

Doktorska disertacija

Hidrodinamika i prenos mase u airlift reaktoru sa membranom

Predrag S. Kojić

Mentori: dr Dragan Petrović, vanr. prof.
dr Svetlana Popović, doc.

Novi Sad, 2016.

**UNIVERZITET U NOVOM SADU
TEHNOLOŠKI FAKULTET**

KLJUČNA DOKUMENTACIJSKA INFORMACIJA

Redni broj:
RBR

Identifikacioni broj:
IBR

Tip dokumentacije: Monografska dokumentacija
TD

Tip zapisa: Tekstualni štampani materijal
TZ

Vrsta rada: Doktorska disertacija
VR

Ime i prezime autora: Predrag Kojić
AU

Mentori: dr Dragan Petrović, vanredni profesor;
MN dr Svetlana Popović, docent.

Naslov rada: Hidrodinamika i prenos mase u airlift reaktoru sa
NR membranom

Jezik publikacije: Srpski (latinica)
JP

Jezik izvoda: Srpski/Engleski
JI

Zemlja publikovanja: Republika Srbija
ZP

Uže geografsko područje: AP Vojvodina
UGP

Godina: 2016
GO

Izdavač: Autorski reprint
IZ

Mesto i adresa: Novi Sad, Bulevar cara Lazara 1
MA

Fizički opis rada: 6 poglavlja; 94 stranica; 144 reference; 11 tabela; 45 slika
FO

Naučna oblast: Hemijsko-tehnološke nauke
NO

Naučna disciplina: ND	Hemijsko inženjerstvo
Predmetna odrednica, ključne reči: PO	Airlift reaktori, membrana, razblaženi rastvori alkohola, uvodnik gasa, sadržaj gasa, brzina tečnosti, zapreminski koeficijent prenosa mase, neuronska mreža
UDK	
Čuva se: ČU	Biblioteka Tehnološkog fakulteta u Novom Sadu, Bul. cara Lazara 1, 21000 Novi Sad, Srbija
Važna napomena: VN	Nema
Izvod: IZ	<p>U okviru doktorske disertacije izvedena su eksperimentalna istraživanja osnovnih hidrodinamičkih i maseno-prenosnih karakteristika airlift reaktora sa spoljnom recirkulacijom sa ugrađenom višekanalnom cevnom membranom u silaznu cev (ALSRM). ALSRM je radio na dva načina rada: bez mehurova u silaznoj cevi (način rada A) i sa mehurovima u silaznoj cevi (način rada B) u zavisnosti od nivoa tečnosti u gasnom separatoru. Ispitivani su uticaji prividne brzine gasa, površinskih osobina tečne faze, tipa distributora gasa i prisustva mehurova gasa u silaznoj cevi na sadržaj gasa, brzinu tečnosti u silaznoj cevi i zapreminski koeficijent prenosa mase u tečnoj fazi u ALSRM. Rezultati su poređeni sa vrednostima dobijenim u istom reaktoru ali bez membrane (ALSR). Sadržaj gasa u uzlaznoj i silaznoj cevi određivan je pomoću piezometarskih cevi merenjem hidrostatičkog pritiska na dnu i vrhu uzlazne i silazne cevi. Brzina tečnosti merena je pomoću konduktometrijskih elektroda dok je zapreminski koeficijent prenosa mase dobijen primenom dinamičke metode merenjem promene koncentracije kiseonika u vremenu optičkom elektrodom. Eksperimentalni rezultati pokazuju da sadržaj gasa, brzina tečnosti i zapreminski koeficijent prenosa mase zavise od prividne brzine gasa, vrste alkohola i tipa distributora gasa kod oba reaktora. Višekanalna cevna membrana u silaznoj cevi uzrokovala je povećanje ukupnog koeficijenta trenja za 90% i time dovela do smanjenja brzine tečnosti u silaznoj</p>

cevi do 50%. Smanjena brzina tečnosti u silaznoj cevi povećala je sadržaj gasa do 16%. Predložene neuronske mreže i empirijske korelacije odlično predviđaju vrednosti za sadržaj gasa, brzinu tečnosti i zapreminski koeficijent prenosa mase.

Datum prihvatanja teme od strane NN veća: DP 17.07.2015.

Datum odbrane: DO

Članovi komisije: KO

PRESEDNIK: dr Radovan Omorjan, redovni profesor, Tehnološki fakultet u Novom Sadu;

ČLAN/MENTOR: dr Dragan Petrović, vanredni profesor, Tehnološki fakultet u Novom Sadu;

ČLAN/MENTOR: dr Svetlana Popović, docent, Tehnološko fakultet u Novom Sadu;

ČLAN: dr Vlada Veljković, redovni profesor, Tehnološki fakultet u Leskovcu;

ČLAN: dr Aleksandar Jokić, docent, Tehnološko fakultet u Novom Sadu.

**UNIVERSITY OF NOVI SAD
FACULTY OF TECHNOLOGY**

KEY WORD DOCUMENTATION

Accession number:
ANO

Identification number:
INO

Document type: Monograph documentation
DT

Type of record: Textual printed material
TR

Contents code: Ph.D. Thesis
CC

Author: Predrag Kojić
AU

Mentors: Dr. Dragan Petrović, Associate Professor
Dr. Svetlana Popović, Assistant Professor
MN

Title: Hydrodynamics and mass transfer of an airlift reactor with
inserted membrane
TI

Language of text: Serbian (Latin)
LT

Language of abstract: Serbian (Latin)/English
LA

Country of publication: Republic of Serbia
CP

Locality of publication: AP Vojvodina
LP

Publication year: 2016
PY

Publisher: Author's reprint
PU

Publication place: 21000 Novi Sad, Serbia
Bulevar cara Lazara 1
PP

Physical description: 6 chapters; 94 pages; 144 references; 11 tables;
45 figures
PD

