

OLIVERA S. NASEVA¹
IVICA S. STAMENKOVIĆ¹
IVANA B. BANKOVIĆ-ILIĆ¹
MIODRAG L. LAZIĆ¹
VLADA B. VELJKOVIĆ¹
DEJAN U. SKALA²

¹Tehnološki fakultet, Leskovac

²Tehnološko-metalurški fakultet,
Beograd

NAUČNI RAD

66.023+621.929.4:536.246

SADRŽAJ GASA U BIOREAKTORU SA VIBRACIONOM MEŠALICOM – TEČNA FAZA JE NENJUTNOVSKI FLUID

U radu su prikazani rezultati ispitivanja uticaja operativnih uslova (brzine vibracije, protoka gasa i udela čvrstih kuglica) i osobina tečne faze na sadržaj gasa u biorektoru sa vibracionom mešalicom u slučaju dvofaznog (gas-tečnost) i trofaznog (gas-tečnost-čvrsta faza) sistema. Kao tečna faza, korišćeni su vodeni rastvori natrijumove soli karboksimetilceluloze, različitog stepena polimerizacije, koncentracije 0,5 i 1 %. Kao čvrsta i gasna faza, korišćeni su kuglice od propilena, prečnika 8,3 mm i vazduh.

Bioreaktor sa vibracionom mešalicom (BVM) pripada grupi bioreaktora nove generacije, koji su razvijeni sa ciljem povećanja brzine međufaznog prenosa mase uz smanjene operativne troškove. Efikasnom kombinacijom mehaničkog mešanja i aeracije, u BVM ostvaruje se, uz relativno mali utrošak snage za mešanje faza: uniformna raspodela gasnih mehura, velika specifična međufazna površina, koja se neprekidno obnavlja, i intenzivan prenos mase iz gasne u tečnu fazu. Poznata je primena BVM za aerobno prečišćavanje otpadnih voda [1], biosintezu ekstraćelijskih polisaharida [2, 3] i biosintezu antibiotika, limunske kiseline i etanola [4].

Sadržaj gasa je značajna hidrodinamička karakteristika višefaznih reaktora, jer određuje srednje vreme zadržavanja gasa i specifičnu međufaznu površinu gas-tečnost. Dosadašnja ispitivanja sadržaja gasa u BVM, sa višefaznim sistemima (gas-tečnost i gas-tečnost-čvrsta faza) i tečnom fazom njutnovske prirode, pokazala su da operativni uslovi (brzina vibracije i prividna brzina strujanja gasa), udeo čvrste faze, osobine tečnosti i geometrija bioreaktora utiču na zadržavanje gasa u biorektoru. Sadržaj gasa se povećava sa povećanjem protoka gasa do vrednosti prividne brzine strujanja gasa 3 cm/s [5–10]; pri većim prividnim brzinama strujanja gasa sadržaj gasa dostiže maksimalnu vrednost i ne menja se pri povećanju protoka gasa [5]. Pri malim brzinama vibracije (proizvod amplitude i frekvencije vibracije) sadržaj gasa u dvofaznom BVM se smanjuje [5, 7, 9–12] ili ostaje nepromenjen [8, 13, 14], dok se pri povećanju brzine vibracije povećava, kao rezultat usitnjavanja mehura intenzivnim mešanjem i povećanog otpora strujanju gasa kroz otvore pločica. Sadržaj gasa se povećava sa povećanjem broja pločica, kao posledica smanjenog srednjeg prečnika mehura i povećanog otpora kretanju mehura [6, 8–10]. Prisustvo polipropilenskih kuglica

između pločica sprečava koalescenciju mehura i intenzivira njihovo sitnjenje, zbog čega je sadržaj gasa veći u trofaznom nego u dvofaznom BVM, pri istim radnim uslovima [15]. Pri manjem udelu čvrste faze, kuglice se relativno slobodno kreću u međuprostorima između pločica, prateći njihovo kretanje, što doprinosi dispergovanju mehura i povećava sadržaj gasa. Povećanjem udela čvrste faze, kuglice zauzimaju sve veći deo prostora između pločica i kretanje im je ograničeno, zbog čega se, pri većem protoku gasa, gasna struja ne može dispergovati, tako da se sadržaj gasa smanjuje. O uticaju nenjutnovske prirode tečne faze na sadržaj gasa u BVM nema podataka u literaturi.

