

Uticaj fluido-mehaničkih karakteristika sistema na zapreminski koeficijent prenosa mase i disperziju vazduha u trofaznom sistemu

Milena M. Knežević, Dragan S. Povrenović

Univerzitet u Beogradu, Tehnološko–metalurški fakultet, Karnegijeva 4, Beograd, Srbija

Izvod

U ovom radu je proučavana distribucija mehurova i zapreminski koeficijent prenosa mase, $k_{L\alpha}$, u trofaznom sistemu, sa sferičnim česticama od stakla i keramike različitog prečnika pod različitim operativnim uslovima. Brzine gasa su se kretale u intervalu 0,03–0,09 m/s, a brzine tečnosti 0–0,1 m/s. Ispitivanja su se izvodila u kolonama od pleksiglasa različitih geometrija. 2D kolona dimenzija 278 mm×20,4 mm×500 mm i cilindrična kolona, prečnika 64 mm i visine 2000 mm. Rezultati su pokazali da prisustvo čestica u sistemu doprinosi povećanju zapreminskog koeficijenta prenosa mase, a da sa povećanjem brzine gasa i tečnosti njegova vrednost nastavlja da raste. Vrednost povećanja zapreminskog koeficijenta prenosa mase, u konkretnim fluido-mehaničkim uslovima, zavisi od karakteristika samih čestica.

Cljučne reči: zapreminski koeficijent prenosa mase, trofazni sistem, staklene i keramičke čestice.

Dostupno na Internetu sa adrese časopisa: <http://www.ache.org.rs/HI/>

NAUČNI RAD

UDK 66.06:544

Hem. Ind. 68 (4) 483–490 (2014)

doi: 10.2298/HEMIND130629072K

Proučavanje trofaznih sistema sa fluidizovanim slojem kao i odgovarajućih fenomena prenosa od velikog je značaja kod operacija multifaznog kontakta u hemijskoj, petrohemijskoj, biohemijskoj industriji i metalurgiji.

Ovakvi sistemi se sve više ispituju i koriste za mikrobiološke procese jer omogućavaju veliku specifičnu površinu za rast mikroorganizama kao i intezivan prenos mase. U biotehnologiji višefazni sistemi sa pokretnim slojem čestica se često primenjuju za aerobne tretmane otpadnih voda. U aerobnim bioreaktorima, limitirajući faktor u podešavanju optimalnih uslova sredine mikroorganizmima je prenos mase kiseonika, zbog posledice slabog rastvaranja kiseonika u vodi, odnosno, u fermentacionim medijumima. Efikasnost prenosa mase kiseonika iz gasne u tečnu fazu, se najbolje opisuje preko vrednosti zapreminskog koeficijenta prenosa mase $k_{L\alpha}$ [1–3].

U trofaznim sistemima sa pokretnim slojem čestica, brojni istraživači [4–6], ispitivali su uticaj distributora vazduha, protoka vazduha, difuzivnosti gasa kroz tečnost, protoka i viskoziteta tečnosti na prenos mase kiseonika [4–6]. Istraživanja su pokazala da zapreminski koeficijent prenosa mase zavisi od distribucije i veličine mehurova u sistemu [7], kao i da ponašanje mehurova u sistemu, koje je uglavnom uslovljeno načinom disperzije, ima direktan uticaj na prenos mase i hidrodinamiku sistema [8]. U dosadašnjom istraživanjima ispitivan je uticaj različitih tipova ispune poput kamene, sta-

klene, keramičke, plastične i sintetske, na prenos mase kiseonika u trofaznim sistemima [4,6,9–16]. Ova ispitivanja su pokazala da osobine čestica koje čine ispunu, gustina i prečnik, kao i njihova količina, utiču na pojavu koalescencije, odnosno na prečnik mehura i zadržavanje gasa u sistemu [4,6,9–16].

Pregledom literature, može se uočiti dosta suprotstavljenih rezultata i različitih tumačenja uticaja ispitivanih parametara na prenos mase kiseonika u trofaznim sistemima, zbog toga je nemoguće osloniti se na postojeće analize, pa je neophodno izvršiti eksperimentalne provere za svaki ispitivani sistem sa ciljem detaljnijeg utvrđivanja interakcija čestica i mehurova vazduha u trofaznom sistemu.

Cilj eksperimenta je bio da se odredi uticaj različitih tipova čestica na efikasnost prenosa mase kiseonika, odnosno na vrednost zapreminskog koeficijenta prenosa mase, $k_{L\alpha}$, jer da bi se trofazni sistemi mogli primeniti za nitrifikaciju, potrebno je prvo ispitati fluido-mehaničke karakteristike na prenos mase kiseonika u ovim sistemima.

U trofaznim sistemima, na prenos mase kiseonika, kao jednog od limitirajućih parametara procesa nitrifikacije, ključnu ulogu imaju karakteristike čvrstih čestica. Pravilnim odabirom čvrste faze, odnosno inertih nosača za nitrifikacione bakterije, aktere nitrifikacionog procesa, može se uticati na povećanje efikasnosti procesa uklanjanja azota iz otpadnih voda.

EKSPERIMENTALNI DEO

U eksperimentima su korišćene dve kolone od pleksiglasa, različitih dimenzija. Prva kolona je bila cilindrična, 3D kolona, prečnika 64 mm i visine 2000 mm,

Prepiska: D.S. Povrenović, Univerzitet u Beogradu, Tehnološko–metalurški fakultet, Karnegijeva 4, Beograd, Srbija.

