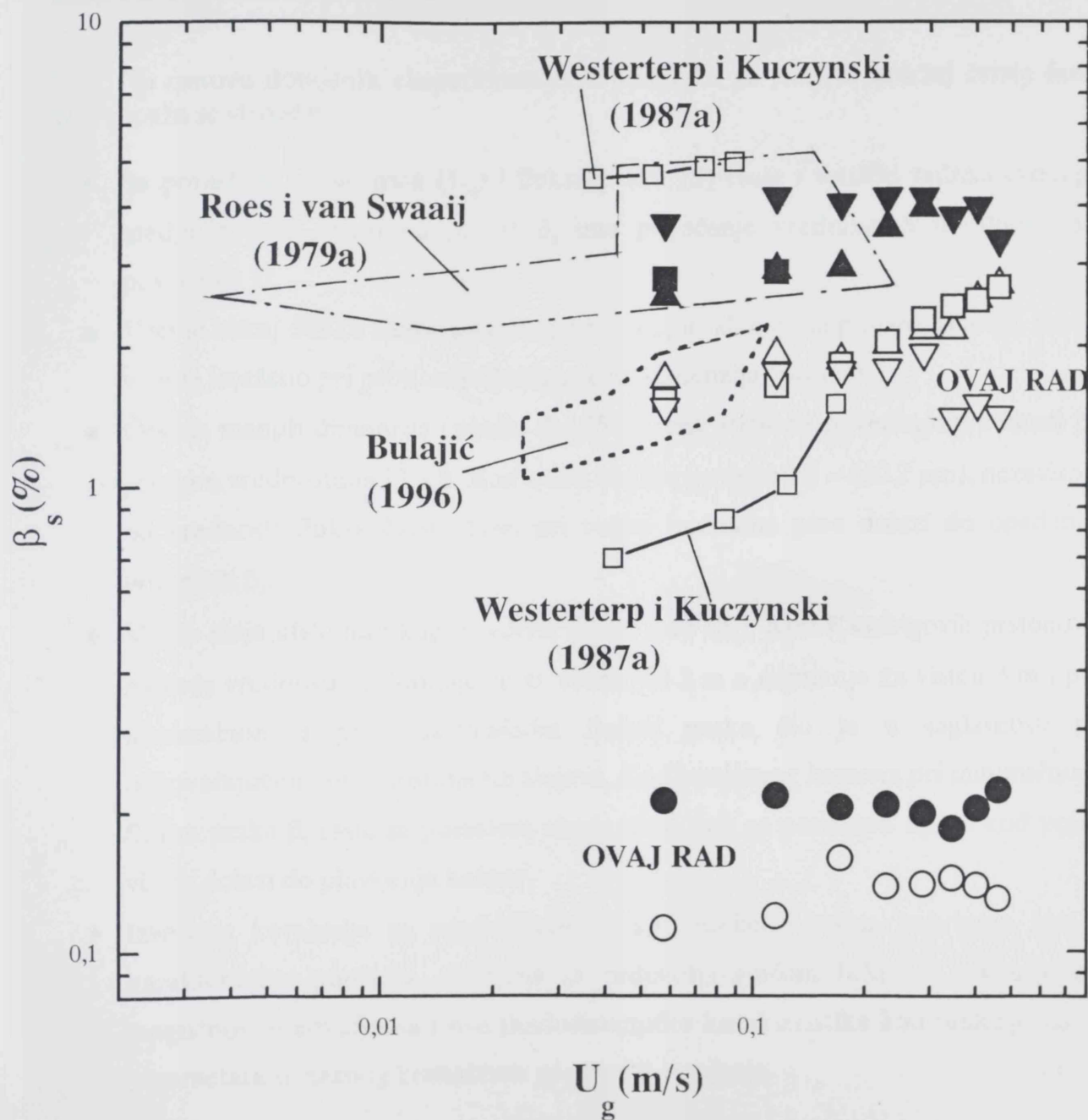
$$\beta_s = 1,7 \cdot 10^{-5} U_g^{0,12} S^{0,19} d_e^{-3,21} (1 - \varepsilon)^{4,95} \quad (3.3.1)$$



Slika 3.3.11. Poredjenje eksperimentalnih i izračunatih vrednosti β_s na osnovu korelacije 3.3.1.