Scientific field: Chemical-Technological Sciences
SF

Scientific discipline SD	Chemical Engineering
Subject, Key words SKW	airlift, membrane, dilute alcohol solutions, gas distributor, gas holdup, liquid velocity, gas-liquid mass transfer coefficient, artificial neural network
UC	
Holding data: HD	Library of Faculty of Technology Bul. Cara Lazara 1, 21000 Novi Sad, Serbia
Note: N	No notes
Abstract: AB	<p>An objective of this study was to investigate the hydrodynamics and the gas-liquid mass transfer coefficient of an external-loop airlift membrane reactor (ELAMR). The ELAMR was operated in two modes: without (mode A), and with bubbles in the downcomer (mode B), depending on the liquid level in the gas separator. The influence of superficial gas velocity, gas distributor's geometry and various diluted alcohol solutions on hydrodynamics and gas-liquid mass transfer coefficient of the ELAMR was studied. Results are commented with respect to the external loop airlift reactor of the same geometry but without membrane in the downcomer (ELAR). The gas holdup values in the riser and the downcomer were obtained by measuring the pressures at the bottom and the top of the riser and downcomer using piezometric tubes. The liquid velocity in the downcomer was determined by the tracer response method by two conductivity probes in the downcomer. The volumetric mass transfer coefficient was obtained by using the dynamic oxygenation method by dissolved oxygen probe. According to experimental results gas holdup, liquid velocity and gas-liquid mass transfer coefficient depend on superficial gas velocity, type of alcohol solution and gas distributor for both reactors. Due to the presence of the multichannel membrane in the downcomer, the overall hydrodynamic resistance increased up to 90%, the liquid velocity in the downcomer decreased up to 50%, while the gas holdup in the riser of the ELAMR increased maximally by 16%. The values of the gas holdup, the liquid velocity and the gas-liquid mass transfer coefficient predicted by the application of empirical power law correlations and feed forward back propagation neural network (ANN) are in very good agreement with experimental values.</p>
Accepted on Scientific Board on: AS	17.07.2015.

Defended:
DE

Thesis Defend Board:
DB

PRESIDENT: Dr. Radovan Omorjan, Full Professor,
Faculty of Technology, University of Novi Sad;

MEMBER/MENTOR: Dr. Dragan Petrović, Associate Professor
Faculty of Technology, University of Novi Sad;

MEMBER/MENTOR: Dr. Svetlana Popović, Assistant Professor,
Faculty of Technology, University of Novi Sad;

MEMBER: Dr. Vlada Veljković, Full Professor,
Faculty of Technology Leskovac, University of Niš;

MEMBER: Dr. Aleksandar Jokić, Assistant Professor,
Faculty of Technology, University of Novi Sad.

Sadržaj

Uvod.....	1
1. Airlift reaktori.....	2
1.1. Definicija i tipovi airlift reaktora	2
1.2. Procesi u kojima se koriste airlift reaktori	3
1.3. Hidrodinamika airlift reaktora sa spoljnom recirkulacijom	4
2. Airlift reaktori sa membranom	11
2.1. Definicija i tipovi airlift reaktora sa membranom	11
2.2. Procesi i istraživanja u kojima se koriste airlift reaktori sa membranom	13
2.3. Hidrodinamika i kontrola prljanja u airlift reaktoru sa membranom	15
3. Eksperimentalni deo	19
3.1. Aparatura	19
4. Rezultati i diskusija.....	24
4.1. Hidrodinamički režimi	24
4.2. Ukupni koeficijent trenja	28
4.3. Sadržaj gasa.....	30
4.3.1. Određivanje sadržaja gasa	36
4.3.2. Sadržaj gasa u airlift reaktoru sa i bez membrane	37
4.3.3. Uticaj dodatka alkohola na sadržaj gasa	40
4.3.4. Uticaj distributora gasa na sadržaj gasa.....	43
4.3.5. Zaključci o sadržaju gasa	45
4.4. Brzina tečnosti u silaznoj cevi	46
4.4.1. Određivanje brzine tečnosti.....	49
4.4.2. Brzina tečnosti u silaznoj cevi u airlift reaktoru sa i bez membrane	50
4.4.3. Uticaj alkohola na brzinu tečnosti.....	53
4.4.4. Uticaj distributora gasa na brzinu tečnosti	55
4.4.5. Zaključci o brzini tečnosti.....	57
4.5. Zapreminski koeficijent prenosa mase	58
4.5.1. Određivanje zapreminskog koeficijenta prenosa mase	61
4.5.2. Zapreminski koeficijent prenosa mase u airlift reaktoru sa i bez membrane	63
4.5.3. Uticaj alkohola na zapreminski koeficijent prenosa mase.....	64
4.5.4. Uticaj distributora gasa na zapreminski koeficijent prenosa mase	65

4.5.5. Uticaj hidrodinamike na zapreminski koeficijent prenosa mase	67
4.5.6. Zaključci o zapreminskom koeficijentu prenosa mase	69
5. Korelisanje rezultata	70
5.1. Empirijske korelacije	70
5.2. Veštačke neuronske mreže	74
6. Zaključci.....	88
Spisak oznaka	89
Literatura	91

Uvod

Poslednjih decenija airlift reaktori imaju široku upotrebu u hemijskim i biohemijskim procesima, pri prečišćavanju otpadnih voda, kao i raznim fermentacionim procesima. Njihove najznačajnije prednosti su: samoindukujuće strujanje tečnosti usled razlike gustina fluida u uzlaznoj i silaznoj cevi, rad sa gas-tečno-čvrsto sistemima u fluidizovanom sloju, jednostavna konstrukcija uz odsustvo pokretnih delova, pouzdana regulacija temperature, dobro mešanje i niska cena proizvodnje.

Ekspanzija hemijske, a naročito biohemijske industrije i tretmana otpadnih voda dovela je do potrebe za *in situ* separacijom produkta. Stoga su airlift reaktori kombinovani sa separacionim tehnikama kao što su: ekstrakcija tečno-tečno [1,2] i adsorpcija jonoizmenjivačkim smolama [3]. Poslednjih godina postala je aktuelna *in situ* separacija pomoću membrana. Airlift reaktor sa membranom omogućava istovremeno formiranje i *in situ* separaciju produkta. Proces ima mnoge prednosti kao što su: stalan sastav i odličan kvalitet efluenta, jednostavnu konstrukciju uređaja i malu količinu otpadnog toka [4]. Prednost ovih reaktora je ta što mehurovi gasa pored toga što uzrokuju strujanje tečnosti, smanjuju i prljanje membrane.

Airlift reaktor sa membranom je relativno nov tip airlift reaktora i još uvek postoji prostor za unapređenje i postavljanje optimalnih radnih uslova i najbolje geometrijske konstrukcije. Iz tog razloga neophodno je potpuno razumevanje fenomena koji se u njemu odvijaju. Rezultati istraživanja u doktorskoj tezi značajno će obogatiti dosadašnja istraživanja, zbog odabira inovativnih geometrijskih karakteristika samog reaktora (nova konfiguracija) i distributora gasa, a zatim i karakteristika tečne faze. Takođe, empirijske korelacije koje se mogu naći u literaturi se ne mogu primeniti na širi opseg podataka jer su prilagođene određenoj geometriji reaktora. Zbog toga su istraživanja u ovom doktoratu posvećena razvijanju neuronske mreže koja može predvideti izlazne hidrodinamičke i maseno-prenosne parametre za široki opseg ulaznih lako merljivih veličina.

Osnovni cilj doktorata je da se eksperimentalno i teorijski ispituju uticaji prividne brzine gasa, osobina tečne faze, tipa distributora, otpora membrane i prisustva mehurova gasa u silaznoj cevi na sadržaj gasa, brzinu tečnosti u silaznoj cevi i zapreminski koeficijent prenosa mase u tečnoj fazi. Pored toga, konstrukcija ovog reaktora treba da obezbedi uvlačenje velikih mehurova gasa u silaznu cev gde je smeštena membrana sa ciljem da se na taj način uspori prljanje membrane.