Dosadašnji pokušaji postavljanja korelacije za sadržaj gasa u dvofaznom BVM mogu se svrstati u dve grupe. Prvi pristup se zasniva na primeni opšte hidrodinamičke jednačine, sa modifikovanom relativnom brzinom [8, 9], ali se on ne može primeniti u svim uslovima aeracije i mešanja. Ovaj pristup je primenljiv za suprotnosmerni tok fluida u BVM u ograničenim opsezima prečnika bioreaktora, prečnika otvora pločica i udela slobodne površine pločica i kada je sadržaj gasa manji od 0,2 [12]. Drugi pristup koristi empirijske jednačine koje povezuju sadržaj gasa sa snagom mešanja i prividnom brzinom strujanja gasa. Ova korelacija korišćena je i u dvofaznom [16] i trofaznom sistemu [17].

BVM, zbog uniformnog prostornog rasporeda i recipročnog kretanja perforiranih pločica, obezbeđuje homogeno prostorno mešanje i veliku brzinu prenosa mase kiseonika, zbog čega je pogodan za aerobne bioprocese za koje je karakteristična drastična promena reoloških osobina fermentacione tečnosti sa vremenom. Na primer, biosinteza pululana pomoću kvasca *Aerobasidum pullulans* je značajno poboljšana izvođenjem ovog aerobnog bioprocesa u BVM [18]. U toku ovog bioprocesa, kao i kod mikrobiološke sinteze drugih ekstraćelijskih polisaharida, reološke osobine fermentacione tečnosti menjaju se od njutnovskih, na početku bioprocesa, u nenjutnovske – pseudoplastične, u kasnijoj fazi bioprocesa. Mogućnost primene BVM za aerobne bi-

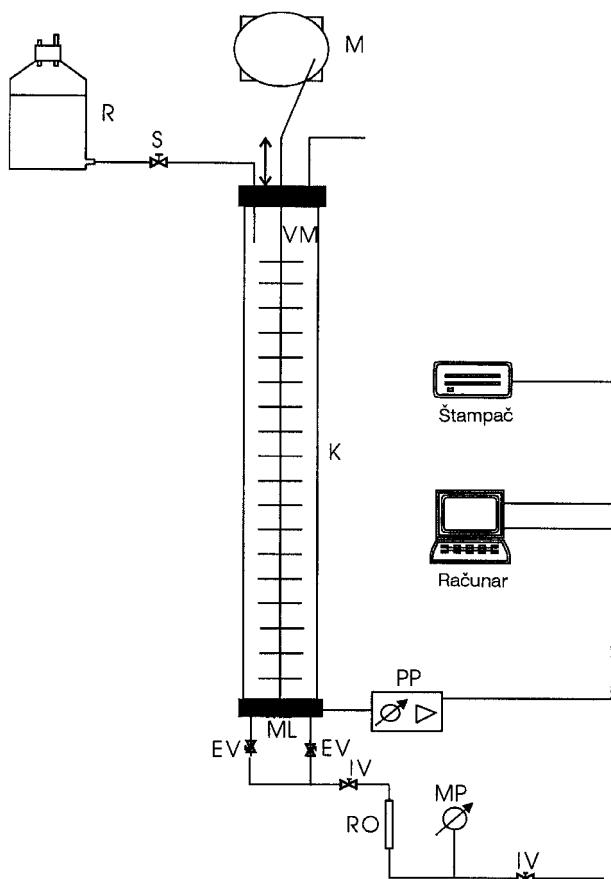
Adresa autora: Olivera Naseva, Tehnološki fakultet, Univerzitet u Nišu, Bulevar oslobođenja 124, 16000 Leskovac, Jugoslavija
Rad primljen: Mart 10, 2002.
Rad prihvaćen: Maj 26, 2002.

osinteze ekstraćelijskih polisaharida nalaže detaljnije ispitivanje njegovih hidrodinamičkih i maseno-prenosnih karakteristika u slučaju tečnosti sa pseudoplastičnim osobinama.

U radu je ispitivan sadržaj gasa u BVM prečnika 9,2 cm sa vodenim rastvorima natrijumove soli karboksimetilceluloze (KMC), različite molske mase, pri različitim operativnim uslovima. Vodeni rastvori KMC su korišćeni kao modeli fermentacionih tečnosti iz procesa biosinteze ekstraćelijskih polisaharida, čija pseudoplastična svojstva postaju izraženija sa povećanjem koncentracije rastvora i molske mase polisaharida. Cilj rada je bio utvrđivanje uticaja brzine vibracije, prividne brzine strujanja gasa, udela čvrste faze i osobina tečnosti na sadržaj gasa.

EKSPERIMENTALNI DEO

Eksperimentalna ispitivanja izvršena su na laboratorijskom postrojenju (slika 1) sa biorektorom prečnika 9,2 cm, u kome je centralno postavljena vibraciona me-



Slika 1. Šematski prikaz eksperimentalnog postrojenja (EV – elekroventil, IV – igličasti ventil, K – kolona, M – elektromotor, ML – mlaznica, MP – merač pritiska, PP – pretvarač pritiska, R – rezervoar, RO – rotametar, S – slavina, VM – vibraciona mešalica).