Poredjenje eksperimentalnih i izračunatih vrednosti β_s prikazano je na Sl. 3.3.11. Veća odstupanja izmedju izračunatih i eksperimentalnih vrednosti za β_s dobijena je za Raschigove prstenove pri proticanju propanta.

Poredjenje literaturnih podataka za β_s sa rezultatima ovog rada (Sl. 3.3.12.) ukazalo je na veliko rasipanje rezultata. Takodje, za literaturne podatke (Roes i van Swaaij, 1979a; Westerterp i Kuczynski, 1987a) nije data ni zavisnost β_s od fluksa čvrste faze, pa zbog ovakve disperzije rezultata pokušaj korelisanja rezultata ovoga rada sa malobrojnim i nejasnim literaturnim podacima nije dao zadovoljavajuće rezultate.



Slika 3.3.12. Poredjenje rezultata dosadašnjih ispitivanja sa rezultatima ovog rada za statički sadržaj čvrste faze.

3.3.3. ZAKLJUČCI: Statički sadržaj čvrste faze

Na osnovu dobijenih eksperimentalnih podataka za statički sadržaj čvrste faze (β_s) zapaža se sledeće:

- ◆ Sa porastom brzine gasa (U_g) i fluksa peska (S) raste i statički sadržaj čvrstog, međutim veći uticaj na porast β_s ima povećanje vrednosti S u odnosu na povećanje U_g .
- ◆ Veći je uticaj oblika elemenata punjenja na β_s u odnosu na poroznost sloja, što je veoma izraženo pri proticanju čestica većih dimenzija (propant).
- ◆ Čestice manjih dimenzija (pesak, $d = 253,5 \mu\text{m}$) utiču na povećanje vrednosti β_s pri svim vrednostima U_g i S . Kod većih čestica (propant, $d = 642,2 \mu\text{m}$), nezavisno od vrednosti fluksa čvrste faze, pri većim brzinama gasa dolazi do opadanja vrednosti β_s .
- ◆ Visina sloja utiče na ukupni sadržaj čvrste faze (β_t). Kod Raschigovih prstenova najveće vrednosti β_t dobijaju se za visinu od 2 m a najmanje za visinu 3 m i pri minimalnom i pri maksimalnom fluksu peska što je u saglasnosti sa odgovarajućim poroznostima tih slojeva. Kod lomljenog kamena pri minimalnom fluksu peska β_t raste sa porastom visine sloja, dok sa porastom fluksa kod većih visina dolazi do plavljenja kolone.
- ◆ Izvedena korelacija za predviđanje β_s kao funkcije brzina pokretnih faza i karakteristika punjenja, dobijena sa zadovoljavajućom tačnošću, ukazuje na mogućnost predviđanja i ove fluidodinamičke karakteristike kao funkcije samo parametara trofaznog kontaktora gas-čvrsto-punjenje.

OPŠTI ZAKLJUČCI I MOGUĆI PRAVCI DALJIH ISTRAŽIVANJA FLUIDODINAMIKE KONTAKTORA GAS-ČVRSTO-PUNJENJE

Ostvarena istraživanja u ovom radu imala su za cilj da daju doprinos razjašnjenju fluidodinamike sistema gas-čvrsto-punjenje i definisanju osnovnih karakteristika ovog sistema: pada pritiska i dinamičkog i statičkog sadržaja čvrste faze.

Ispitivanja su ostvarena na najčešće korišćenim komercijalnim punjenjima: Raschigovim prstenovima, Pall prstenovima, Intaloks sedlima i cilindričnim mrežicama, kao i do sada ne korišćenim punjenjima (keramičke kuglice i lomljeni kamen).

S obzirom da do sada ostvarena istraživanja u literaturi ukazuju na mogućnost primene ovog tipa kontaktora ne samo za procese razmene toplote i procese adsorpcije, već i kao hemijskog reaktora, u ovom radu razradjena je i metoda za jednostavniji postupak eksperimentalnog određivanja statičkog sadržaja čvrste faze, koji se neminovno javlja kod komercijalnih punjenja. U literaturi ima malo podataka o statičkom sadržaju čvrste faze zbog komplikovanog eksperimentalnog određivanja na koje ukazuju brojni autori.