1. Airlift reaktori

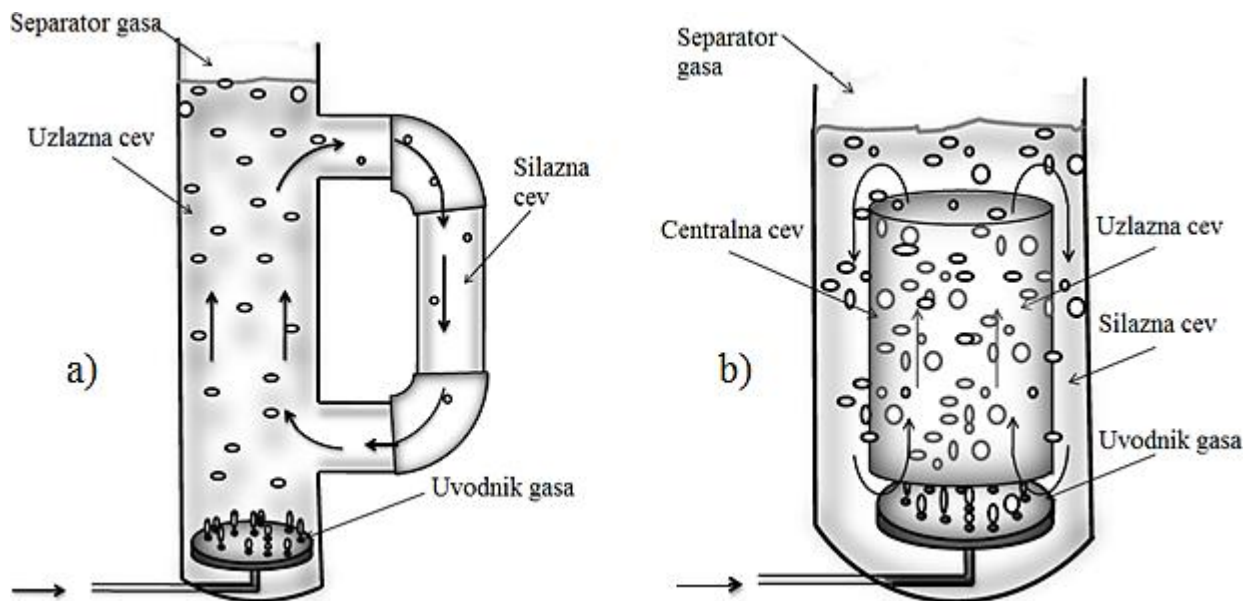
1.1. Definicija i tipovi airlift reaktora

Istorija airlift reaktora počinje pre više od 80 godina: u Pachukinim ili Brownovim tankovima gde se gas kontinualno dovodi u jedan deo pregrađene posude. Ovi tankovi se koriste u metalurgiji za luženje ruda zlata, urana i drugih metala zbog mogućnosti efikasnog mešanja bez pokretnih delova (Merchuk i Siegel, 1988). Prvi jasno definisan koncept barbotazne kolone sa recirkulacijom tečnosti patentirali su Lefrancois i sar. (1955).

Airlift reaktori se definišu kao kontaktori gas-tečno ili gas-tečno-čvrsto u kojima je gas disperzna faza i dovodi se kontinualno, dok je tečnost kontinualna faza i dovodi se kontinualno ili šaržno. Na osnovu geometrijskih karakteristika mogu se podeliti u dve glavne grupe:

- a) airlift reaktori sa spoljnom recirkulacijom tečnosti (ALSR) i
- b) airlift reaktori sa unutrašnjom recirkulacijom tečnosti (ALUR).

Kod ALSR (slika 1.1a) tečnost cirkuliše kroz odvojene cevi (uzlaznu i silaznu) i uglavnom ne dolazi do recirkulacije gasne faze, za razliku od ALUR (slika 1.1b) gde se recirkulacija tečnosti i gasne faze postiže postavljanjem centralne cevi u kolonu.



Slika 1.1. Osnovni tipovi airlift reaktora; (a) airlift reaktor sa spoljnom recirkulacijom tečnosti i (b) airlift reaktor sa unutrašnjom recirkulacijom tečnosti

Prednosti ALUR su jednostavna konstrukcija i jednostavno menjanje geometrije reaktora izmenom centralne cevi. Osnovni nedostatak je što se brzina tečnosti ne može regulisati. Kod ALSR ovaj problem se može prevazići jednostavnom ugradnjom ventila u silaznu cev. Kako navode Weiland i Onken [5], prednosti ALSR u odnosu na ALUR su: potpuno razdvajanje gasa od tečnosti na vrhu uređaja, što kod biohemijskih reakcija sprečava akumulaciju CO₂ i N₂, i jasno definisane zone toka na vrhu uređaja, gde dolazi do promene smera cirkulacije tečnosti. Kod ovog tipa reaktora je olakšana i kontrola temperature što je velika prednost kod bioloških sistema kod kojih je uzak opseg optimalnih temperatura [6]. Kako se hlađenje i grejanje odvija preko zida reaktora ALSR je u prednosti jer je uzlazna cev u dodiru sa spoljnom okolinom u odnosu na ALUR. Pored toga, kod ALSR ne postoji problem sa stvaranjem pene kao kod ALUR.

Iako je konstrukcija oba tipa reaktora jednostavna, njihovo modelovanje i projektovanje nije nimalo lak zadatak, zbog složene međusobne zavisnosti između hidrodinamičkih veličina u dvofaznom toku.