Figure 1. Experimental set-up (EV – electric valve, IV – needle valve, K – column, M – electric motor, ML – gas distributor, MP – pressure gauge, PP – pressure transducer, R – reservoir, RO – rotameter, S – valve, VM – reciprocating agitator).

Tabela 1. Geometrijske karakteristike kolone i radni uslovi
Table 1. Geometrical characteristics of the experimental set-up and working parameters

Unutrašnji prečnik kolone, cm	9,20
Ukupna visina kolone, cm	105
Visina radnog dela kolone, cm	85,6
Radna zapremina kolone, cm ³	5687
Broj pločica	15
Prečnik pločica, cm	9,0
Prečnik otvora pločica (unut./spolj.), cm	0,6/0,8
Debljina pločica, cm	0,1
Slobodna površina pločica, %	45,4
Rastojanje između pločica, cm	5,0
Dužina prenosne poluge, cm	12,36
Amplituda vibracije, cm	2,35
Frekvencija vibracije, s ⁻¹	2–5,5
Prividna brzina strujanja gasa, cm/s	0,5, 1 i 1,5
Udeo čvrste faze, % vol.	3,84 6,61
Broj kuglica po međuprostoru između pločica	52 90

šalica sa 15 perforiranih pločica na jednakom međusobnom rastojanju. Geometrijske karakteristike BVM i opseg operativnih uslova dati su u tabeli 1.

Kao tečna faza (uređenje šaržno), korišćeni su vodeni rastvori KMC, različitog stepena polimerizacije (PP 200 i PP 1000; "Lucel", Lučane), koncentracije 0,5 i 1 %. Ovi rastvori odlikuju se pseudoplastičnim svojstvima, sa indeksom toka u opsegu 0,46–0,93; fizičke osobine rastvora su date u tabeli 2. Kao čvrsta faza, korišćene su kuglice od polipropilena, gustine 930 kg/m³ i prečnika 8,3 ± 0,1 mm. Određen broj kuglica (52, odnosno 90, što odgovara 3,84, odnosno 6,61 % vol.) postavljen je u svaki međuprostor između pločica vibracione mešalice. Vazduh je uduvavan kroz dve mlaznice na dnu kolone; protok vazduha je meren rotametrom. Eksperimenti su izvedeni na sobnoj temperaturi (oko 20°C).

Sadržaj gasa je određivan metodom zaustavljanja protoka gasa. Nakon uspostavljanja stacionarnog stanja i željenog (uvek istog) nivoa disperzije u koloni, protok

Tabela 2. Fizičke osobine rastvora KMC
Table 2. Physical parameters of the CMC aqueous solution

	Koncentracija, %			
	KMC PP 200		KMC PP 1000	
	0,5	1	0,5	1
Gustina (kg/m ³)	1003	1006	1003	1006
Koeficijent konzistencije (Pas ⁿ)	0,0154	0,0671	0,4585	3,435
Indeks toka	0,93	0,85	0,60	0,46
Površinski napon (J/m ²)	0,0871	0,0870	0,0883	0,0789

gasa i rad mešalice se zaustave i izmeri visina praznog dela kolone. Sadržaj gasa je izračunavan iz odnosa zapremine dispergovanog gasa i radne zapremine kolone. Srednja snaga mešanja izračunavana je integrisanjem trenutne snage mešanja u određenom vremenskom periodu [5]. Trenutna snaga mešanja je izračunavana na osnovu trenutne promene pritiska na dnu kolone (meren pomoću relativnog pretvarača pritiska IHTM, Model TPr-100.05, opsega $-0,5 \pm 0,5$ kPa) i trenutne brzine kretanja pločica pomoću kompjuterskog programa. Reološke osobine vodenih rastvora KMC ispitane su pomoću rotacionog viskozimetra (Haake rotovisco RV 20) na 20°C .

REZULTATI I DISKUSIJA

Tipične zavisnosti sadržaja gasa od brzine vibracije pri određenoj prividnoj brzini strujanja gasa u dvofaznom i trofaznom sistemu prikazane su na slici 2a i b. Pri brzinama vibracije većim od približno 5 cm/s sadržaj gasa u oba sistema se povećava sa povećanjem brzine vibracije, pošto se intenziviranjem mešanja favorizuje dispergovanje mehura smicajnim silama. Vizuelno se uočava da je disperzija mehura u međuprostoru pločica homogena. Čini se da u oblasti manjih brzina vibracije (prikazano isprekidanim linijama) sadržaj gasa opada ili ostaje nepromenjen sa povećanjem brzine vibracije. Povećanje prividne brzine strujanja gasa, pri nepromenjenoj brzini vibracije, izaziva povećanje sadržaja gasa, kao rezultat zadržavanja gasa u koloni usled većeg otpora proticanju gasa kroz otvore pločica i dispergovanja gasa na račun veće eksterne energije gasne struje.