Na osnovu eksperimentalnih podataka dobijenih u ovom radu izvedene su korelacione jednačine za predviđanje pada pritiska i dinamičkog i statičkog sadržaja čvrste faze u zavisnosti od osnovnih parametara kontaktora: brzina gasne i čvrste faze, veličine čestica čvrste faze i karakteristika punjenja. Validnost predloženih korelacija proverena je i pri fitovanju podataka iz literature uz zadovoljavajuće rezultate.

Mogući dalji pravci istraživanja fluidodinamike kontaktora gas-čvrsto-punjenje mogli bi obuhvatiti:

- Ispitivanje uticaja distribucije čvrste faze na karakteristike kontaktora. Dosadašnja saznanja u literaturi ukazuju da distribucija čvrste faze ima uticaja na dinamički sadržaj čvrste faze (Roes i van Swaaij, 1979b) i prenos toplote (Large i sar., 1983),

- *Detaljnije ispitivanje distributivnih osobina punjenja na preraspodelu čestica čvrste faze, jer je u radu uočeno da pojedina punjenja preraspodeljuju čestice pri samom vrhu kolone (Raschigovi prstenovi-12, keramičke kuglice), dok se kod drugih tipova punjenja preraspodela ostvaruje po visini sloja punjenja (na primer kod Raschigovih prstenova-30, Pall prstenova),*

- *Ispitivanje načina proticanja pokretnih faza (Kaveeckij i sar., 1962; Roes i van Swaaij, 1979b),*

- *Detaljnija ispitivanja interakcije između punjenja i čestica i uticaj oblika punjenja i čestica na ta zbivanja,*

- *Bolje definisanje ekvivalentnog prečnika elemenata punjenja,*

- *Definisanje udela statičkog sadržaja u dinamičkom sadržaju čvrste faze.*

Nema literaturnih podataka o ovom efektu, a bilo bi od značaja zbog toga što je dinamički sadržaj aktivni udeo čvrste faze u procesima razmene toplote, adsorpcije ili hemijskim reakcijama, dok je statički sadržaj gubitak adsorbenta. Time bi se omogućilo njihovo jasnije definisanje ukoliko se ne razradi eksperimentalna metoda koja bi omogućila razgraničenje ove dve veličine.

SPISAK OZNAKA

C_D	- koeficijent trenja
D	- prečnik kolone, m
d	- srednji prečnik čestica čvrste faze, m
d_c	- ekvivalentni prečnik punjenja, m ($= 6(1-\varepsilon_p)/(S_v + 4/D)$) ili jed. (2.3)
d_i	- srednji prečnik frakcije čestica čvrste faze (jed. 2.1.), m
F_{gp}	- sila trenja između gasa i punjenja, N/m^3
F_{sp}	- sila trenja između čvrste faze i punjenja, N/m^3
G	- maseni fluks gasne faze, kg/m^2s
g	- gravitaciono ubrzanje, m/s^2
$K_L K_i$	- konstante u Ergunovoj jednačini (jed. 3.1.4.)
K_w	- faktor zida (jed. 3.1.6.)
L	- visina sloja punjenja u koloni, m
m	- izmerena masa dinamičkog odnosno statičkog sadržaja čvrste faze, kg
m_{ep}	- masa elementa punjenja, kg
m_p	- masa punjenja u koloni, kg
$\Delta P/L$	- pad pritiska po jedinici visine sloja punjenja, Pa/m
S	- maseni fluks čvrste faze, kg/m^2s
S_v	- specifična površina punjenja po jedinici zapremine sloja, m^2/m^3
U_g	- prividna brzina gasa, m/s
u_p	- brzina čestica čvrste faze, m/s
u_{slip}	- brzina klizanja čestica čvrste faze, m/s
V_k	- zapremina kolone, m^3
V_p	- zapremina punjenja, m^3
V_s	- zapremina šupljina u sloju punjenja, m^3
x_i	- maseni udeo frakcije čestica čvrste faze (jed. 2.1.)

