



FLUIDO-MEHANIČKE KARAKTERISTIKE ISTOSTRUJNOG FONTANSKOG SLOJA

IZVOD

U ovom radu je analiziran rad istostrujnog fontanskog sloja sa centralnom cevi u sistemu čvrste čestice-voda. Eksperimenti su realizovani na polukoloni prečnika 196 mm, ukupne visine 860 mm, sa koničnim dnom ugla 110° . Mlaznica prečnika 20 mm je bila centralno postavljena, sa mogućnošću pomeranja vrha mlaznice ka početku centralne cevi, prečnika 25 mm. Kao ispunja kolone korišćene su staklene kuglice i granule PET-a, odnosno polietilena. Osnovni cilj rada je bio utvrđivanje fluido-mehaničkih parametara pri kojima je moguće formirati fontanski sloj kod koga bi jedan udeo čestica u anulusu bio potpuno potopljen u vodi, a gornji sloj čestica bi mogao biti u kontaktu sa vazduhom. Potencijalna primena ovakvih sistema bi mogla biti u procesima aeracije, odnosno degazacije vode.

Ključne reči: fontanski sloj, istostrujni tok, potopljeni anulus, aeracija, degazacija

UVOD

U cilju izvođenja što efikasnijih procesa, razvijeni su mnogobrojni višefazni strujni sistemi, koji obuhvataju veoma različite kombinacije i načine izvođenja kontakata između pojedinačnih faza, kao na primer:

dvofazni:

- fluid (gas ili tečnost) – čvrste čestice ;
- tečnost – gas;
- tečnost – tečnost odnosno,

trofazni sistemi:

- gas – tečnost – čvrste čestice;
- tečnost – tečnost – čvrste čestice.

Osnovna karakteristika ovih sistema je u tome što omogućavaju ostvarivanje veoma intenzivnog kontakta između pojedinačnih faza, praćenog značajnim brzinama prenosa količine kretanja, toplote i mase, kao i izvođenje složenih hemijskih i biohemijskih reakcija, u uređajima relativno jednostavne konstrukcije, velike efikasnosti i prihvatljivih utrošaka energije uz relativno lako održavanje i podešavanje uslova rada, *Mathur i Epstein, 1974., Littman i sar., 2009.*

Eksperimentalna i teorijska istraživanja pokazala su da se dvofazni pokretni slojevi fluid-čvrste čestice, koji pripadaju višefaznim strujnim sistemima, javljaju u formama kao što su :

- — nasut sloj,
- — fluidizovani sloj,
- — fontanski sloj,
- — fontansko-fluidizovani sloj,
- — fontansko-fluidizovani sloj sa centralnom cevi,
- — fontansko-fluidizovani sloj sa centralnom cevi i koničnim dnom

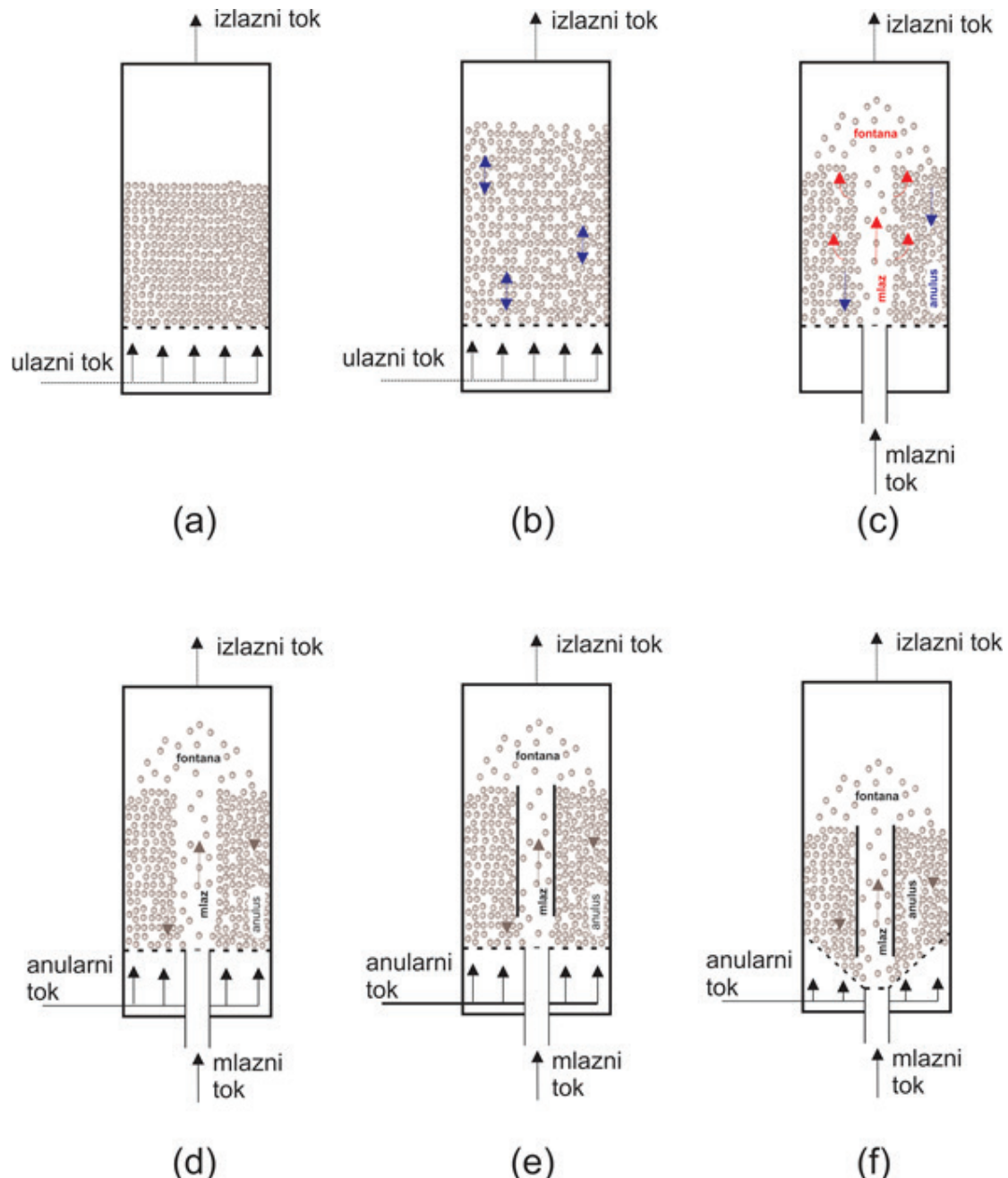
Ovi sistemi mogu se ostvariti u cilindričnoj koloni na čijem je ravnom dnu centralno ugrađena mlaznica i anularni raspodeljivač fluida pri određenim geometrijskim karakteristikama kolone i mlaznice, definisanim osobinama čestica i fluida, kao i odabranim opsezima protoka fluida.