Kao što se može videti na slikama 3, 4 i 5, sadržaj gasa u BVM zavisi od koncentracije rastvora i molske mase KMC, kao rezultat promene reoloških osobina tečne faze; promena gustine i površinskog napona su zanemarljive (tabela 2). Uticaj reoloških osobina na sadržaj

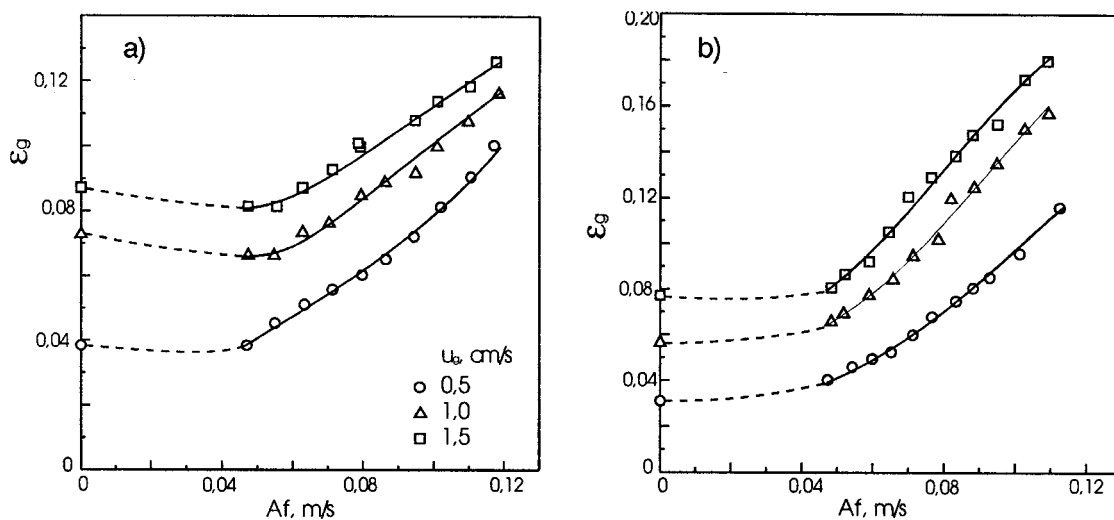
gasa je ranije utvrđen u drugim tipovima višefaznih reaktora, na primer, u barbotажnoj koloni [19, 20] i "air-lift" reaktoru [21].

Slike 3 i 4 pokazuju da je sadržaj gasa u dvofaznom sistemu manji u slučaju koncentrovanijeg rastvora KMC, nezavisno od molske mase polimera. Smanjenje sadržaja gasa sa povećanjem pseudoplastičnosti tečnosti (tj. sa smanjenjem indeksa toka), koju izaziva veća koncentracija KMC, uočeno je u slučaju rastvora KMC u barbotажnoj koloni [20] i "air-lift" reaktoru sa spojnom cirkulacijom tečnosti [21], kao rezultat favorizovanja koalescencije mehura u viskoznim rastvorima.

Isti uticaj reoloških osobina na sadržaj gasa je zapažen u trofaznom sistemu sa rastvorom KMC PP 200 (slika 3). Sadržaj gasa u trofaznom sistemu je veći nego u dvofaznom sistemu, pri istim ostalim radnim uslovima, nezavisno od koncentracije rastvora, što je rezultat sitnjenja mehura u interakciji sa kuglicama. Povećanjem broja kuglica u međuprostoru između pločica intenzivira se proces dispergovanja gasa, pa se i sadržaj gasa povećava. U BVM manjeg prečnika ($2,54\text{ cm}$) je ranije utvrđeno [15] da slobodno povratno-periodično kretanje kuglica, kao što je zapaženo u ovom radu u BVM prečnika $9,2\text{ cm}$, favorizuje sitnjenje mehura i izaziva povećanje sadržaja gasa.