1.2. Procesi u kojima se koriste airlift reaktori

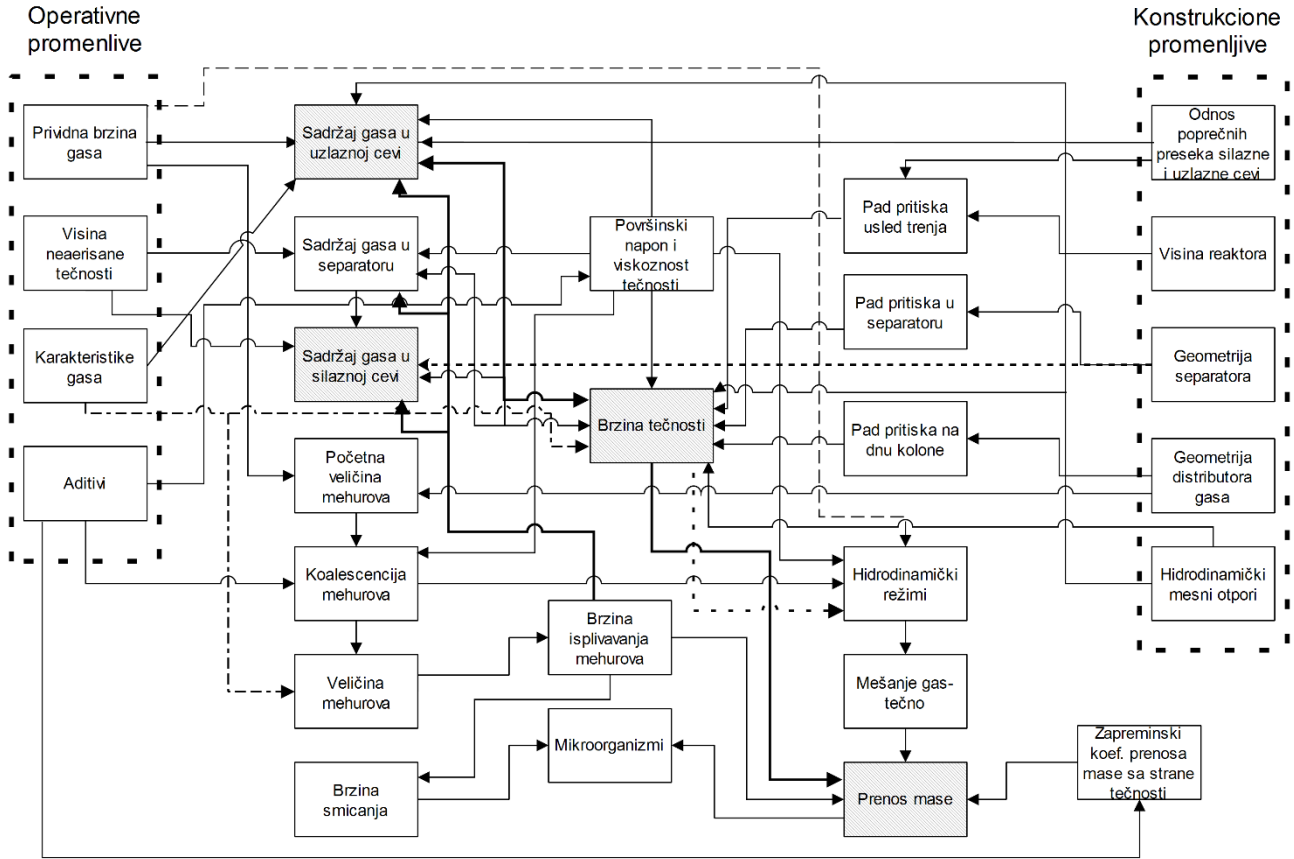
Airlift reaktori mogu se primeniti za ostvarivanje bilo kog kontakta gas-tečno ili gas-tečno-čvrsto. Čvrsta faza može da bude reaktant, proizvod reakcije, katalizator, nosač aktivne biomase ili može da se doda da bi se poboljšao kontakt između faza. Oni se široko koriste u biotehnologiji, za tretman otpadnih voda, u hemijskoj industriji kao apsorberi, striperi i hemijski reaktori za različite procese, kao što su likvefakcija uglja, Fišer-Tropsš sinteza, i mnogi drugi. U poslednje vreme se koriste kao fotobioreaktori za uzgoj silikatnih algi. Prema Pošarcu [7], neki od najvažnijih procesa u kojima se koriste ovi reaktori su sledeći:

- Produkcija jednoćelijskih proteina
- Kontinualna proizvodnja piva sa flokulentnim kvascima
- Produkcija sirćeta
- Vlažna oksidacija otpadnih voda
- Parcijalna oksidacija etilena u acetaldehid
- Oksidacija etilena u vinilacetat
- Oksidacija acetaldehida u sirćetnu kiselinu
- Produkcija sirćetne kiseline iz butanola

- Proizvodnja benzojeve kiseline iz toluena
- Oksidacija kumena u fenol i aceton
- Oksidacija ksilena u ftalnu kiselinu
- Alkilacija fenola
- Hidroformilacija olefina u aldehide i alkohole
- Oksihlorinacija etilena u dihloretan
- Hlorovanje alifatskih i aromatskih ugljovodonika

1.3. Hidrodinamika airlift reaktora sa spoljnom recirkulacijom

Poznavanje hidrodinamike je od presudnog značaja za konstrukciju airlift reaktora [8]. Hidrodinamika u ALSR, čija su dva osnovna parametra brzina tečnosti u silaznoj cevi i sadržaj gasne faze, određena je interakcijama potiska, inercije, trenja i hidrostatičkog pritiska [5]. Cirkulaciju tečne faze indukuje razlika hidrostatičkih pritisaka između aerisane tečnosti u uzlaznoj cevi i neaerisane tečnosti u silaznoj cevi. Tako da je pogonska sila razlika srednjih gustina fluida u ovim dvema cevima. Pri strujanju tečnosti u ALSR javljaju se hidrodinamički otpori koji uzrokuju gubitak energije usled promene pravca strujanja tečnosti na vrhu i dnu kolone, dizanja mehurova u uzlaznoj cevi i trenja između tečnosti i zidova kolone [9]. Složena zavisnost između hidrodinamičkih osobina reaktora i prenosa mase prikazana je na slici 1.2.



Slika 1.2. Veza između hidrodinamičkih osobina airlift reaktora i prenosa mase

U tabeli 1.1 prikazana su dosadašnja istraživanja vezana za hidrodinamiku i prenos mase u ALSR. Pregledom literature utvrđeno je da se mali broj istraživača bavio istraživanjem uticaja dodatka alifatičnih alkohola, tipa uvodnika gasa i prisustva hidrodinamičkih otpora na hidrodinamičke i maseno-prenosne karakteristike ALSR. Stoga, ovaj rad treba da doprinese potpunijem sagledavanju karakteristika i mogućnosti ovog tipa reaktora.