E-pošta: povrenovic@tmf.bg.ac.rs

Rad primljen: 29. jun, 2013

Rad prihvaćen: 25. septembar, 2013

dok je druga bila 2D kolona, dimenzija 278 mm×20,4 mm i visine 500 mm. Na slici 1 prikazana je šema eksperimentalnog sistema korišćenog u ovom radu i izgled 2D i 3D kolona.

Voda i vazduh su uvođeni na dnu kolone, preko distributora, a izlazili su na vrhu kolone. Distributor, kod obe kolone je bio obrazovan od pakovanog sloja staklenih, sferičnih čestica prečnika 4 mm. Kao čvrsta faza trofaznog sistema, korišćene su čestice različitih karakteristika, koje su prikazane u tabeli 1.

Tabela 1. Karakteristike čestica
Table 1. Particle characteristics

Tip čestice	Prečnik, mm	Gustina, kg/m ³
Sferične staklene čestice	3	2500
Sferične staklene čestice	6	2500
Sferične keramičke čestice	6	2311

Eksperimentalna ispitivanja su vršena sa različitim visinama pakovanog sloja čestica, 10, 20, 30 i 40 cm. Brzina vazduha kroz kolonu se kretala od 0,03 do 0,09 m/s, a protok vazduha je meren rotametrom. Protok vode je meren pomoću elektromagnetnog merača, a brzina vode kroz kolonu se kretala u intervalu od 0 do 0,09 m/s. U ovim ispitivanjima, širok opseg protoka fluida, obuhvatio je različite slojeve čestica, od nepokretnog pakovanog sloja do fluidizovanog sloja.

Pod pretpostavkom da je u kolonama uspostavljeno idealno mešanje, za izračunavanje zapreminskog koeficijenta prenosa mase korišćena je jednačina (1):

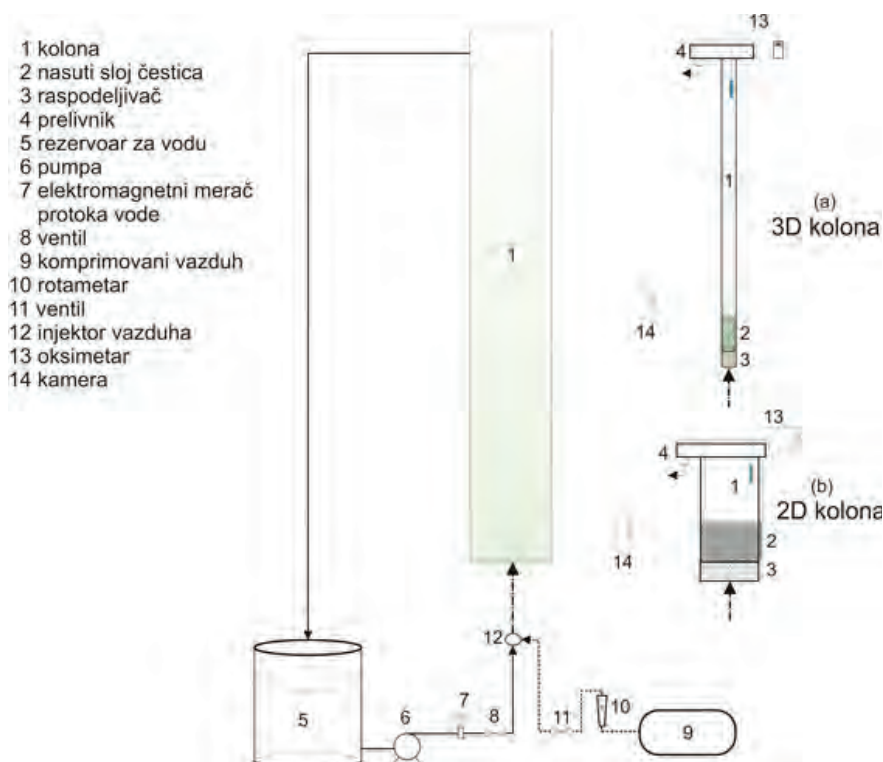
$$\frac{dC}{dt} = k_L a (C^* - C_t) \quad (1)$$

Ispitivanja prenosa mase kiseonika su rađena sa česmenskom vodom, na sobnoj temperaturi, iz koje je pomoću natrijum-sulfita prethodno uklanjan rastvoren kiseonik do koncentracija ispod 1 mg/l. Promena koncentracije rastvorenog kiseonika u koloni sa vremenom merena je pomoću oksimetra, WTW Oxi 340i. Uvođenje vazduha je vršeno do postizanja najmanje 90% koncentracije zasićenja. Takođe u eksperimentu je praćena distribucija i veličina mehurova pomoću analize slika. Na poleđinu kolona je bio zalepljen paus papir, na koji je usmeren reflektor, što je omogućilo jasnije uočavanje mehurova na slikama, a potom su prečnici mehurova na slikama određivani pomoću programa "Sigma Scan".