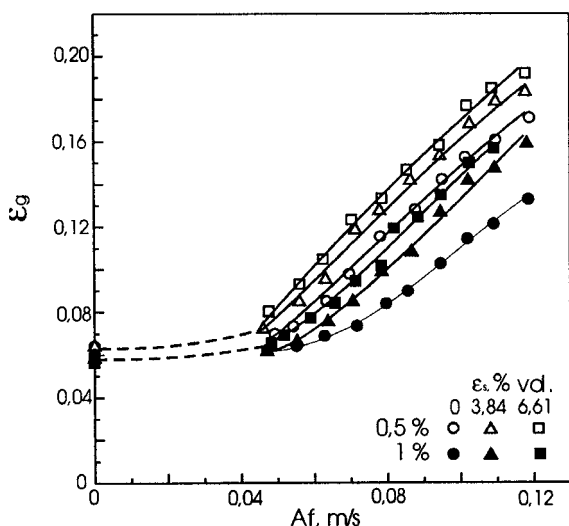
Sadržaj gasa u trofaznom sistemu rastvora KMC PP 1000 (slika 4) zavisi od rezultujućeg uticaja brzine vibracije, protoka gasa, udela čvrste faze i reoloških osobina (viskoznosti) tečnosti na dispergovanje i koalescenciju mehura, koji se odigravaju u međuprostorima između pločica mešalice. Generalno, sadržaj gasa se povećava sa povećanjem brzine vibracije, protoka gasa i udela čvrste faze.

U rastvoru manje koncentracije ($0,5\%$) sadržaj gasa u trofaznom sistemu je veći nego u dvofaznom, neza-



Slika 2. Zavisnost sadržaja gasa od intenziteta vibracije i prividne brzine gasa: a) dvofazni sistem (tečnost: 1% rastvor KMC PP 1000) i b) trofazni sistem (tečnost: 1% rastvor KMC PP 200, udeo čvrste faze: 6,61% vol.).

Figure 2. Dependence of gas holdup on the vibration rate and superficial gas velocity: a) two-phase system (liquid phase: 1% CMC PP 1000) and b) three-phase system (liquid phase: 1% CMC PP 200, solid fraction: 6.61%).



Slika 3. Zavisnost sadržaja gasa od intenziteta vibracije, udela čvrste faze i koncentracije rastvora KMC PP 200 pri prividnoj brzini strujanja gasa 1,0 cm/s.

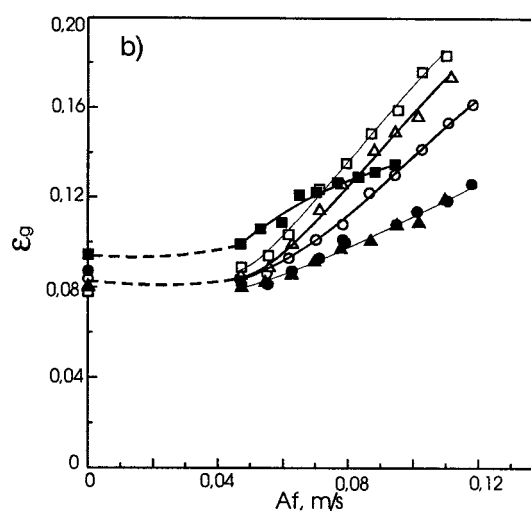
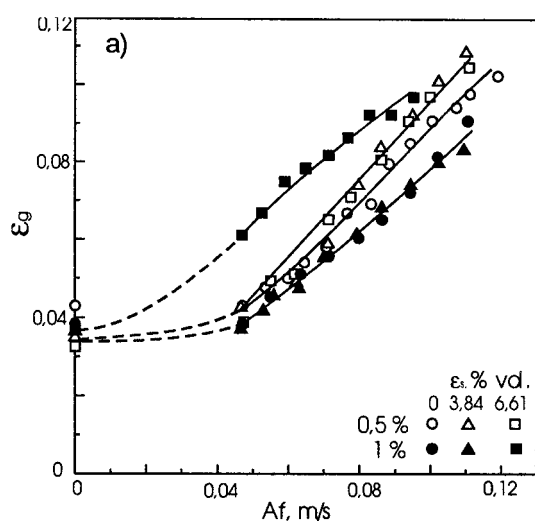
Figure 3. Dependence of gas holdup on the vibration rate, solid fraction and concentration of CMC PP 200 at a superficial gas velocity of 1.0 cm/s.

visno od protoka gasa (slika 4a i b), zbog doprinosa kuglica sitnjenju mehura. Sadržaj gasa je, pri manjoj prividnoj brzini strujanja gasa (0,5 cm/s), praktično isti za oba udela čvrste faze (slika 4a), dok je, pri većoj prividnoj brzini strujanja gasa (1,5 cm/s), veći pri većem udelu čvrste faze (slika 4b). Verovatno, pri manjoj prividnoj brzini strujanja gasa, doprinos interakcije mehura sa kuglicama sitnjenju mehura je maksimalan već pri manjem udelu čvrste faze, pa povećanje broja kuglica po međuprostoru između pločica mešalice ne uzrokuje povećanje sadržaja gasa (slika 4a). Ovaj, neiskorišćeni kapacitet sitnjenja koji poseduje veći broj kuglica dolazi

do izražaja pri većoj prividnoj brzini gasa, što rezultuje u povećanju sadržaja gasa (slika 4b).