Tabela 1.1. Pregled istraživanja u ALSR

Autor	Dimenzije (m)	Sistem	Ispitivane veličine	Prividna brzina gasa (U_G) (m/s)
Merchuk i Stein [10]	$D_u=0,14$ $D_s=0,14$ $A_s/A_u=1$ $H_{u,s}=4,05$	vazduh/voda	sadržaj gasa (ε_G) brzina tečne faze (W_L) pad pritiska (ΔP)	0,05-0,2
Weiland i Onken [5] +	$D_u=0,1$ $D_s=0,05$ $A_s/A_u=0,25$ $H_u=8,5$ $H_s=10$	vazduh/voda; voda+NaCl; voda+2-propanol; voda+saharoza; voda+CMC	W_L ε_G ΔP zapreminski koef. prenosa mase (k_{LA}) Bodenštajnov broj (Bo) vreme mešanja (t_m)	0,005-0,05
Bello i sar. [11] +	$D_u=0,152$ $D_s=0,0025$; 0,016 $A_s/A_u=0,11$; 0,69 $H=1,8$	vazduh/voda; voda+NaCl	k_{LA} ε_G	0,014-0,09
Popovic i Robinson [12] +	$D_u=0,15$ $D_s=0,05$; 0,075; 0,1 $A_s/A_u=0,11$; 0,25; 0,44 $H=1,88$	vazduh/voda+ Na_2SO_3 ; voda+CMC; voda+saharoza	ε_G srednji Sauterov prečnik mehurova (d_{32}) W_L specifična međufazna površina (a)	0,005-0,1
Pošarac i Petrović [13]	$D_u=0,1$ $D_s=0,1$ $A_s/A_u=1$ $H_{u,s}=2,8$	vazduh/voda; voda+n-butanol/ Polyox staklene sfere	minimalna brzina fluidizacije (U_{MF}) ε_G sadržaj čvrste faze (ε_S) W_L	0,01-0,16
Popovic i Robinson [14] +	$D_u=0,15$ $D_s=0,05$; 0,075; 0,1 $A_s/A_u=0,11$; 0,25; 0,44 $H=1,88$	vazduh/voda; voda+saharoza; voda+CMC	ε_G k_{LA} W_L	0,02-0,26
Verlaan i sar. [15]	$D_u=0,2$ $D_s=0,1$ $A_s/A_u=0,25$ $H_{u,s}=3,23$	vazduh/voda+ kalijum hlorid	Bo W_L t_m vreme recirkulacije (t_c)	0,013-0,14

Verlaan i sar. [16]	$D_u=0,2$ $D_s=0,1$ $A_s/A_u=0,25$ $H_{u,s}=3,23$	vazduh/voda	W_L ε_G koef. trenja (K_f) režimi strujanja	0,013-0,14
Chisti i sar. [17]	$D_u=0,05$ $D_s=0,075$ $A_s/A_u=2,23$ $H_{u,s}=1,8$	vazduh/voda; voda+CMC; voda+NaCl	k_{LA}	0,018-0,09
Young i sar. [18]	$D_u=0,2$ $D_s=0,14;$ 0,089 $A_s/A_u=0,47;$ 0,73 $H_{u,s}=1,65$	vazduh/prečišćena voda	radijalni profil $W_L, \Delta P, \varepsilon_G$ klizna brzina, intenzitet turbulencije	0,01-0,08
Goto i Gaspillo [19] ^{+*}	$D_u=0,061$ $D_s=0,027$ $A_s/A_u=0,2$ $H_u=0,585$ $H_s=0,39$	vazduh/voda; voda+ Amberlyst 15	$\Delta P, W_L$ U_{MF}, k_{LA} prenos mase u čvrstoj fazi (k_{LS})	0,018-0,04
Fraser i Hill [20]	$D_u=0,082$ $D_s=0,054$ $A_s/A_u=0,43$	vazduh/voda	k_{LA} koncentracioni profil	0,0048, 0,0084 i 0,016
Snape i sar. [21] ⁺	$D_u=0,158$ $D_s=0,05$ $A_s/A_u=0,1$ $H=2,62$	vazduh/voda; voda+saharoza; voda+elektroliti	ε_G W_L	0,03-0,2
Kawase i Hashiguchi [22] ⁺	$D_u=0,155$ $0,07 \leq D_s \leq 0,11$ $0,2 \leq A_s/A_u \leq 0,4$ $0,6 \leq H_s \leq 0,8$	vazduh/ voda+glicerin; voda+ CMC/ksantan guma	ε_G k_{LA}	0,005-0,06
Benyahia i Jones [23]	$D_u=0,1$ $D_s=0,1$ $A_s/A_u=1$ $H_{u,s}=1,73$	vazduh/voda	ε_G k_{LA} zapremina tečnosti	0,002-0,03
Dhaouadi i sar. [24]	$D_u=0,15$ $D_s=0,082$ $A_s/A_u=0,30$ $H=6$	vazduh/voda	k_{LA} koeficijent aksijalne dispersije (D)	0,01-0,10
Gavrilescu i Tudose [25]	$D_u=0,03$ $D_s=0,03;$ 0,018; 0,01 $A_s/A_u=1;$ 0,360; 0,111 $H=1,16$	vazduh/voda	t_m W_L t_c Bo	0,016-0,18 0,01-0,12

	$D_u=0,2$ $D_s=0,07; 0,04$ $A_s/A_u=0,123;$ $0,04$ $H=4,7$			
Al-Masry i Abasaeed [26]	$D_u=0,1$ $D_s=0,05$ $A_s/A_u=0,25$ $H=4$	vazduh/voda	ε_G W_L k_{LA}	0,017-0,13
	$D_u=0,23$ $D_s=0,15$ $A_s/A_u=0,44$ $H=3,23$			
	$D_u=0,23$ $D_s=0,23$ $A_s/A_u=1$ $H=6$			
Bentifraouine i sar. [27]	$D_u=0,194$ $D_s=0,092$ $A_s/A_u=0,23$ $H=1,6$	vazduh/voda; voda+CMC	radijalni profil ε_G frekvencija mehurova (f_m) d_{32} brzina mehurova (U_m)	0,002-0,07
Bendjaballah i sar. [28]	$D_u=0,1$ $D_s=0,057$ $A_s/A_u=0,33$ $H=2,7$	vazduh/voda	ε_G W_L režimi toka	0,01-0,17
Freitas i sar. [29]	$D_u=0,158$ $D_s=0,05$ $A_s/A_u=0,1$ $H=2,43$	vazduh/voda; voda+kalcijum alginatne kuglice	ε_G W_L	0,03-0,17
Korpijarvi i sar. [30]	$D_u=0,09$ $D_s=0,005$ $A_s/A_u=0,61$ $H=2,5$	vazduh/voda	ε_G k_{LA}	0,005-0,14
Utiger i sar. [31]	$D_u=0,094$ $D_s=0,05$ $A_s/A_u=0,28$ $H=1,79$	vazduh/destilovana voda	radijalni profil $W_L, \varepsilon_G, d_{32}, U_m$ intenzitet turbulencije	0,029, 0,047 i 0,068
Al-Masry [32]	$D_u=0,225$ $D_s=0,225$ $A_s/A_u=1$ $H=6,2$	vazduh/voda+CMC; voda+ksantan guma; voda+glicerol	brzina napona smicanja(γ) W_L	0,005-0,07