Na slici 1. prikazani su pojedini tipovi dvofaznih pokretnih slojeva čvrste čestice-fluid, koje je moguće ostvariti u cilindričnoj koloni sa centralno postavljenom mlaznicom, ugrađenom u rešetkasto ravno dno kolone, koje istovremeno služi kao anularni raspodeljivač fluida pri različitim visinama sloja čestica i protoka fluida.

Različitim kombinacijama protoka fluida kroz mlaznicu i anularni raspodeljivač, kao i njihovih intenziteta može ostvariti niz različitih stanja strujanja fluida i kretanja čvrstih čestica u koloni, počev od stanja u kome se fluid kreće kroz sloj čestica koji je u stanju mirovanja, pa se za takvu vrstu kontaktora koristi naziv nasut sloj, slika 1.a. Peščani filtri ili jonoizmenjivačke kolone su klasični sistemi sa nasutim slojem čestica.

^a Univerzitet u Beogradu, Tehnološko-metalurški fakultet, Karnegijeva 4, Beograd, Srbija

^b Institut za tehnologiju nuklearnih i drugih mineralnih sirovina, Bulevar Franše Deperea 86, Beograd, Srbija



Slika 1. Tipovi disperznih sistema fluid-čestice

Ukoliko se fluid uvodi po čitavom poprečnom preseku kolone u nepokretni sloj čestica, pri dovoljno velikom protoku, fluid može imati dovoljnu energiju da savlada težinu sloja, nakon čega se može uspostaviti blago kretanje pojedinačnih čestica, odnosno čitavog sloja, čime se uspostavlja stanje minimalne fluidizacije, slika 1.b. Povećanjem protoka fluida, prelazi se u stanje razvijene fluidizacije, pri kojoj sloj prelazi u ekspanzivno stanje. Fenomeni fluidizovanog sloja se primenjuju kod ispiranja višeslojnih filtera, čime se omogućava ponovno formiranje filtra u istoj formi kao i pre ispiranja. Razvojem sistema sa mikrobiološkim filmom na inertnom nosaču, efekti fluidizovanog sloja mogu biti primenjeni i u različitim postupcima tretmana vode.

Ako se fluid uvodi samo kroz mlaznicu, centralno

postavljenu na dnu kolone sa nasutim slojem čestica, pri dovoljno velikom protoku, u jednom momentu, doći će do proboja mlaza fluida kroz sloj čestica i uspostaviće se stanje koje podseća na vodenu fontanu, pa se stoga ovako obrazovano kretanje čestica i naziva fontanski sloj, slika 1.c. Osnovna odlika ovog sistema je postojanje dve zone u samom sloju. Centralni deo je mlaz u kome fluid nosi čestice istostrujno naviše, a po izlasku iz zone sloja dospeva u zonu koja se naziva fontana. Nakon toga fluid nastavlja kretanje naviše, dok čestice padaju po površini zone čestica koje okružuju mlaz, tzv. anulus, u kome se čestice pod dejstvom gravitacije i podpritiska iz mlaza kreću naniže, dok se fluid koji penetrira iz mlaza kroz sloj, suprotnostrujno kreće naviše. Ovakvi sistemi, do sada, nisu imali značajniju primenu u tehnologiji vode, izuzev ukoliko se ovi fenomeni parcijalno ne koristi za umešavanje zrnastih materijala, u pojedinim uređajima.

Ako se fluid uvodi istovremeno i kroz anularni prostor i kroz mlaznicu uspostaviće se fontansko-fluidizovani sloj, slika 1.d, koji usled svojih fluidomehaničkih ograničenja, generalno, nije našao širu primenu.