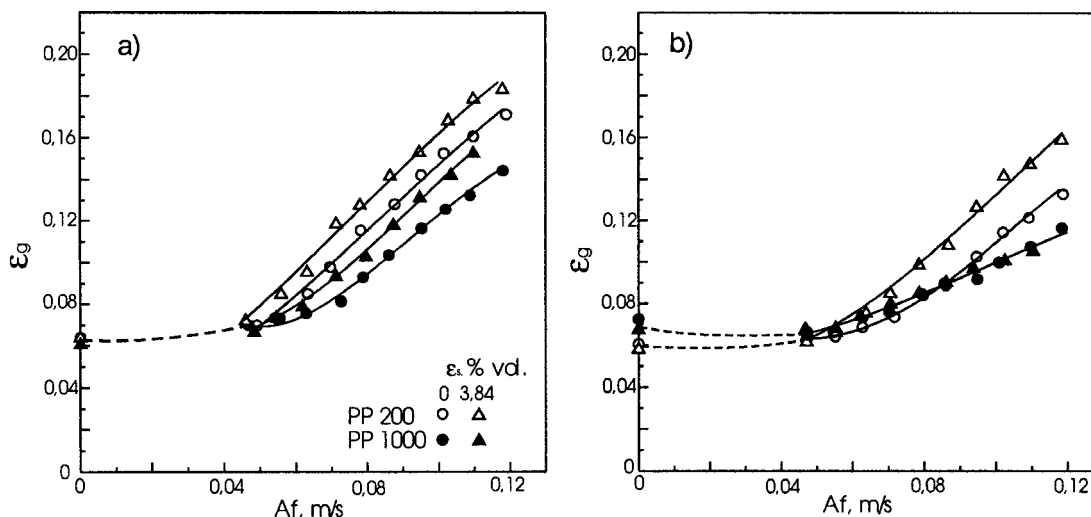
U rastvoru veće koncentracije (1%) sadržaj gasa je, nezavisno od protoka gasa, veći pri većem nego pri manjem udelu čvrste faze u čitavom opsegu brzine vibracije, dok je praktično isti u dvofaznom i trofaznom sistemu sa manjim udelom čvrste faze (slika 4a i b). Kretanje kuglica kroz međuprostor između pločica mešalice je ograničeno većom viskoznošću rastvora, što ima nepovoljan efekat na proces sitnjenja mehura. Drugim rečima, pozitivan efekat kuglica, koji favorizuje sitnjenje mehura, poništava se negativnim efektom viskoznosti, koja favorizuje koalescenciju mehura. Kao posledica, sadržaj gasa trofaznog sistema pri manjem udelu čvrste faze (3,84 % vol.) isti je kao u dvofaznom sistemu. Povećanjem broja kuglica po međuprostoru između pločica povećava se "kapacitet" sitnjenja i sadržaj gasa se povećava pri povećanju udela čvrste faze od 3,84 % vol. na 6,61 % vol.

Neočekivano, u slučaju trofaznog sistema sa rastvorom KMC PP 1000 i većeg udela čvrste faze (6,61 % vol.), sadržaj gasa je veći u koncentrovanijem rastvoru, veće viskoznosti, u čitavom opsegu brzine vibracije, pri manjoj prividnoj brzini (slika 4a), odnosno pri manjim brzinama vibracije (< 7 cm/s) pri većoj prividnoj brzini (slika 4b). Ranije je pokazano da, za određene uslove protoka gasa i brzine vibracije, sadržaj gasa u BVM prolazi kroz maksimum sa povećanjem udela čvrste faze [15]. Ako položaj "maksimuma" zavisi od reoloških osobina, onda se zapažena "anomalija" uticaja viskoznosti tečne faze na sadržaj gasa može objasniti na sledeći način: kod tečnosti veće viskoznosti, pri istoj brzini vibracije, režim strujanja se pomera prema laminarnom režimu, a "maksimum" zavisnosti sadržaja gasa od udela čvrste faze – prema oblasti većih udela čvrste faze. Prisustvo



Slika 4. Zavisnost sadržaja gasa od intenziteta vibracije, udela čvrste faze i koncentracije rastvora KMC PP 1000 pri prividnoj brzini strujanja gasa a) 0,5 cm/s i b) 1,5 cm/s.

Figure 4. Dependence of gas holdup on the vibration rate, solid fraction and concentration of CMC PP 1000 at the superficial gas velocities of a) 0.5 cm/s and b) 1.5 cm/s.



Slika 5. Zavisnost sadržaja gasa od intenziteta vibracije, udela čvrste faze i koncentracije rastvora KMC PP 200 i PP 1000 pri prividnoj brzini strujanja gasa 1,0 cm/s: a) 0,5 % i b) 1,0 %.