Vial i sar. [33]	$D_u=0,1$ $D_s=0,06$ $A_s/A_u=0,36$ $H=2,75$	vazduh/voda	fluktuacije pritiska W_L ε_G režimi toka	0,01-0,24
Shimizu i sar. [34]	$D_u=0,155$ $D_s=0,07$ $A_s/A_u=0,204$ $H=0,844$	vazduh/voda	ε_G k_{LA}	0,01-0,038
Choi [35]	$D_u=0,149$ $D_s=0,108$; 0,079; 0,049 $0,11 \leq A_s/A_u \leq$ 0,53 $H=1,78$	vazduh/voda	visina neaerisane tečnosti t_c t_m ε_G W_L	0,02-0,18
Meng i sar. [36] *	$D_u=0,089$ $D_s=0,047$ $A_s/A_u=0,28$ $H=1,81$	vazduh/voda	ε_G W_L d_{32} D	0,003- 0,016
Lin i sar. [37]	$D_u=0,230$ $D_s=0,190$ $A_s/A_u=0,68$ $H=4,8$	vazduh/voda/ staklene sfere	ε_G d_{32} W_L	0,008- 0,032
Wang i sar. [38]	$D_u=0,015$ $D_s=0,009$ $A_s/A_u=0,36$ $H=0,11$	vazduh/voda/ gel glukoza oksidaze	ε_G W_L k_{LA} k_{LS}	0,004-0,05
Nikakhtari i Hill [39] **	$D_u=0,089$ $D_s=0,047$ $A_s/A_u=0,28$ $H=1,81$	vazduh/voda	ε_G W_L k_{LA}	0,003- 0,016
Zhang i sar. [40]	$D_u=0,1$ $D_s=0,1$ $A_s/A_u=1$ $H_u=3,2$ $H_s=2,8$	vazduh/voda	vreme boravka W_L	
Zhang i sar. [41] *	$D_u=0,230$ $D_s=0,190$ $A_s/A_u=0,68$ $H=4,8$	vazduh/voda	radijalni profil $\varepsilon_G, W_L, d_{32}, U_m$ raspodela veličine mehurova	0,007-0,05
Mohanty i sar. [42]	$D=0,2199$ $H=1,82$	vazduh/voda	W_L ε_G	0,005-0,04
Sarkar i sar. [43]	$D=0,2199$ $H=1,82$	vazduh/voda	W_L, ε_G, U_G , profil pritiska	0,005-0,04
Liu i sar. [44]	$D_u=0,1$ $D_s=0,1$	vazduh/voda/	W_L ε_G	0,005-0,04

	$A_s/A_u=1$ $H_u=3,2m$ $H_s=2,8$	FCC praškasti katalizator	aksijalna disperzija	
Yazdian i sar. [45]	$D_u=0,01-0,09$ $D_s=0,03$ $0,11 \leq A_s/A_u \leq 1$ $H=2,4$	vazduh/voda/ Methylomonas spp.	t_m t_c k_{LA} ε_G W_L	metan 25% kiseonik 75% 0,01-0,065
Miyahara i Nagatani [46]	$D_u=0,14$ $D_s=0,14$ $A_s/A_u=1$ $H=2,67$	vazduh/voda voda+metanol; voda+etanol; voda+n-propanol	$\varepsilon_G, W_L, d_{32},$ a, k_L, k_{LA}	0,015-0,15
Jones i Heindel [47]	$D_u=0,1$ $D_s=0,025$ $A_s/A_u=0,063$ $H=2,4$	vazduh/voda	ε_G W_L	0,005-0,2
Essadki i sar. [48]	$D_u=0,094$ $D_s=0,05$ $A_s/A_u=0,29$ $H=1,47$	aluminijumske elektrode/ voda	W_L vreme boravka Pekleov broj (Pe)	
Rujiruttanakul i Pavasant [49]	$D_u=0,104$ $D_s=0,054$ $A_s/A_u=0,27$ $H=2$	vazduh/voda	ε_G W_L k_{LA}	0,005-0,1
Gharib i sar. [50]	$D_u=0,1$ $D_s=0,995$ $A_s/A_u=1$ $H=1,7$	vazduh/voda voda+metanol; voda+etanol; voda+n-propanol; voda+n-butanol	ε_G k_{LA} a k_L	0,002- 0,012
Kojić i sar. [51]	$D_u=0,54$ $D_s=0,25$ $A_s/A_u=0,21$ $H=2$	vazduh/voda voda+etanol; voda+n-butanol; voda+n-heksanol;	ε_G	0,022-0,22

* punjenje

+ bez separatora

2. Airlift reaktori sa membranom

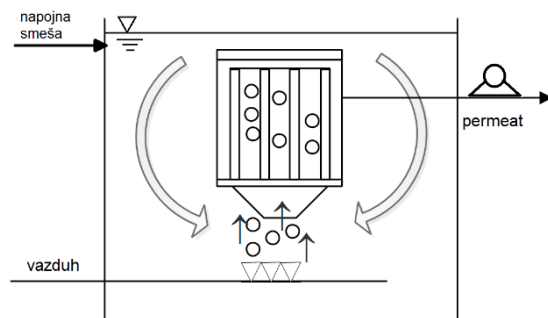
2.1. Definicija i tipovi airlift reaktora sa membranom

Airlift reaktori sa membranom su nastali tokom usavršavanja klasičnih bioloških procesa obrade otpadnih voda. Biološka obrada otpadne vode bila je najzastupljenija metoda zbog niske cene i dobre efikasnosti. Ipak, stroži zakonski zahtevi za visokom čistoćom obrađene otpadne vode vodili su ka evoluciji procesa. Ideja za spajanjem biološkog procesa sa membranskom filtracijom javila se u istraživanjima u Rensselaer Polytechnic Institutu, Troy, New York i Dorr-Oliver, Inc. Connecticut, SAD [52]. Prvu instalaciju membranskog bioreaktora (MBR) izveli su Dorr-Oliver, Inc. sa ravnim ultrafiltracionim membranskim modulom. Ova ideja u SAD nije naišla na preveliki interes, ali je zato u Japanu tokom sedamdesetih i osamdesetih godina 20. veka doživela znatan uspeh. Bioreaktor i membranska separaciona jedinica bili su međusobno odvojeni. Membrane su bile horizontalno postavljene, a suspenzija je strujala preko membrane cross-flow tokom. Da bi se smanjilo prljanje membrane korišćeni su veliki protoci suspenzije koji su se postizali uz pomoć cirkulacione pumpe. Ovaj proces nije bio energetski efikasan i zahtevao je dalje usavršavanje.