Prevazilaženje nedostataka fontansko-fluidizovanog sloja je postignuto uvođenjem centralne cevi, kojom se uređuje kretanje čestica u sloju i izbegava pojava efekta »maksimalnih visina«, slika 1.e, odnosno, u cilju sprečavanja pojave »mrtvih zona«, uvođenje koničnog dna u reaktoru sa centralnom cevi, slika 1.f, *Povrenović i sar., 1992.*

Ukoliko bi zbir protoka kroz anularni raspodeljivač na dnu i kroz mlaznicu bio veći od protoka fluida pri kojem dolazi do odnošenja čestica iz kolone, uspostavilo bi se stanje vertikalnog transporta fluidom, što se primenjuje kod odnošenja nečistoća pri pranju filtra.

Iako su relativno jednostavne konstrukcije, ovi sistemi imaju određena fluido-mehanička ograničenja. Na primer, primena cilindričnog fontanskog sloja ima ograničenu primenu zbog relativno visokog pada pritiska fluida, kao i zbog relativno uske oblasti protoka fluida pri kome je moguće ostvariti stabilno fontanovanje.

Uvođenje fluida kroz mlaznicu relativno velikom brzinom, neminovno dovodi do značajnog pada pritiska, odnosno gubitka energije usled trenja i ekspanzije fluida. Ovaj gubitak je utoliko veći ukoliko je odnos prečnika mlaznice i kolone, d_t/D_c , manji. Istovremeno, sa povećanjem prečnika kolone, povećava se i protok fluida, koji je potreban za stabilno fontanovanje. Ovim se eliminišu određene prednosti fontanskog sloja, pa je to i razlog za njihovu ograničenu primenu u industriji.

Ukupni pad pritiska u sistemu sastoji se od pada pritiska u sloju usled trenja između fluida i čestica i pada pritiska usled trenja i ekspanzije u mlaznici. Ukoliko se pad pritiska zbog trenja u mlaznici zanemari, jer je znatno manji od pada pritiska usled ekspanzije fluida u mlaznici, tada se ukupni pad pritiska, koji se uzima u obzir pri oceni utroška energije za održavanje fontanskog sloja, može predstaviti jednačinom zbira pada pritiska usled ekspanzije i pada pritiska u sloju čestica:

$$\Delta P_U = \Delta P_{ek} + \Delta P_{ms} \quad (1)$$

Na osnovu eksperimentalnih podataka *Lefroy-a i sar. 1969*, koji su ispitivali fluidno – mehaničke karakteristike sloja pšenice fontanovane vazduhom u koloni prečnika $D_c = 0.610$ m, izračunato je da se za izvođenje kontakta između čestica i fluida, koristi svega 57.6 % energije, dok se 42.4 % uložene energije troši na savladavanje otpora u sistemu.

Drugi, ne manje važan razlog, koji ograničava primenu cilindričnog fontanskog sloja je relativno uska oblast

protoka fluida, u kojoj je moguće ostvariti stabilno fontansko stanje. U oblasti stabilnog fontanovanja ne može se uticati na raspodelu fluida između fontane i anulusa, kao i na relativnu brzinu između čestica i fluida.

Za praktičnu primenu fontanskog sloja razvijene su određene modifikacije cilindričnog fontanskog sloja, kako bi se:

- ograničilo isticanje fluida iz fontane ka anulusu duž;
- cirkulacija čestica između fontane i anulusa učinila što manje zavisnom od protoka fluida kroz anuluz;

Ograničenje isticanja fluida iz fontane u anuluz postiže se ugrađivanjem cevnog umetka u fontanski sloj. Centralna cev, čiji je prečnik veći od prečnika izlaznog otvora mlaznice postavlja se na izvesnom rastojanju od dna kolone. Ovim se smanjuje protok fluida potreban za ostvarenje cirkulacije čestica, kao i ukupan pad pritiska fluida u sloju. Cirkulacija čestica se može ostvariti na dva načina: dovodenjem čestica u cevnom elementu u fluidizovano stanje ili vertikalnim transportom čestica fluidom kroz centralnu cev (pri maloj koncentraciji čestica u mlazu), *Arsenijević i sar., 2002.*

Prisustvo cevnog elementa, sa druge strane, smanjuje poprečno ulaženje čestica iz anulusa u fontanu, jer čestice sada ulaze u fontanu samo na dnu sloja, usled čega se smanjuje ukupna cirkulacija čestica u poređenju sa cirkulacijom u fontanskom sloju, *Grbavčić i sar., 1992.*

Visina sloja čestica može biti manja, jednaka ili veća od visine izlaznog otvora cevnog elementa, ali se u praksi isključivo radi sa slojem manje visine od vrha centralne cevi.

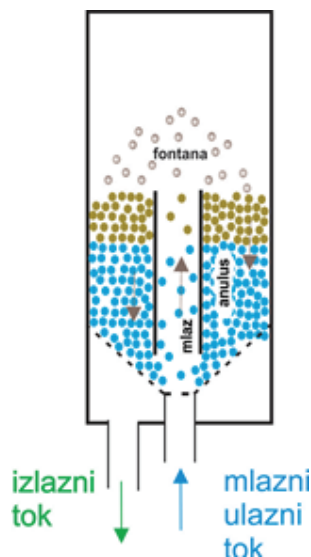
Očigledno je da fontanski sloj sa cevnom umetkom predstavlja sistem pogodan za izvođenje kontakta između čestica i fluida, jer je u njemu moguće podešavati osnovne fluido-mehaničke karakteristike sistema, kao što su: raspodela fluida između fontane i anulusa, visina sloja, brzina cirkulacije čestica, vreme zadržavanja fluida u sloju, kao i pad pritiska fluida.