REZULTATI I DISKUSIJA

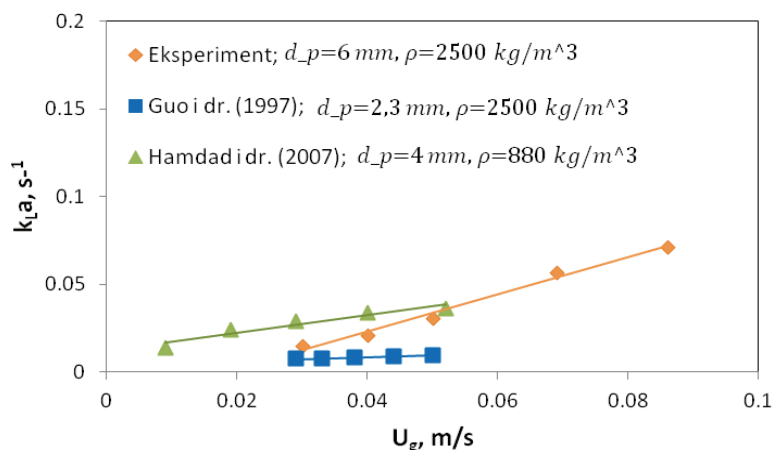
Uticaj brzine gasa na $k_L a$

U trofaznom sistemu, bez proticanja vode, sa povećanjem brzine vazduha, generalno raste i vrednost zapreminskog koeficijenta prenosa mase, što se vidi na slici 2.



Slika 1. Šeme eksperimentalnih aparatura: a) Cilindrična kolona; b) 2D kolona.

Figure 1. Scheme of the experimental system: a) Cylindrical column; b) 2D column.



Slika 2. Zavistnost $k_L a$ od brzine proticanja vazduha.
Figure 2. Magnitude of $k_L a$ as a function of gas velocity.

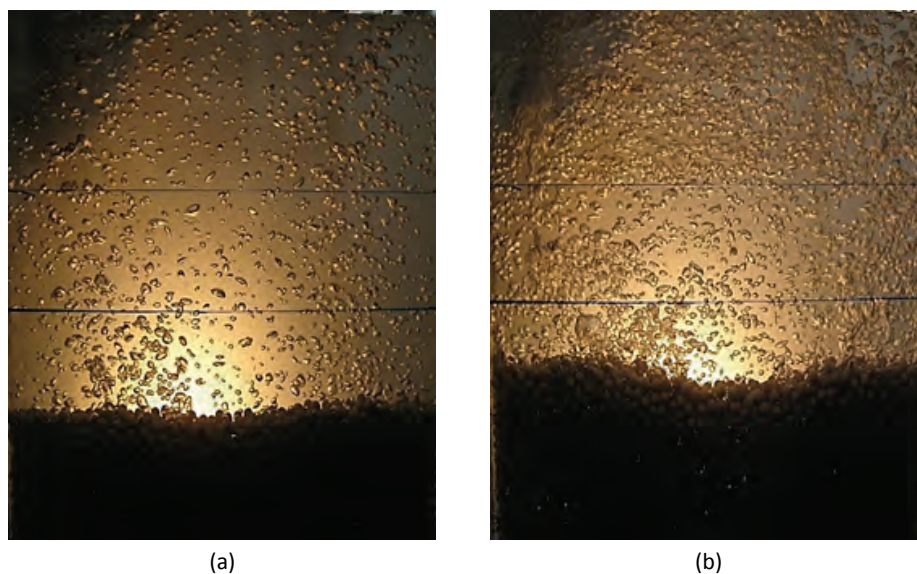
Ovo se objašnjava time da sa povećanjem brzine gasa, obe veličine i specifična međufazna površina, a i koeficijent prenosa mase, k_L rastu, jer velika brzina gasa, odnosno njegov fluks ($\text{m}^3/\text{s m}^2$), utiče na povećanje „hold-up“-a gasa u sistemu i na smanjenje prečnika mehura, što dovodi do povećanja međufazne površine, a time i do boljeg prenosa mase, [9]. Na slici 3 se vidi da povećanje brzine gasa dovodi do povećanja broja mehurova, odnosno količine gasa u sistemu kao i to da su formirani mehurovi sitniji pri većoj brzini gasa. Da povećanje brzine gasa utiče na povećanje „hold-up“-a gasa i $k_L a$, potvrđeno je i od strane drugih istraživača koji su ispitivali i druge tipove čestica [4,6,9,16,27,28].

Pored ovoga, porast brzine gasa u trofaznom sistemu dovodi do drobljenja mehurova i smanjenja njihovog prečnika, pa iako bi se očekivao suprotan efekat, usled povećanja turbulencije dolazi do povećanja nji-

hove brzine dizanja u koloni, a time i povećanja turbulencije tečnosti oko mehurova. U tom slučaju otpor prenosu mase od strane filma tečnosti opada, a što utiče na povećanje vrednosti koeficijenta prenosa mase, k_L , što je i eksperimentalno potvrđeno u rezultatima [9].

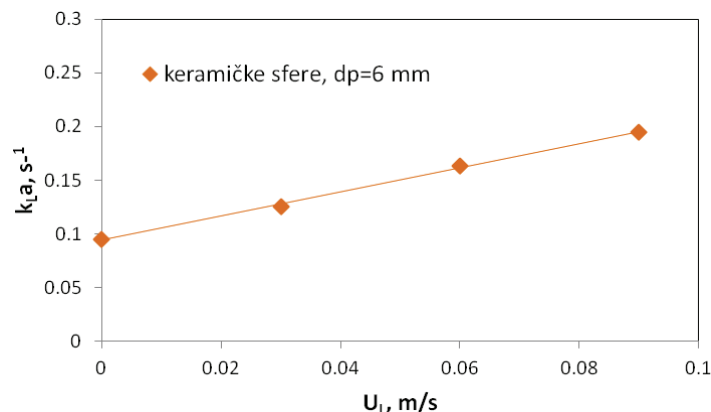
Uticao brzine tečnosti na $k_L a$

Brzina tečnosti ima značajan hidrodinamički uticaj u trofaznim sistemima. Uticaj brzine tečnosti na formiranje mehurova gasa i zapreminski koeficijent prenosa mase se ogleda preko povećane turbulencije u sistemu, koja doprinosi da film tečnosti postane tanji a otpor prenosu kiseonika manji, što utiče na povećanje koeficijenta prenosa mase od strane tečnosti k_L . Na slici 4 je prikazana zavisnost zapreminskog koeficijenta prenosa mase od brzine tečnosti kroz kolonu.