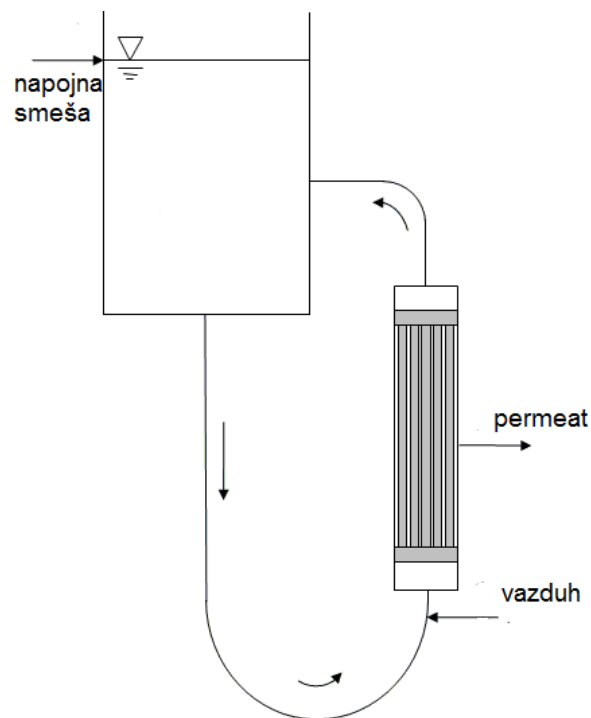
Membranski bioreaktori postaju ponovo aktuelni kada preuzimaju princip rada airlift reaktora. Ideja je potekla 1989. godine od Yamamoto i sar. [53]. Japanske kompanije Kubota i Mitsubishi Rayon i kanadska kompanija Zenon su nezavisno jedne od drugih nastavile da razvijaju ovu ideju [54]. Naime, membrana je uronjena u reaktor a gas se uvodi kako bi omogućio cirkulaciju tečnosti, intenzivirao mešanje, povećao količinu kiseonika i smanjio prljanje membrane (slika 2.1). Ovi reaktori rade pri malom transmembranskom pritisku a permeat se dobija korišćenjem vakum pumpe. Na ovaj način u znatnoj meri je smanjena potrošnja energije jer cirkulaciona pumpa nije potrebna. Ipak, ovo ne predstavlja najbolje konstrukciono rešenje, jer reaktor zahteva veliki sadržaj gasa i dobar prenos mase koji se postiže malim mehurovima gasa, dok membrana zahteva velike mehurove gasa kako bi se smanjilo njeno prljanje. Takođe, glavni nedostatak ovog reaktora u kome je membrana uronjena u centralnu cev je njeno vađenje iz reaktora radi čišćenja. Da bi se prevazišli ovi problemi projektovani su reaktori u kojima uzlazna cev predstavlja reaktor a odvojena je od silazne cevi u kojoj je smeštena membrana (slika 2.2) [55].

Na osnovu geometrijskih karakteristika razlikuju se dve glavne grupe airlift reaktora sa membranom:

1. airlift reaktori sa spoljnom recirkulacijom kod kojih je membrana uronjena u silaznu cev reaktora (ALSRM) i
2. airlift reaktori sa unutrašnjom recirkulacijom kod kojih je membrana uronjena u centralnu cev reaktora (ALURM).



Slika 2.1. Airlift reaktor sa unutrašnjom recirkulacijom sa membranom



Slika 2.2. Airlift reaktor sa spoljnom recirkulacijom sa membranom

Jedan od glavnih projektnih parametara ovih reaktora je izbor tipa membrane. Glavne karakteristike membrane su veličine pora, struktura i materijal. Za filtraciju biomase od obrađene vode u reaktoru primenjuju se ultrafiltracione (0,01-0,1 μm) i mikrofiltracione (0,1-1 μm) membrane. ALSRM upotrebljavaju cevne membranske module od keramike ili polimera i membranske module sa šupljim vlaknima, dok se kod ALURM upotrebljavaju moduli sa šupljim vlaknima i pločasti membranski moduli najčešće izgrađeni od polimera. Airlift reaktori sa membranom su se pokazali kao veoma efektivni: daju veliki prinos produkta, osiguravaju sterilnost procesa i biološku aktivnost [4]. Ostale prednosti su mali energetska zahtevi, kontinualni rad, mali smicajni napon, lako rukovanje i to što zauzimaju malu površinu prilikom montaže. Najbitnija karakteristika ovih reaktora je ta što mehurovi gasa pored toga što omogućavaju recirkulaciju tečnosti, obezbeđuju i smanjenje prljanja membrane [8,9]. Takođe, uvođenjem gasa čvrste čestice se održavaju u suspendovanom obliku i uvodi se neophodan kiseonik u aktivan mulj za rast i razvoj mikroorganizama u aerobnim procesima [56].

2.2. Procesi i istraživanja u kojima se koriste airlift reaktori sa membranom

Airlift reaktori sa membranom nalaze svoju primarnu primenu u prečišćavanju otpadnih voda (komunalnih i industrijskih) i u procesima imobilizacije biokatalizatora (enzima/ćelija). Mogu se koristiti tri tipa imobilizacije [57]:

- imobilizacija na membrani,
- imobilizacija unutar membrane i
- imobilizacija u odeljcima, koji su odvojeni membranom.

Biokatalizatori se imobilišu radi zaštite od smicajnih sila [58] i povećanja produktivnosti bioprocasa [59]. Koriste se još u biokatalizovanim reakcijama na taj način što kontinualno odvede produkt koji bi inhibirao dalji tok reakcije i time smanjio prinos. Na primer, membranski reaktor sa termostatom se primenjuje u hidrolizi pektina dobijenog iz šećerne repe, crne i crvene ribizle uz pomoć *Aspergillus niger* poligalakturonaze kako bi se sprečila inaktivacija produkta [60]. U poslednje vreme svoju primenu sve više nalaze u anaerobnim procesima. Jedan od načina obnavljanja energije iz otpadnog mulja koji nastaje preradom vode je anaerobna proizvodnja vodonika. Biološki proces proizvodnje vodonika se može smatrati čistim procesom jer nema emisije štetnih gasova.

Zbog svega toga poslednjih godina započeta su intenzivna istraživanja karakteristika airlift reaktora sa membranom različitih konstrukcija. Na primer, Liu i sar. [4] su istraživali hidrodinamiku i njen uticaj na transmembranski pritisak u ALURM. Došli su do zaključka da se cross flow brzina povećava sa povećanjem prividne brzine gasa. Jajuee i sar. (2006) izveli su eksperimente u koloni koja je umesto konvencionalne unutrašnje cevi imala membranu, tj. poliestersku tkaninu ograđenu žičanom mrežom sa otvorima od 1 cm. Zapazili su da u sistemu gas-tečno-čvrsto koeficijent prenosa mase veoma zavisi od propustljivosti same poliesterske membrane prema čvrstim česticama. Uticaj hidrodinamičkih parametara i načina rada reaktora na fluks permeata su istraživali u ALURM-u Bérubé i Lei [61]. Li i sar. [62] uspešno su koristili ALURM za uklanjanje azota tokom prečišćavanja otpadnih voda. Xu i Yu [63] su ispitivali hidrodinamiku u reaktoru sa četiri membrane koje su služile kao uzlazne cevi. Tokom mikrofiltracije, u aerobnom okruženju reaktora, odvijala se molekulska difuzija mlečne i sirćetne kiseline kroz zidove membrane. Khalili-Garakani i sar. [64] su eksperimentalno i CFD modelovanjem izračunali ukupne otpore filtraciji u ALURM. Istraživali su uticaje ulaznog protoka gasa i ugla koji obrazuju pregrade u reaktoru na smicajni napon od koga zavise otpori filtraciji. Moraveji i sar. [65] i Prieske i sar. [66] modelovali su hidrodinamičke parametre u ALURM-u pomoću CFD programa. Mihal i sar. [67] umetnuli su membranu u ALUR i na taj način kontinualno uklanjali 2-feniletanol iz fermentacione smeše.