Pored »klasičnog« fontanskog, postoji još jedan sistem fluid-čvrste čestice, koji po svojim fluido-mehaničkim osobinama liči na fontanski sloj sa cevnom umetkom, ali se i značajno razlikuje od njega. Radi se o fluidizovanom sloju sa cirkulacijom ili cirkulacionom fluidizovanom sloju. U sloj se ugradi cilindrični cevni element, a odnos prečnika cevnog elementa i prečnika sloja je $d_t/D_c = 0.34-0.66$ i znatno je veći od istog odnosa u fontanskom sloju sa cevnom elementom.

Usled razlike gustina sloja u centralnom i anularnom delu dolazi do cirkulacije čestica, dok je brzina gasa u anulusu bliska minimalnoj brzini fluidizacije. Usled toga, vertikalni transport čestica u centralnom delu, vrši se u obliku suspenzije sa visokom koncentracijom

čestica i relativno malim brzinama fluida, za razliku od fontanskog sloja sa cevnim elementom, u kome se vertikalni transport obavlja pri malim koncentracijama čvrste faze i velikim brzinama fluida i čestica.

U cilju primene fontanskog sloja sa centralnom cevi u tehnologiji vode, u ovom radu, razmatran je tzv. »istostrujni fontanski sloj«, koji se odlikuje time da se fluid i čestice u mlazu istostrujno kreću naviše, a potom i u anulusu naniže, Slika 2. Ovaj tip fontanskog sloja se odlikuje kretanjem čestica i fluida u anulusu sloja u istom smeru, naniže, što se razlikuje od do sada ispitivanih sistema, sa suprotnostrujnim tokom fluida u anulusu naviše i čestica naniže

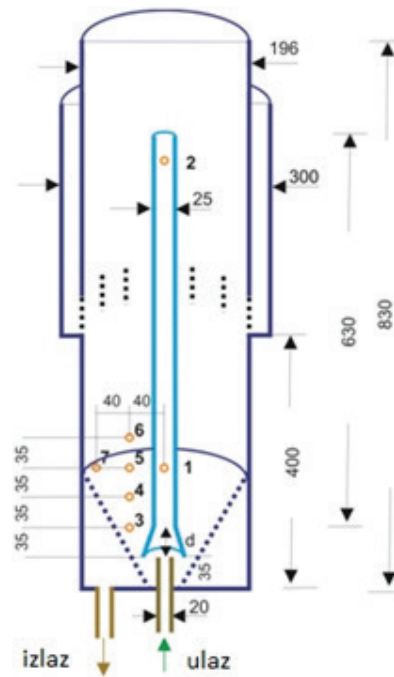


Slika 2. Istostrujni fontanski sloj

EKSPERIMENTALNI SISTEM

Eksperimentalna ispitivanja vršena su na istostrujnom fontanskom sloju sa centralnom cevi pri hidrauličkom transportu inertnih čestica vodom u polucilindričnoj koloni, sa dimenzijama prikazanim na slici 3. Tokom eksperimenata, korišćene su različite vrste čestica, pri različitim brzinama fluida i različitim visinama sloja, radi definisanja uslova pri kojima je moguće dobiti određenu visinu "suvog" sloja, kroz koji bi se vršilo uvođenje vazduha, a u cilju njegove primene u postupcima pripreme vode, pre svega procesima aeracije i degazacije. Kako bi se postigao što bolji hidraulički transport čestica kroz centralnu cev, vrh mlaznice je postavljan u dva položaja, na samim »ustima« centralne cevi, $d=0$, i ispod ulaza u centralnu cev na rastojanju $d=4\text{cm}$. Kako bi se obezbedio nesmetan ulaz čestica u centralnu cev, njeno dno je bilo konusno prošireno.

Kao ispuna kolone, korišćene su tri vrste čestica, staklene sfere, PET i granule polietilena, a njihove osnovne karakteristike date su u Tabeli 1.



Slika 3. Geometrijski odnosi eksperimentalne polukolone

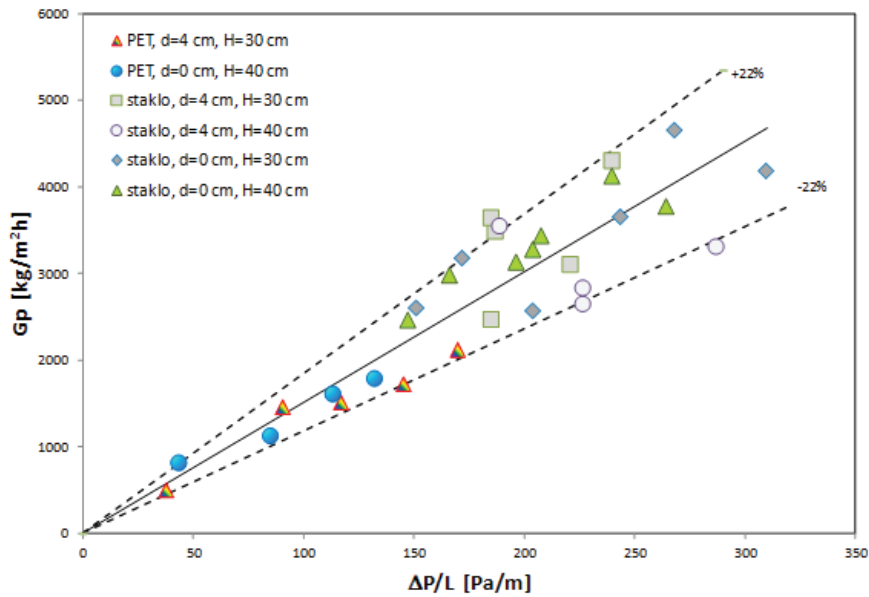
Tabela 1. – Karakteristike čestica korišćenih za obrazovanje fontanskog sloja