Grčka slova

β_d	- dinamički sadržaj čvrste faze (%)
β_s	- statički sadržaj čvrste faze (%)
β_t	- ukupni sadržaj čvrste faze (%)
γ	- relativni pad pritiska
ε	- poroznost sloja punjenja
μ_g	- dinamička viskoznost gasa, $Pa s$
ν_g	- kinematska viskoznost gasa, m^2/s
ρ	- gustina čvrste faze, kg/m^3
ρ_g	- gustina gasa, kg/m^3
ρ_p	- gustina materijala od kojeg je punjenje, kg/m^3

Bezdimenzioni kriterijumi

Ar	- Archimedov broj pokretne čvrste faze ($Ar = d^3 \rho \rho_g g / \mu_g^2$)
Re	- Reynoldsov broj punjenja, ($Re = U_g d_c / \nu_g$)
Fr	- Froudeov broj pokretne čvrste faze, ($Fr = S^2 / (\rho^2 g \cdot D)$)

LITERATURA

- Benali, M. and Shakourzadeh-Bolouri, K., (1994), The gas-solid-solid packed contactor: hydrodynamic behavior of counter-current trickle of coarse and dense particles with a suspension of fine particles, *Int.J. Multiphase Flow*, 20, 161-170.
- Bulajić, M., (1996), Diplomski rad, Tehnološko-metalurški fakultet, Beograd.
- Claus, G., Vergnes, F. and Le Goff, P., (1976), Hydrodynamic study of gas and solid flow through a screen-packing, *Can. J. Chem. Engng.* 54, 143-147.
- Compagnie de Saint-Gobain, (1965), French Patent No. 1.469.109.
- Directie van de Staatsmijnen, (1948), French Patent, No.978287.
- Duduković, A. i Petrović, D., (1989), XI Sastanak kemičara Hrvatske, Zagreb.
- Kaveckij, G. D., Planovskij, A. N., Akopyan, L.A., (1962), Ob uchete prodol'nogo peremeshivaniya gaza i tverdogo zernistogo materiala v kolonne s nasadkoj, *Khim. Technol. Topliv i Masel*, 11, (6) 49-53.
- Kiel, J.H.A. and van Swaaij, W.P.M., (1989), A theoretical model for the hydrodynamics of gas-solid trickle flow over regularly stacked packings, *A.I.Ch.E. Symp. Ser.* 85, (270), 11-21.
- Kiel, J.H.A., (1990), Removal of sulphur oxides and nitrogen oxides from flue gas in a gas-solid trickle flow reactor, Ph.D. thesis, University of Twente, Enschede The Netherlands.
- Kiel, J.H.A., Prins, W. and van Swaaij, W.P.M., (1992), Modelling of non catalytic reactions in a gas-solid trickle flow reactor: dry, regenerative flue gas desulphurisation using a silica-supported copper oxide sorbent, *Chem. Engng.Sci.* 47, 4271-4286.
- Kiel, J.H.A., Prins, W. and van Swaaij, W.P.M., (1993), Mass transfer between gas and particles in a gas-solid trickle flow reactor, *Chem. Engng. Sci.* 48, 117-125.
- Kuczynski, M., (1986), The synthesis of methanol in a gas-solid-solid trickle flow reactor, Ph.D. thesis, University of Twente, Enschede, The Netherlands.