Slika 3. Veličina mehurova u 2D koloni sa sferičnim česticama od keramike, prečnika 6 mm, pri različitim brzinama gasa: a) $U_g = 0,02 \text{ m/s}$; b) $U_g = 0,05 \text{ m/s}$.

Figure 3. Bubble size in a 2D column with 6 mm diameter ceramic spherical particles at: a) $U_g = 0.02 \text{ m/s}$; b) $U_g = 0.05 \text{ m/s}$.



Slika 4. Uticaj brzine tečnosti na zapreminski koeficijent prenosa mase u sistemu sa keramičkim sferama prečnika 6 mm, pri brzini gasa od 0,09 m/s.

Figure 4. Effects of liquid velocity on the volumetric mass transfer coefficient at $U_g = 0.09$ m/s in column with 6 mm diameter ceramic spherical particles.

Turbulencija, odnosno povećanje brzine tečnosti u sistemu takođe doprinosi i cepanju mehurova, odnosno smanjivanju njihovog prečnika. U cilju određivanja dimenzija mehurova, praćena je promena u broju i veličini mehurova u 2D koloni (slika 1b), snimanjem pomoću kamere. Dobijene slike su skenirane i zatim analizirane u softverskom paketu za analizu slika „Sigma-Scan“. Analizom slika, dobijena je vrednost srednjeg prečnika mehura u koloni pri određenim operativnim uslovima, a zavisnost veličine mehura od brzine tečnosti je prikazana na slici 5.

Pri većim brzinama tečnosti dolazi do formiranja većeg broja uniformnih mehurova (homogen režim protoka mehura), dok je pri manjim vrednostima brzine tečnosti izraženije njihovo srastanje, pa dolazi do formiranja heterogenog režima proticanja mehurova, slika 6.

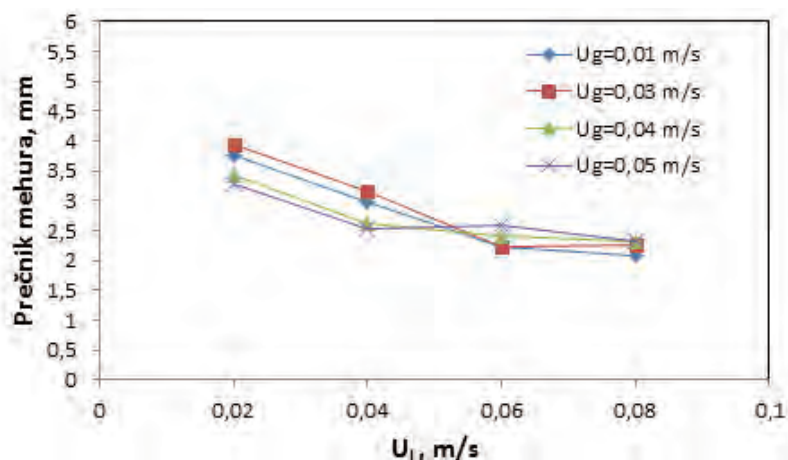
Rezultati nekih eksperimentalnih ispitivanja, dostupni u literaturi, pokazuju da se zapreminski koeficijent prenosa mase povećava sa povećanjem protoka tečnosti [9,12,29], dok drugi rezultati govore suprotno,

da se zapreminski koeficijent prenosa mase smanjuje sa povećanjem brzine tečnosti [6,10,30].

Rezultati naših eksperimentalnih ispitivanja pokazuju da povećanje brzine tečnosti i gasa, utiču na povećanje zapreminskog koeficijenta prenosa mase, što je prikazano na slici 7.

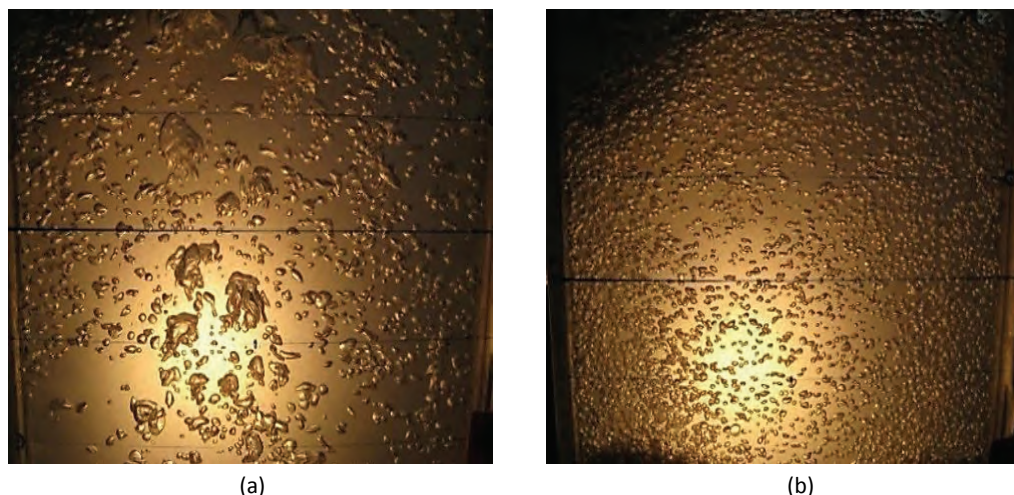
Uticaj karakteristika čestica na $k_L a$