Figure 5. Dependence of gas holdup on the vibration rate, solid fraction and concentration of CMC PP 200 and PP 1000 at the superficial gas velocities of 1.0 cm/s: a) 0.5 % and b) 1.0 %.

čvrste faze može uticati, u kombinaciji sa drugim uticajnim faktorima, na režim strujanja i procese dispergovanja i koalescencije na složen način, zbog čega je promena sadržaja gasa složena. Ovaj neočekivani rezultat implicira, takođe, potrebu za daljim istraživanjima uticaja nenjutnovskih osobina tečne faze na sadržaj gasa u višefaznom BVM, o kome, i onako, postoji ograničeno znanje.

Uticaj stepena polimerizacije KMC, tj. njene molske mase na sadržaj gasa zavisi od koncentracije rastvora, brzine vibracije i udela čvrste faze (slika 5). U dvofaznim i trofaznim sistemima sa rastvorima KMC koncentracije 0,5 %, sadržaj gasa je manji u slučaju KMC većeg stepena polimerizacije, zbog njene veće pseudoplastičnosti koja favorizuje koalescenciju mehura (slika 5a). Kod rastvora KMC koncentracije 1 %, uticaj stepena polimerizacije KMC na sadržaj gasa zavisi od brzine vibracije i udela čvrste faze. U dvofaznim i trofaznim (udeo čvrste faze 3,84 % vol.) sistemima stepen polimerizacije KMC ne utiče na sadržaj gasa u oblasti manjih brzina vibracije, dok je pri većim brzinama vibracije sadržaj gasa manji u rastvoru KMC većeg stepena polimerizacije. Brzina vibracije, pri kojoj sadržaj gasa postaje funkcija stepena polimerizacije KMC, zavisi od prividne brzine strujanja gasa i ima manju vrednost pri većim prividnim brzinama strujanja gasa.

Sadržaj gasa u višefaznim reaktorima se obično koreliše sa snagom mešanja i prividnom brzinom strujanja gasa. Ovaj pristup je već korišćen u slučaju višefaznog BVM sa njutnovskim tečnostima [16, 17]. Pokušaj da se isti pristup primeni i u slučaju višefaznog BVM sa rastvorima KMC, koji se odlikuju pseudoplastičnim svojstvima, doveo je do posebnih korelacija za KMC različitog stepena polimerizacije, koje važe nezavisno od koncentracije rastvora i udela čvrste faze. Sadržaj gasa

u dvo- i trofaznim sistemima sa rastvorima KMC PP 200 može se korelisati jednačinom (1):

$$\varepsilon_g = 0,043 P_{sr}^{0,39} U_g^{0,53} \quad (1)$$

(relativno odstupanje $\pm 14,4$ %, 270 podataka), a u sistemima sa KMC PP 1000 – jednačinom (2):

$$\varepsilon_g = 0,043 P_{sr}^{0,31} U_g^{0,44} \quad (2)$$

(relativno odstupanje $\pm 18,9$ %, 171 podatak). EkspONENT za snagu mešanja je manji od eksponenta za prividnu brzinu gasa, što znači da energija koju tok gasa predaje sistemu ima veći uticaj na sadržaj gasa nego energija mešalice. EkspONENT prividne brzine strujanja gasa je veći, a ekspONENT snage mešanja manji od odgovarajućeg ekspONENTa korelacije za sadržaj gasa u višefaznom BVM sa vodom [15].

ZAKLJUČAK

Sadržaj gasa u BVM zavisi od brzine vibracije, prividne brzine strujanja gasa, udela čvrste faze i reoloških osobina tečne faze. Nezavisno od vrste sistema, sadržaj gasa u BVM se povećava sa povećanjem brzine vibracije i protoka gasa. Pri nepromenjenim ostalim uslovima, sadržaj gasa u trofaznom sistemu je veći nego u dvofaznom, a sadržaj gasa se, generalno, povećava sa povećanjem udela čvrste faze, zbog doprinosa kuglica sitnjenju mehura. Sadržaj gasa u BVM je manji u slučaju rastvora KMC veće koncentracije i veće molske mase, zbog favorizovanja koalescencije u rastvorima veće pseudoplastičnosti (tj. veće viskoznosti). Ovim se može objasniti smanjenje brzine prenosa mase kiseonika u kasnijoj fazi biosinteze polisaharida, kada povećanje koncentracije i molske mase polisaharida povećava pseudoplastičnost feremntacione tečnosti, a smanjuje sadržaj gasa, specifičnu međufaznu površinu i zapreminski koeficijent prenosa mase kiseonika.