- Large, J.F., Naud, M., Guigon, P. and Bergougnou, M. A., (1981), Hydrodynamics of the raining packed-bed gas-solids heat exchanger, *Chem. Engng. J.*, 22, 95-100.
- Large, J.F., Guigon, P. and Saadjian, E., (1983), Multistaging and solids distributor effects in a raining packed bed exchanger, *Proc. 4th International Conference on fluidization, FLUIDIZATION, IV*, 389-396, Kashikojima, Japan.
- Mackowiak J., (1991), Pressure drop in irrigated packed columns, *Chem. Eng. Process*, 29, 93-105.
- Pavlov, K.F., Romankov, P.G. i Noskov, A.A., Primery i zadachi po kursu processov i apparatov khimicheskoy tehnologii, Izdatel'stvo "Khimiya", Leningrad, 1976, p. 97.
- Roes, A.W.M., (1978), The behaviour of gas-solid-packed column at trickle flow, Ph.D. thesis, University of Twente, Enschede, The Netherlands.
- Roes, A.W.M. and van Swaaij, W.P.M., (1979a), Hydrodynamic behavior of a gas-solid counter-current packed column at trickle flow, *Chem. Engng. J.*, 17, 81-89.
- Roes, A.W.M. and van Swaaij, W.P.M., (1979b), Axial dispersion of gas and solid phase in a gas-solid packed column at trickle flow, *Chem. Engng. J.*, 18, 13-28.
- Roes, A.W.M. and van Swaaij, W.P.M., (1979c), Mass transfer in a gas-solid packed column at trickle flow, *Chem. Engng. J.*, 18, 29-37.
- Saadjian, E. and Large, J.F., (1985), Heat transfer simulation in a raining packed bed exchanger, *Chem. Engng. Sci.* 40, 693-697.
- Saadjian, E. and Sardin, M., (1990), Heat transfer performance in a raining packed bed exchanger, CHISA '90.
- Satterfield, Ch.N., (1975), Trickle-bed reactors, *A.I.Ch.E. Journal*, 21, 209-228.
- Sherwood, T.K. and Pigford, R.L., Absorption and Extraction, McGraw-Hill, New York, 1952, p. 248.
- Shulman, H.L., Ullrich, C.F. and Wells, N., (1955), Total, static and operating holdups, *A.I.Ch.E. Journal*, 1, 247-253.

Tekić, M., Projektovanje kolona sa punjenjem, Tehnološki fakultet, Novi Sad, 1984.

Verver, A.B., (1984), The catalytic oxidation of hydrogen sulphide to sulfur in a gas-solid trickle flow reactor, Ph.D. thesis, University of Twente, Enschede, The Netherlands.

Verver A.B. and van Swaaij W.P.M., (1985), The rate of oxidation of hydrogen sulphide by oxygen to elemental sulphur over NaX and NaY zeolites and the adsorption of sulphur, *Appl. Catal.* 14, 185.

Verver A.B. and van Swaaij W.P.M. (1986a), The hydrodynamic behaviour of a gas-solid trickle flow over a regularly stacked packing, *Powder technology*, 45, 119-132.

Verver A.B. and van Swaaij W.P.M. (1986b), The heat-transfer performance of gas-solid trickle flow over a regularly stacked packing, *Powder technology*, 45, 133-144.

Verver, A.B. and van Swaaij, W. P. M., (1987), The gas-solid trickle-flow reactor for the catalytic oxidation of hydrogen sulphide: a trickle-phase model, *Chem. Engng Sci.* 42, 435-445.

Westerterp, K.R. and Kuczynski, M., (1987a), Gas-solid trickle flow hydrodynamics in a packed column, *Chem. Engng. Sci.* 42, 1539-1551.

Westerterp, K.R. and Kuczynski, M., (1987b), A model for a countercurrent gas-solid-solid trickle flow reactor for equilibrium reactions. The methanol synthesis, *Chem. Engng. Sci.* 42, 1871-1885.

Pregled objavljenih i prezentovanih radova na osnovu ostvarenih rezultata prikazanih u disertaciji:

1. Duduković, A., Predojević Z., Petrović D. i Pošarac, D., (1990), "Razvoj trofaznog reaktora gas-čvrsto-čvrsto: novi koncept u sintezi amonijaka", Naučni skup: jugoslovenska škola o hemijskim reaktorima, 9-13 april, Dubrovnik.
2. Predojević, Z., Petrović, D., Pošarac, D. i Duduković, A., (1991), "Pad pritiska i sadržaj pokretne čvrste faze u reaktoru gas-čvrsto-čvrsto", III jugoslovenski simpozijum o hemijskom inženjerstvu, 16-18 januar, Novi Sad.
3. Duduković, A., Predojević, Z., Petrović, D. and Pošarac, D., (1992), "The Influence of Type of Packing and Reactor Height on Flow Characteristics of the Gas Solid Reactor", J.Serb.Chem.Soc., 57 (5-6) 309-317.
4. Duduković, A., Petrović, D., Pošarac, D., Predojević Z. i Mandić, N., (1992), "Istraživanje novog koncepta za sintezu amonijaka", IX jugoslovenski kongres hemije i hemijske tehnologije, 26-29. maj, Herceg Novi.
5. Duduković, A., Predojević, Z., Petrović, D. i Pošarac, D., (1992), "Trofazni kontaktor gas-čvrsto-čvrsto", Zbornik radova Tehnološkog fakulteta, Novi Sad, 23 (1), 107-114.
6. Predojević, Z., Duduković, A., Petrović, D. and Pošarac, D., (1993), "The Influence of the Type of Packing and Reactor Height on the Flow Characteristics of a Gas-Solid- Solid Reactor", CHISA '93, 29 August -2 September, Praha.
7. Duduković, A., Predojević, Z., Petrović, D. and Milošević V., (1994), "Countercurrent Flow of Gas and Solids through a Fixed Bed of Solids", American Institute of Chemical Engineers, Annulus meeting, November 13-18, San Francisco .
8. Pjanović, R., Predojević, Z., Petrović, D. and Duduković, A., (1995), "Gas-Flowing Solids-Packed Bed Reactors", Chem. Ind. 49 (12) 535-540.
9. Duduković, A., Predojević, Z., Petrović, D. i Pjanović, R., (1995), "Trofazni kontaktori gas-čvrsto-čvrsto", Procesna Tehnika (3) 113-116.
10. Predojević, Z., Škrbić, B., Petrović, D. and Duduković, A., (1995), "Pressure drop determination in gas gas-solid-solid trickle flow reactor", Prossiding of the 37th International Conference on Petroleum, Abs. D.25-1-6, March, 14-17, Bratislava Czecho-Slovakia.
11. Petrović, D., Predojević, Z. and Duduković, A., (1995), "The flowing solids holdup in a three phase gas-flowing solids-fixed bed reactor", I.Ch.E. 2nd Italian Conference on Chemical Process Engineering, Abs. 861-865, 15-17 May, Firenze.
12. Predojević, Z., Petrović, D. i Duduković, A., (1995), "Uticaj visine i poroznosti nepokretnog sloja na hidrodinamičke karakteristike trofaznog reaktora gas-

čvrsto-čvrsto, XXXVII savetovanje srpskog hemijskog društva sa međunarodnim učešćem, 1-2. jun, Novi Sad.

13. Predojević, Z., Petrović, D. i Duduković, A., "Dinamički sadržaj pokretne čvrste faze u trofaznom reaktoru gas-nepokretan sloj-pokretna čvrsta faza", idem.
14. Predojević, Z., Petrović, D. i Duduković, A., "Padovi pritiska u trofaznom reaktoru gas-nepokretan sloj-pokretna čvrsta faza", idem.
15. Predojević, Z., Petrović, D. and Duduković, A., (1995), "Prediction of the Pressure Drop in Gas-Solid-Packed Bed Reactor for Treatment of Flue gases" I regional symposium: CHEMISTRY and the ENVIRONMENT, September 25-29, Vrnjačka banja.
16. Duduković, A., Predojević, Z. and Petrović, D., (1995), "Dynamic Hold-up and Pressure Drop in the Gas-Flowing Solids-Fixed Bed Reactor, American Institute of Chemical Engineering, Annual Meeting, Paper 133 a, November 12-17, Miami Beach.
17. Predojević, Z., Petrović, D. and Duduković, A., (1996), "Gas-Flowing Solids Hydrodynamics in a Packed Column", Third International Symposium and Exhibition on Environmental Contamination in Central and Eastern Europe, September 10-13, Warsaw, Poland.
18. Duduković, A., Pjanović, R., Kuzmanović, B., Predojević, Z. and Petrović D., (1996), "The Characteristics of the Gas-flowing Solids -Fixed Bed Reactor", AIChE Annual Meeting, Chicago, November.
19. Predojević, Z., Petrović, D. and Duduković, A., (1997), "Flowing Solids Dynamic Holdup in the Countercurrent Gas-Flowing Solids-Fixed Bed Reactor", Chem. Ing. Commun., 162, 1-13.