Kao što je već rečeno, pri većim brzinama gasa postiže se homogen režim protoka mehurova, koji se odlikuje boljim karakteristikama procesa prenosa mase, za razliku od heterogenog režima. U dvofaznim sistemima bez prisustva čestica, homogeni režim se jedino može postići pri niskim protocima gasa jer pri višim protocima dolazi do koalescencije [7]. Međutim, zbog presudne uloge rastvorenog kiseonika u aerobnim mikrobiološkim procesima, velika količina vazduha u sistemu je neophodna za adekvatno odvijanje procesa. Istraživanja su pokazala, da odgovarajuća prisutna čvrsta faza u sistemu ima mogućnost da pri visokim protocima gasa utiče na formiranje homogenog režima



Slika 5. Uticaj brzine tečnosti na prečnik mehura, pri konstantnim brzinama gasa u sistemu sa staklenim kuglicama prečnika 6 mm.

Figure 5. Effects of liquid velocity on bubble diameter, at constant gas velocity in column with 6 mm diameter glass particles.



Slika 6. Veličina mehurova u 2D koloni sa keramičkim česticama od 6 mm pri istoj brzini gasa a) 0,02 i b) 0,1 m/s.

Figure 6. Bubble size in a 2D column with 6 mm diameter ceramic spherical particles at same gas velocity and different liquid velocity: a) $U_L = 0,02$ m/s, b) $U_L = 0,1$ m/s.

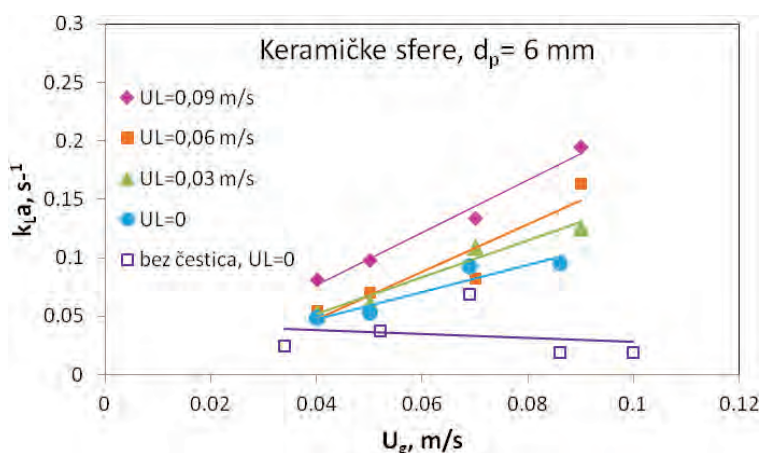
mehurova. Na osnovu ovoga je istaknuto da važnu ulogu na formiranje mehurova imaju osobine čestica koje čine ispunu. Uticaj osobina čestica potrebno je detaljno ispitati jer, pri određenim uslovima, čestice mogu da suzbiju koalescenciju, ali isto tako mogu i da je pospeše.

Jedna od osobina čestica koja utiče na efikasnost prenosa mase kiseonika u sistemu je njihov prečnik. Sa porastom prečnika čestica raste količina zadržanog gasa u koloni, što je u skladu sa literaturnim rezultatima [6,10,30,31]. Sitne čestice utiču na povećanje koalescencije, u odnosu na sisteme sa krupnijim česticama. Pri istoj visini nasutog sloja i istim vrednostima protoka fluida, kod sitnijih čestica povećani pad pritiska uslovljava kompresiju vazduha na dnu sloja, što izaziva srastanje mehurova a time i „by pass“ vazduha kroz nasut sloj. Veliki mehurovi imaju manju specifičnu površinu, veće brzine dizanja kroz kolonu i kraće vreme zadržanja,

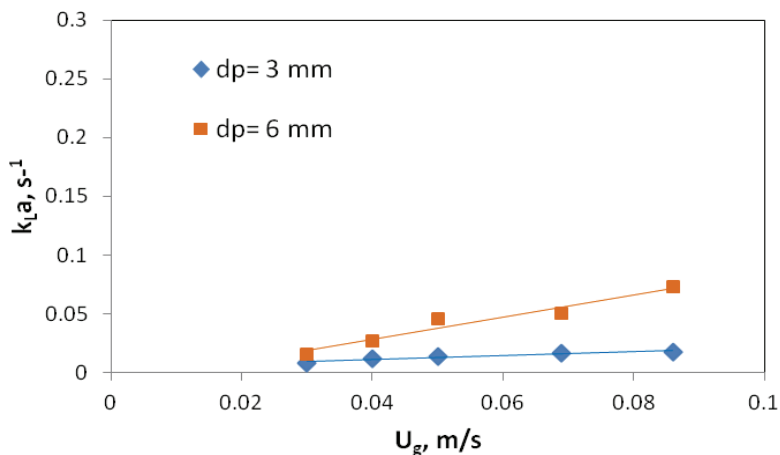
što dovodi do smanjenog prenosa mase. Povećanje prečnika čestica utiče na bolje cepanje mehurova što dovodi do povećanja sadržaja gasa u koloni kao i do povećanja vrednosti zapreminskog koeficijenta prenosa mase, $k_L a$ [6,11,12]. Uticaj prečnika čestica na zapreminski koeficijent prenosa mase u sistemu sa staklenim sferama prečnika 3 i 6 mm, prikazan je na slici 8.