SPISAK OZNAKA

- A – amplituda vibracije, m
 Af – intenzitet vibracije, m/s
 f – frekvencija, Hz
 P_{sr} – srednja snaga mešanja, W
 u_g – prividna brzina strujanja gasa, cm/s
 ε_g – sadržaj gasa
 ε_s – zapreminski udeo čvrste faze.

LITERATURA

- [1] H. Brauer, D. Sucker, Ger. Chem. Eng. **2** (1979) 77
 [2] J. Audet, M. Lounes, J. Thibault, Bioproc. Eng. **15** (1996) 209
 [3] V. Veljković, M. Lazić, D. Rutić, S. Jovanović, D. Skala, J. Serb. Chem. Soc. **35** (1990) 483
 [4] H. Brauer, Bioproc. Eng. **6** (1991) 1
 [5] I. Banković-Ilić, V. Veljković, M. Lazić, D. Skala, Chem. Eng. Comm. **134** (1995) 17
 [6] H.G. Gomma, J. Landau, A.M. Al Tawell, Can. J. Chem. Eng. **69** (1991) 228
 [7] M. Lounes, J. Thibault, Can. J. Chem. Eng. **71** (1993) 497
 [8] N.V. Rama Rao, M.H.I. Baird, Can. J. Chem. Eng. **66** (1988) 211
 [9] N.V. Rama Rao, N.S. Srinivas, Y.B.G. Varma, Can. J. Chem. Eng. **61** (1983) 168
 [10] V. Veljković, D. Skala, Can. J. Chem. Eng. **64** (1986) 906
 [11] A. Sundaresan, Y.B.G. Varma, Can. J. Chem. Eng. **68** (1990) 560
 [12] V. Veljković, Doktorska disertacija, TMF, Beograd, 1985
 [13] J. Boyle, Doktorska disertacija, Univ. New Brunswick, Canada, 1975
 [14] N.S. Yang, Z.Q. Shen, B.H. Chen, A.F. McMillan, Ind. Eng. Chem. Proc. Des. Dev. **25** (1986) 660
 [15] D. Skala, V. Veljković, V. Janjić, M. Lazić, I. Banković-Ilić, Can. J. Chem. Eng. **71** (1993) 817
 [16] D. Skala, V. Veljković, 9th Congress CHISA, Prague, 1987
 [17] I. Banković-Ilić, V. Veljković, M. Lazić, D. Skala, 11th Congress CHISA (paper No. E4.27), Prague (1993).
 [18] M. Lounes, J. Audet, J. Thibault, A. LeDuy, Bioproc. Eng. **13** (1995) 1
 [19] A.K. Pradhan, R.K. Parichha, P. De, Can. J. Chem. Eng. **71** (1993) 468
 [20] Y. Kawase, S. Umeno, T. Kumagai, Chem. Eng. J. **50** (1992) 1
 [21] M. Gavrilescu, R.Z. Tudose, Bioproc. Eng. **18** (1998) 17

SUMMARY**GAS HOLDUP IN A RECIPROCATING PLATE BIOREACTOR: NON-NEWTONIAN LIQUID PHASE**

(Scientific paper)

Olivera S. Naseva¹, Ivica S. Stamenković¹, Ivana B. Banković-Ilić¹, Miodrag L. Lazić¹, Vlada B. Veljković¹, Dejan U. Skala²

¹Faculty of Technology, Leskovac,

²Faculty of Technology and Metallurgy, Belgrade

The gas holdup was studied in non-newtonian liquids in a gas-liquid and gas-liquid-solid reciprocating plate bioreactor. Aqueous solutions of carboxy methyl cellulose (CMC; Lucel, Lučane, Yugoslavia) of different degrees of polymerization (PP 200 and PP 1000) and concentration (0,5 and 1%), polypropylene spheres (diameter 8.3 mm; fraction of spheres: 3.8 and 6.6% by volume) and air were used as the liquid, solid and gas phase. The gas holdup was found to be dependent on the vibration rate, the superficial gas velocity, volume fraction of solid particles and rheological properties of the liquid phase. Both in the gas-liquid and gas-liquid-solid systems studied, the gas holdup increased with increasing vibration rate and gas flow rate. The gas holdup was higher in three-phase systems than in two-phase ones under other operating conditions being the same. Generally, the gas holdup increased with increasing the volume fraction of solid particles, due to the dispersion action of the solid particles, and decreased with increasing non-newtonian behaviour (decreasing flow index), i.e. with increasing degree of polymerization and solution concentration of CMC applied, as a result of gas bubble coalescence.

Key words: Gas holdup • Reciprocating plate bioreactor • Reciprocating plate column • Gas-liquid reactors • Gas-liquid-solid reactors •

Ključne reči: Sadržaj gasa • Bioreaktor sa vibracionom mešalicom • Kolona sa vibracionom mešalicom •