Vrste čestica	polietilen	PET	staklo
d_p , m	$3 \cdot 10^{-3}$	$2.62 \cdot 10^{-3}$	210^{-3}
ρ_p , kg/m ³	940	1240	2400
u_r , m/s	0.053	0.15	0.24
ε	0.36	0.347	0.354

Cirkulacija čestica merena je direktno na izlazu iz cevnog umetka, za vreme njihovog stabilnog fontanovanja. Čestice su sakupljane pomoću specijalne limene kutije na čijem dnu se nalazila mrežica koja je zaustavljala čestice na njihovom putu iz fontane ka vrhu anulusa, dok je voda nesmetano prolazila ka dnu kolone. Ova kutija je konstruisana specijalno za eksperimentalni sistem što znači da je njena konstrukcija pratila oblik eksperimentalne polukolone tako da je mogućnost da čestice padnu izvan nje svedena na minimum. Posle sakupljanja, čestice su sušene, a zatim je merena njihova masa, radi određivanja masenog protoka čestica, W_p , odnosno fluksa G_p .

Pad pritiska u sloju je meren na ravnom zidu polukolone, a merna mesta su obeležena brojevima od 1 do 7, slika 3.

Merenje protoka vode vršeno je rotametrom, proizvođača IHTM-Beograd, a regulacija protoka je vršena manuelno pomoću zasuna. Opseg protoka vode u realizovanim eksperimentima se kretao od 1,00 do 1,2 m³/h.



Slika 4. Zavisnost pada pritiska u centralnoj cevi od fluksa čestica

REZULTATI I DISKUSIJA

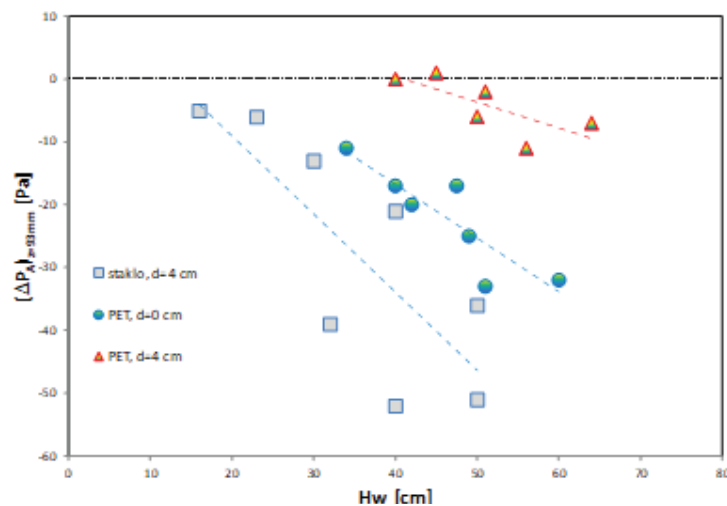
U ispitivanom sistemu, pri radu sa česticama polietilena, čija je gustina manja od gustine vode, nije bilo moguće ostvariti fontanovanje jer su, za korišćenu zapreminu kolone i moguću visinu sloja, čestice kao lakše isplivavale na površinu vode, daleko od ulaznog kraja centralne cevi, što je dovelo do toga da kroz centralnu cev protiče samo voda, bez čestica. Ove čestice se mogu koristiti jedino u sistemima sa obrnutim fontanskim slojem.

Merenje masenog protoka čestica u centralnoj cevi vršeno je pri konstantnoj visini sloja, kao i pri definisanoj poziciji vrha mlaznice u odnosu na "usta" centralne cevi. Dobijeni rezultati pokazuju linearnu zavisnost, sa odstupanjem od $\pm 22\%$, što je za ovakvu vrstu merenja prihvatljivo. Na taj način, obrnuto, merenjem pada pritiska u centralnoj cevi moguće je