Ukoliko je u sistemu uspostavljeno i proticanje tečnosti, zabeleženo je isto ponašanje, da sa povećanjem prečnika čestica raste i zapreminski koeficijent prenosa mase, slika 9.

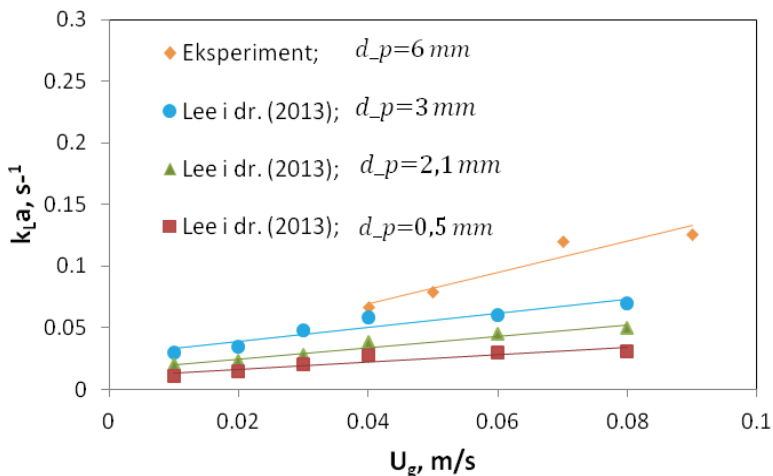
Druga bitna osobina čestica koja utiče na efikasnost prenosa mase kiseonika je gustina čestica. Rezultati eksperimentalnih ispitivanja, prikazani na slici 10, pokazuju da su vrednosti zapreminskog koeficijenta prenosa mase veće u sistemu sa keramičkim sferama prečnika 6 mm i gustine 2311 kg/m^3 od vrednosti dobijenih u sistemu sa staklenim sferama istog prečnika 6 mm, a gus-



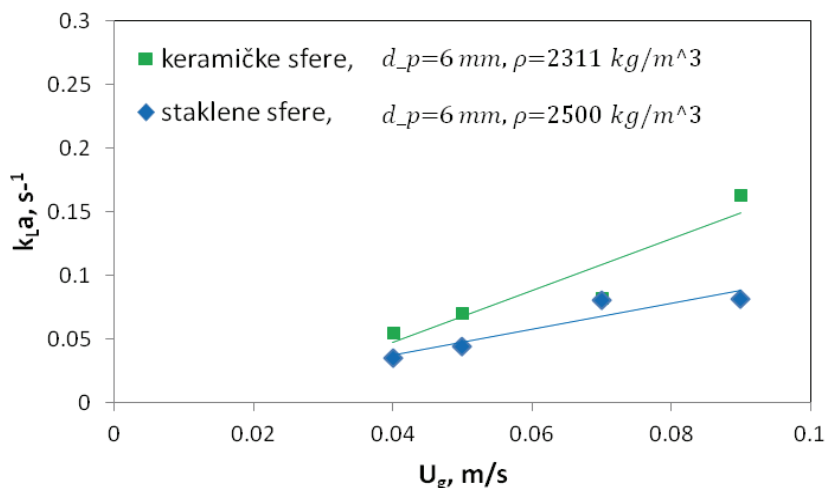
Slika 7. Uticaj brzine gasa i tečnosti na zapreminski koeficijent prenosa mase ($H_{sloja} = 40 \text{ cm}$).
Figure 7. Effects of gas and liquid velocity on ($H_{bed} = 40 \text{ cm}$).



Slika 8. Uticaj prečnika staklenih čestica na k_{La} u zavisnosti od U_g , $U_L = 0$ m/s, $H_{sloja} = 30$ cm.
 Figure 8. Influence of glass particle diameter on k_{La} as a function of U_g , $U_L = 0$ m/s, $H_{bed} = 30$ cm.



Slika 9. Uticaj prečnika staklenih sferičnih čestica na zapreminski koeficijent prenosa mase u zavisnosti od brzine gasa.
 Eksperiment: $U_L = 0,09$ m/s ; Lee i dr. (2013): $U_L = 0,3$ m/s.
 Figure 9. Influence of glass particle diameter on k_{La} as a function of U_g . Experiment: $U_L = 0.09$ m/s ; Lee et al. (2013): $U_L = 0.3$ m/s.



Slika 10. Uticaj gustine čestica na zavisnost zapreminskog koeficijenta prenosa mase od brzine proticanja gasa, pri brzini tečnosti od 0,06 m/s ($H_{sloja} = 40$ cm).
 Figure 10. Influence of particle density on k_{La} as a function of gas velocity at liquid velocity 0,06 m/s ($H_{bed} = 40$ cm).

tine 2500 kg/m^3 , pod istim operativnim uslovima. Ova-ko mala razlika u gustinama čestica dovela je do značajne razlike u vrednostima $k_L a$ u ova dva ispitivana sistema. Freitas i Teixeira [13] koji su ispitivali čestice prečnika $2,1 \text{ mm}$, gustine 1023 i 1048 kg/m^3 , su došli do istog zaključka, da mala razlika u gustini čestica ima uticaj na vrednosti zapreminskog koeficijenta prenosa mase.