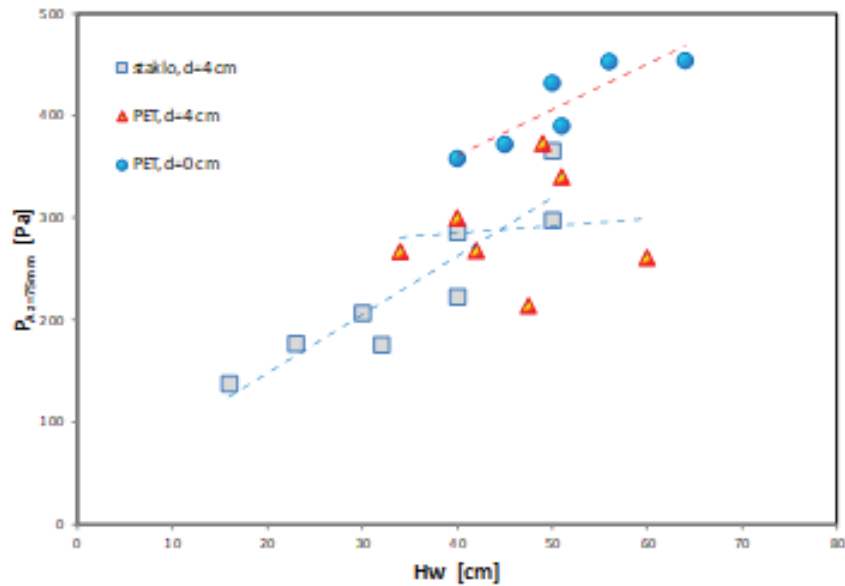
definisati maseni fluks čestica u sloju, slika 4.

Ista zavisnost je uočena i pri konstantnom protoku čestica, a pri različitim visinama sloja, pri čemu dobijeni podaci pokazuju da na cirkulaciju čestica dominantno utiče pozicija mlaznice u odnosu na usta centralne cevi, tako da je u svim eksperimentima pokazano da se intenzivnija cirkulacija obezbeđuje u slučaju kada je vrh mlaznice na samom dnu centralne cevi. Objašnjenje za ovaj fenomen je u tome što se u toj poziciji mlaznice smanjuje mogućnost penetracije fluida iz zone mlaza ka anulusu, pa se postiže i stanje podpritiska, koji usisava čestice iz okolne zone ka centralnoj cevi. Što je potopljeni anularni sloj sa većom visinom, to je i negativan pad pritiska u anularnoj zoni izraženiji, slika 5.

Merenje pritiska u anulusu sloja je imalo za cilj da definiše granične vrednosti pri kojima dolazi do promene toka fluida iz centralne cevi ka anulusu,



Slika 5. Pad pritiska u anulusu fontanskog sloja pri zapreminskom protoku vode 1.20 m³/h



Slika 6. Promena pritiska u anulusu pri različitim nivoima vode u anulusu, $VN=1.10 \text{ m}^3/\text{h}$

pri određenim fluidno-mehaničkim parametrima. Zavisnost pritiska u anulusu od visine sloja, kada je protok vode konstantan, prikazana je na slici 6. Na osnovu izmerenih podataka nije moguće definisati parametre pri kojima se javlja prostrujavanje fluida iz centralne cevi ka anulusu, što je za ovakve sisteme veoma važno, pa bi jedan od zadataka budućih istraživanja bilo, upravo, definisanje odnosa količine fluida koja struji kroz centralnu cev u odnosu na količinu fluida koja prostrujava (by pass) iz mlaza ka anulusu, u funkciji od odela visine potopljenog dela anulusa.

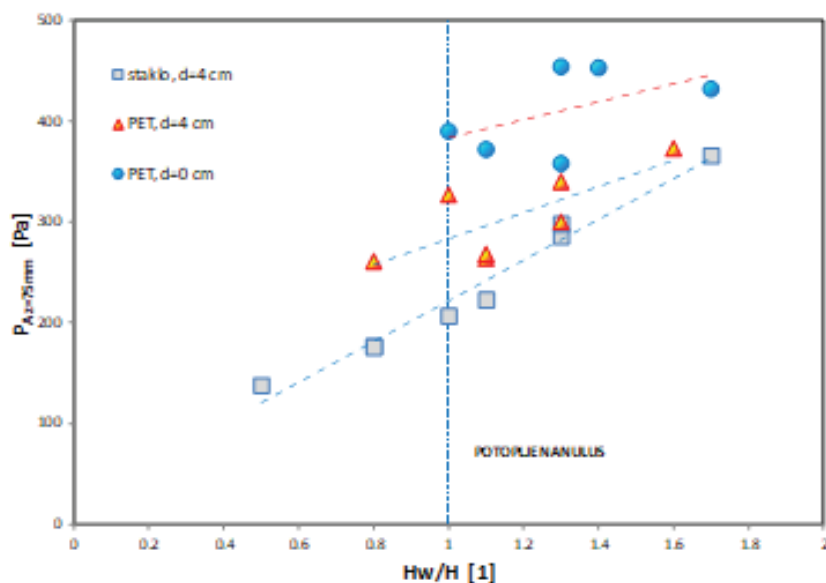
Nivo vode u anulusu je vrlo važan parametar sistema jer od njega zavisi visina "suvog" sloja kroz koji bi se mogla vršiti aeracija ili degazacija, a u nekim slučajevima i biološki tretman vode. Nivo vode u

anulusu sloja je moguće podešavati regulacijom izlaznog toka fluida promenom otpora isticanju fluida regulacionim ventilom.

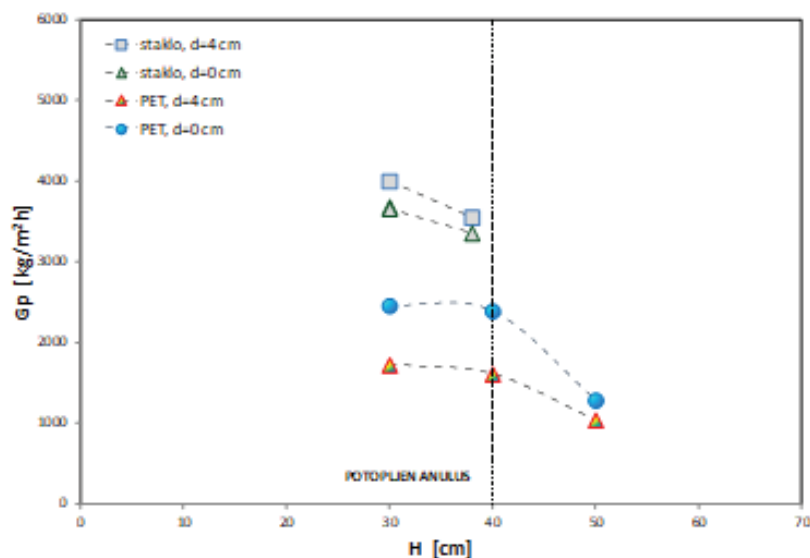
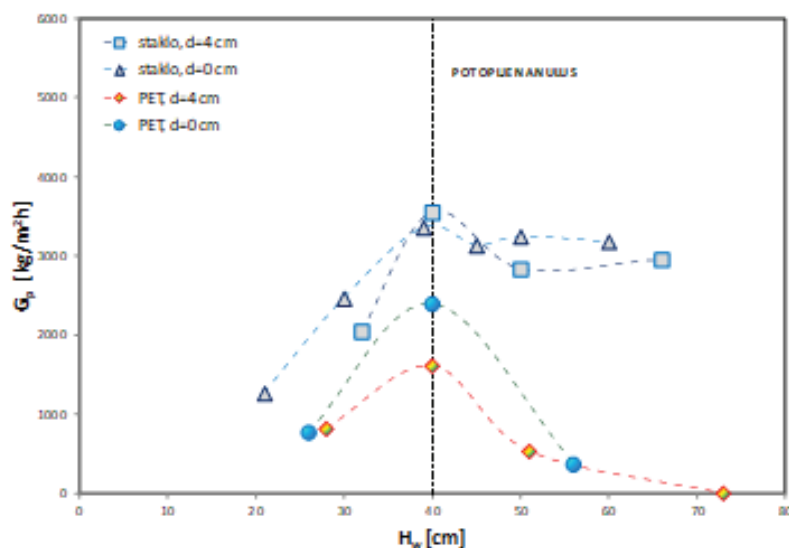
Povećanjem otpora isticanju fluida, tj. zatvaranjem ventila na izlaznom toku, nivo vode u anulusu raste. Sa porastom visine vode raste i pritisak u anulusu, a porast je linearanog karaktera.

Na osnovu podataka prikazanih na Slici 7. moguće je zaključiti da pritisak u anulusu sloja raste na isti način, bez obzira da li je annulus potopljen vodom ili ne. Zavisnost je linearna i u slučaju da je nivo vode manji, jednak ili veći od visine nasutog sloja čestica u anulusu.

U fontanskom sloju sa cevnom elementom, cirkulacija



Slika 7. Zavisnost pritiska u anulusu od odnosa nivoa vode i visine sloja čestica u anulusu

Slika 8. Uticaj visine sloja na fluks čvrstih čestica, VN=1.10 m³/hSlika 9. Uticaj visine nivoa vode u anulusu na fluks čestica, VN=1.10 m³/h

čestica se simultano odvija u centralnoj cevi i anulusu sloja, pa pošto su to dva jednaka masena protoka, za njegovo određivanje može se koristiti jednačina za bilo koju od zona. Maseni protok čestica u anulusu može se izračunati pomoću jednačine:

$$W_p = v_A \cdot A_A \cdot \rho_A \cdot (1 - \varepsilon_A) \quad (2)$$

dok je fluks čestica:

$$G_p = W_p / A_A \quad (3)$$

gde je :

W_p - maseni protok čestica u vertikalnom transportnom cevnom vodu, kg/s

G_p - fluks čestica, kg/m²s

v_A – brzina čestice u anulusu, m/s

A_A – poprečni presek anulusa, m²

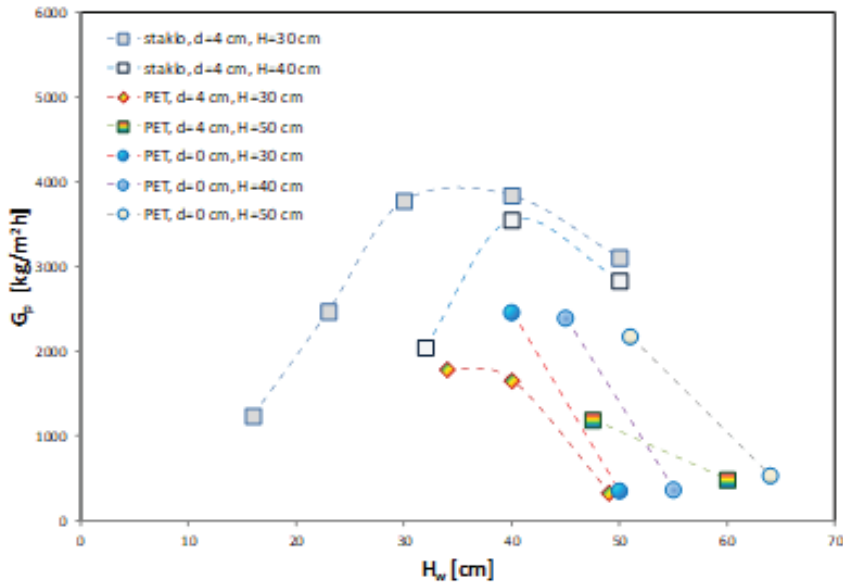
ρ_A – gustina fluida, kg/m³

ε_A – poroznost anulusa

Protok čestica zavisi od protoka fluida kroz mlaznicu, $V_{N'}$ i rastojanja cevnog elementa od mlaznice, d , kao i karakteristike čestica.