ZAKLJUČAK

U ovom radu je ispitivan uticaj karakteristika različitih tipova čestica na distribuciju mehurova i zapreminski koeficijent prenosa mase u trofaznom sistemu.

Pokazano je da prisustvo čvrste faze u sistemu doprinosi znatnom povećanju vrednosti zapreminskog koeficijenta prenosa mase u odnosu na vrednosti koeficijenta koje su dobijene u dvofaznom sistemu. Povećanje brzine vazduha i tečnosti doprinose povećanju prenosa mase kiseonika iz gasovite u tečnu fazu dok karakteristike čestica igraju presudnu ulogu za prenos mase kiseonika u trofaznom sistemu. Sa povećanjem prečnika čestice raste i zapreminski koeficijent prenosa mase. Poređenjem čestica istog prečnika uočeno je da malo smanjenje u gustini čestice utiče na povećanje $k_L a$. Dobijene vrednosti u ovom eksperimentu za $k_L a$ se kreću u opsegu $0,011$ – $0,195 \text{ s}^{-1}$, u zavisnosti od protoka fluida i tipa čestica.

Dobijeni rezultati predstavljaju osnov za dalja istraživanja procesa nitrifikacije u trofaznim disperznim sistemima.

Simboli

$k_L a$	zapreminski koeficijent prenosa mase, s^{-1}
C^*	koncentracija zasićenja kiseonikom, mg/L
C_t	koncentracija rastvorenog kiseonika u vre- menu t , mg/L
d_p	prečnik čestice, mm
ρ	gustina čestice, kg/m^3
U_g	brzina gasa kroz kolonu, m/s
U_L	brzina tečnosti kroz kolonu, m/s
H	visina nasutog sloja, m

Zahvalnica

Ovaj rad je urađen u okviru projekta OI-172022, finansiranog od strane Ministarstva prosvete, nauke i tehnološkog razvoja Republike Srbije.

LITERATURA

- [1] M.Y. Chisti, *Airlift Bioreactors*, Elsevier Applied Science, London, 198.
- [2] J.C. Merchuk, M.H. Siegel, *Airlift reactors in chemical and biological technology*, *J. Chem. Technol. Biotechnol.* **41** (1988) 105–120.
- [3] F. Benyhaia, L. Jones, D. Plantaz, *Mass transfer studies in pneumatic reactors*, *Chem. Eng. Technol.* **19** (1996) 425–431.
- [4] Chia-Min Chen, Lii-Ping Leu, *A highly elevated mass transfer rate process for three-phase, liquid-continuous fluidized beds*, *Chem. Eng. J.* **81** (2001) 223–230.
- [5] M. Jamnongwong, K. Loubiere, N. Dietrich, G. Hébrard, *Experimental study of oxygen diffusion coefficients in clean water containing salt, glucose or surfactant: Consequences on the liquid-side mass transfer coefficients*, *Chem. Eng. J.* **165** (2010) 758–768.
- [6] H. Miura, T. Katoh, Y. Kawase, *Gas-liquid mass transfer in co-current three-phase fluidized beds with non-Newtonian fluids: Theoretical models based on the energy dissipation rate*, *Chem. Eng. J.* **185–186** (2012) 337–346.
- [7] E. Camarasa, C. Vial, S. Poncin, G. Wild, N. Midoux, J. Bouillard, *Influence of coalescence behaviour of the liquid and of gas sparging on hydrodynamics and bubble characteristics in a bubble column*, *Chem. Eng. Process.* **38** (1999) 329–344.
- [8] W.-D. Deckwer, A. Schumpe, *Improved tools for bubble column reactors design and scale-up*, *Chem. Eng. Sci.* **48** (1993) 889–911.
- [9] W. Yang, J. Wang, T. Wang, Y. Jin, *Experimental study on gas-liquid interfacial area and mass transfer coefficient in three-phase circulating fluidized beds*, *Chem. Eng. J.* **84** (2001) 485–490.
- [10] D.H. Lee, J.O. Kim, S.D. Kim, *Mass transfer and phase holdup characteristics in three-phase fluidized beds*, *Chem. Eng. Commun.* **119** (1993) 179–196.
- [11] A. Schumpe, W.-D. Deckwer, K.D.P. Nigam, *Gas-liquid mass transfer in three-phase fluidized beds with viscous pseudoplastic liquids*, *Can. J. Chem. Eng.* **67** (1989) 873–877.
- [12] V. Sivasubramanian, *Gas-liquid mass transfer in three-phase inverse fluidized bed reactor with Newtonian and non-Newtonian fluids*, *Asia-Pacific J. Chem. Eng.* **5** (2010) 361–368.
- [13] C. Freitas, J.A. Teixeira, *Oxygen mass transfer in a high solids loading three-phase internal-loop airlift reactor*, *Chem. Eng. J.* **84** (2001) 57–61.
- [14] M. Herskowitz, J.C. Merchuk, *A loop three-phase fluidized bed reactor*, *Can. J. Chem. Eng.* **64** (1986) 57–61.
- [15] D.B. Bukur, S.A. Patel, J.G. Daly, *Gas holdup and solids dispersion in a three-phase slurry bubble column*, *AIChE J.* **36** (1990) 1731–1735.
- [16] Imran Hamdad, Shahrzad Hashemi, Dano Rossi, Arturo Macchi, *Oxygen transfer and hydrodynamics in three-phase inverse fluidized beds*, *Chem. Eng. Sci.* **62** (2007) 7399–7405.
- [17] D. Bougard, N. Bernet, D. Cheneby, J. P. Delgenes, *Nitrification of a high-strength wastewater in an inverse turbulent bed reactor: Effect of temperature on nitrite accumulation*, *Process Biochem.* **41** (2006) 106–113.
- [18] U.J. Strotmann, G. Windecker, *Kinetics of ammonium removal with suspended and immobilized nitrifying bacteria in different reactor systems*, *Chemosphere*, DOI: 10.1016/S0045-6535(97)00341-X.

- [19] J.L. Shore, W.S. M'Coy, C.K. Gunsch, M.A. Deshusses, Application of a moving bed biofilm reactor for tertiary ammonia treatment in high temperature industrial wastewater, *Bioresour. Technol.* (2012), doi: 10.1016/j.biortech.2012.02.045.
- [20] B. Tartakovsky, E. Kotlar, M. Sheintuch, Coupled nitrification-denitrification processes in a mixed culture of coimmobilized cells: analysis and experiment, *Chem. Eng. Sci.* **51** (1996) 2327–2336.
- [21] M. Andalib, G. Nakhla, D. Sen, J. Zhu, Evaluation of biological nutrient removal from wastewater by Twin Circulating Fluidized Bed Bioreactor (TCFBBR) using a predictive fluidization model and AQUIFAS APP, *Bioresour. Technol.* **102** (2011) 2400–2410.
- [22] H.J. Lars, B. Rusten, H. Odegaard, Nitrification in a moving bed biofilm reactor, *Water Res.* (1994) 1425–1433.
- [23] Y. Dong, Z. Zhang, Y. Jin, Z. Li, J. Lu, Nitrification performance of nitrifying bacteria immobilized in waterborne polyurethane at low ammonia nitrogen concentrations, *J. Environ. Sci.* **23** (2011) 366–371.
- [24] R. Nogueira, L. F. Melo, U. Purkhold, S. Wuertz, M. Wagner, Nitrifying and heterotrophic population dynamics in biofilm reactors: effects of hydraulic retention time and the presence of organic carbon, *Water Res.* **36** (2002) 469–481.
- [25] S. Aslan, M. Dahab, Nitritation and denitritation of ammonium-rich wastewater using fluidized-bed biofilm reactors, *J. Hazard. Mater.* **156** (2008) 56–63.
- [26] B. Wang, W. Wang, H. Han, H. Hu, H. Zhuang, Nitrogen removal and simultaneous nitrification and denitrification in a fluidized bed step-feed process, *J. Environ. Sci.* **24** (2012) 303–308.
- [27] Y.X. Guo, M.N. Rathor, H.C. Ti, Hydrodynamics and mass transfer studies in a novel external-loop airlift reactor, *Chem. Eng. J.* **67** (1997) 205–214.
- [28] J.S. Lee, H.R. Jin, H. Lim, D.H. Lim, Y. Kang, S.D. Kim, K.W. Jun, Interfacial area and liquid-side and overall mass transfer coefficients in a three-phase circulating fluidized bed, *Chem. Eng. Sci.* (2013), <http://dx.doi.org/10.1016/j.ces.2013.02.012>
- [29] K. Ramesh, T. Murugesan, Minimum fluidization velocity and gas holdup in gas–liquid–solid fluidized bed reactors, *J. Chem. Technol. Biotechnol.* **77** (2002) 129–136.
- [30] H.M. Jena, B.K. Sahoo, G.K. Roy, B.C. Meikap, Characterization of hydrodynamic properties of a gas–liquid–solid three-phase fluidized bed with regular shape spherical glass bead particles, *Chem. Eng. J.* **145** (2008) 50–56.
- [31] H.M. Jena, B.K. Sahoo, G.K. Roy, B.C. Meikap, Characterization of hydrodynamic properties of a gas–liquid–solid three-phase fluidized bed with regular shape spherical glass bead particles, *Chem. Eng. J.* **145** (2008) 50–56.

SUMMARY

THE INFLUENCE OF FLUID-MECHANICAL CHARACTERISTICS OF THE SYSTEM ON THE VOLUMETRIC MASS TRANSFER COEFFICIENT AND GAS DISPERSION IN THREE-PHASE SYSTEM

Milena M. Knežević, Dragan S. Povrenović

University of Belgrade, Faculty of Technology and Metallurgy, Belgrade, Serbia

(Scientific paper)

Distribution of gas bubbles and volumetric mass transfer coefficient, $k_L a$ in a three phase system with different types of solid particles at different operation conditions were studied in this paper. The ranges of superficial gas and liquid velocities used in this study were 0.03–0.09 m/s and 0–0.1 m/s, respectively. The three different types of solid particles were used as a bed in the column (glass, d_p of 3 and 6 mm and ceramic, d_p of 6 mm). The experiments were carried out in 2D plexiglas column, 278 mm×20.4 mm×500 mm, and in cylindrical plexiglas column with the diameter of 64 mm and height of 2000 mm. The $k_L a$ coefficient increases with gas and liquid velocities. The results show that the volumetric mass transfer coefficient has higher values in three phase system with solid particles in comparison to two phase system. The particles' properties (diameter and density) have major impact on oxygen mass transfer in three phase systems.

Keywords: Volumetric mass transfer coefficient • Three phase system • Glass and ceramic particles