Protok čestica je u eksperimentima meren direktno na izlazu iz centralne cevi. Zavisnost cirkulacije čestica od visine sloja u anulusu, pri konstantnom nivou vode u anulusu, prikazana je na Slici 8. Dobijeni rezultati pokazuju da cirkulacija čestica opada sa porastom visine nivoa vode u anulusu sloja. Taj pad je naročito izražen kada je sloj čestica potopljen vodom. Takođe je maseni protok čestica veći kada je veće rastojanje između cevnog umetka i dna sloja.

Podaci prikazani na Slici 9. pokazuju kako visina vode u anulusu utiče na cirkulaciju čestica pri konstantnom protoku fluida kroz mlaznicu. Uočava se da sa porastom nivoa vode u anulusu sloja, dolazi do



Slika 10. Uticaj visine nivoa vode na cirkulaciju čestica, $V_N=1.00-1.20 \text{ m}^3/\text{h}$

povećanja cirkulacije čestica u sloju, sve do dostizanja vrednosti kada je potopljen čitav anulus, da bi nakon toga sa povećanjem nivoa i iznad visine sloja, dolazilo do pada vrednosti cirkulacije čestica.

Isti trend je zapažen u svim ispitivanim sistemima, za protoke od $1,00$ do $1,20 \text{ m}^3/\text{h}$, slika 10. Cirkulacija čestica počinje da se smanjuje kada sloj biva potopljen. Takođe, može se uočiti da neke krive nemaju maksimum, već je njihov trend linearno opadajući zato što je cirkulacija čestica merena samo kada je nivo vode bio jednak i iznad visine sloja, jer pri protoku fluida od $1,20 \text{ m}^3/\text{h}$ nije bilo moguće ostvariti cirkulaciju čestica, a da sloj ne bude potpuno potopljen.

Slika 10.

ZAKLJUČAK

U ovom radu istraživanja su bila bazirana na ispitivanju fluido-mehaničkih karakteristika istostrujnog fontanskog sloja sa centralnom cevi, kao osnove za dalja istraživanja koja bi trebalo da budu usmerena ka obezbeđenju uslova, neophodnih za proces aeracije, odnosno degazacije vode, kao i za postupke biološkog tretmana otpadnih voda u ovakvom sistemu. Eksperimentalna ispitivanja su pokazala da se, za dati sistem, cirkulacija čestica u sloju može odrediti na osnovu merenja pada pritiska u centralnoj cevi. Mogućnost obrazovanja fontanskog sloja sa centralnom cevi sa kontrolisanim nivoom potapanja anulusa je značajan rezultat ovog rada. Podešavanje

nivoa vode u anulusu, je moguće izvršiti promenom otpora na izlaznom toku fluida, što znači da je moguće dobiti različite visine "suvog" sloja, tj. dela sloja koji nije potopljen vodom, kroz koji bi se vršila aeracija bilo prinudnom ili prirodnom ventilacijom, kao i uvođenje vazduha u obliku mikromehurova u mlazni tok.

Zahvalnica

Ovaj rad je nastao u okviru istraživanja na projektu Ministarstva prosvete, nauke i tehnološkog razvoja Republike Srbije br 33007

LITERATURA

1. Arsenijević, Z., Grbavčić, Ž., Garić-Grulović, R., 2002. Drying of Solutions and Suspensions in the Modified Spouted Bed with Draft tube. *Thermal Science* 2, 47-70.
2. Grbavčić, Z.B., Garić, R.V., Vuković, D.V., Hadžismajlović, Dz.E., Littman, H., Morgan, III M.H., 1992. Fluid flow pattern and solids circulation rate in a liquid phase spout-fluid bed with draft tube, *The Canadian Journal of Chemical Engineering* 70, 895-903.
3. Lefroy, G. A. and Davidson, J. F., The Mechanism of Spouted Beds, *Transactions of the Institution of Chemical Engineers*, Vol. 47, pp.120-128 (1969).
4. Littman, H., Paccione, J.D., Plawsky, J.L., 2009. New type of draft tube spout-fluid bed. part 1: Hydraulic transport of 1.94 mm glass particles in water. *Industrial End Engineering Chemistry Research* 48, 9286-9298.
5. Mathur, K.B., Epstein, N., "Spouted Beds", Academic Press, New York (1974).
6. Povrenović, D.S., Grbavčić, Ž.B., Hadžismajlović, Dz.E., Vuković, D.V., Littman, H., 1992. Fluid mechanical and thermal characteristics of spout-fluid drier with a draft tube. *Drying Technology* 117, 343-351.