S obzirom da je neophodno da idealni airlift reaktor sa membranom bude energetski efikasan i da sadrži membranu koju je lako ugraditi ili izvaditi radi čišćenja, najbolje je ugraditi membranski modul u silaznu cev ALSR. Fan i sar. [68] su uspešno koristili ovakav reaktor (ALSRM) za prečišćavanje i recikliranje komunalnih otpadnih voda. Ovaj reaktor je bio pogodan za kultivisanje i rast mikroorganizama koji su održavali aktivni mulj stabilnim, jer se mešanje tečnosti odvijalo bez cirkulacione pumpe. Shariati i sar. [69] su uklanjali paracetamol iz otpadnih voda pomoću ALSRM, a paralelno su koristili konvencionalni laboratorijski proces sa aktivnim muljem, poređenjem su zaključili da je ALSRM znatno efikasniji. Zbog dobrih osobina ovaj tip reaktora je komercijalizovan od strane kompanija Norit X-flow, Pentair, Zenon, Wehrle i Orelis Kerasep MP4.

2.3. Hidrodinamika i kontrola prljanja u airlift reaktoru sa membranom

Danas se smatra da je tehnologija membranskih bioreaktora po ceni uglavnom izjednačena sa cenom klasičnog biološkog procesa, bar što se tiče manjih i srednjih postrojenja. Prljanje membrane i smanjenje kapaciteta i dalje predstavlja značajan problem čime poskupljuje proces. Pri tome treba uzeti u obzir cenu ljudskog rada prilikom čišćenja membrana, cenu hemikalija koje se koriste pri čišćenju, vreme tokom kojeg membrana ne filtrira i smanjenje veka trajanja membrane zbog nemogućnosti da se očiste naslage sa nje. Zbog toga je veoma važno pronaći nove načine za kontrolu prljanja membrana. Mehanizmi prljanja membrane su veoma složeni i mogu biti koncentraciona polarizacija, taloženje proteina na površini membrane i/ili adsorpcija u porama membrane. Pored toga što sama membrana pruža otpor, otpori prenosu mase se mogu javiti usled taloženja čestica na površini membrane, zapušavanja pora molekulima rastvoraka i usled adsorpcije molekula rastvoraka na površini membrane i zidovima pora [70]. Indikator prljanja membrane je porast transmembranskog pritiska usled konstantnog fluksa permeata ili opadanje količine prečišćene vode na izlazu iz bioreaktora pri konstantnom transmembranskom pritisku. Čišćenje membrane može biti fizičko i hemijsko. Razvijeno je nekoliko fizičkih postupaka kojima se smanjuje prljanje membrane u bioreaktorima:

- uvođenjem gasa oko membrane što stvara turbulentno strujanje i sprečava stvaranje naslaga,
- povratno pranje čistom vodom što skida naslage sa spoljne strane membrane,
- rad pri manjem fluksu i
- povremeno uključivanje vakuma uz uvođenje gasa.

Kod membrana smeštenih izvan bioreaktora (klasičan proces) crossflow filtracija se izvodi pri velikim brzinama suspenzije da bi se smanjilo taloženje suspendovanih čestica na površinu membrane, zbog toga dolazi do malog iskorišćenja suspenzije na samoj membrani. Kod uronjenih membrana filtracija se odvija pod vakumom pa se prljanje smanjuje uvođenjem vazduha oko membrane. Ova disertacija će obrađivati mogućnost smanjenja prljanja membrane pomoću hidrodinamičkih osobina, tj. uvođenjem vazduha u reaktor. Pored pozitivnog uticaja kao što je smanjenje prljanja, hidrodinamičke osobine imaju i negativne uticaje kao što su oslobađanje produkata metabolizma (soluble microbial products, SMP) i smanjenje veličine flokula, što dodatno povećava viskoznost sistema i nažalost utiče na povećanje prljanja membrane [71].

Poznavanje hidrodinamike u ALSRM je od velike važnosti kako bi se kontrolisalo prljanje membrane. Takođe, hidrodinamika ima veliki uticaj na protok permeata dok s druge strane protok permeata zanemarljivo utiče na hidrodinamiku [72]. Efekat dvofaznog toka na smanjenje prljanja membrane još uvek nije dovoljno istražen upravo zbog komplikovanih poprečnih protoka i virova nastalih usled turbulentnog toka u blizini zida membrane. Usled toga je optimalna prividna brzina gasa koja se primenjuje u ovim procesima još uvek zasnovana na iskustvima iz prakse. Zahtev za aeracijom se često opisuje kao relativna veličina: protok gasa u odnosu na površinu membrane, ili ako se radi ekonomska analiza, protok gasa u odnosu na protok permeata [52]. Da bi efekat hidrodinamike i prividne brzine gasa na prljanje membrane bio uočljiviji najbolje je koristiti apsolutne vrednosti, kao što je npr. protok gasa u odnosu na poprečni presek membrane [71]. Povećanje protoka gasa može značajno da smanji prljanje membrane u membranskim airlift reaktorima. Bérubé i Lei [61] su zapazili u svojim istraživanjima da postoji kritična vrednost protoka, iznad koje dalje povećanje protoka gasa ne poboljšava čišćenje membrane. Sistematsko istraživanje hidrodinamike treba da uzme u obzir i hidrodinamiku unutar membranskog modula i celog reaktora. U tabeli 2.1 dat je pregled radova koji se bave sa hidrodinamikom u ALSRM i ALURM različitih geometrijskih konstrukcija.

Tabela 2.1. Hronološki pregled istraživanja u ALSRM

Autor	Aparatura i dimenzije (m)	Membranski modul	Sistem	Filtracija	Ispitivane veličine
Liu i sar. [4]	ALURM 1,4×0,9×1,9	ravne membrane	vazduh/otpadne vode	ne	cross flow brzina, transmembranski pritisak (<i>TMP</i>)
Shim i sar. [73]	ALURM 0,4×0,135×0,39 0,22×0,06×1,6 0,22×0,1×1,15	ravne membrane	vazduh/model-sistem otpadne vode	da	fluks, usisni pritisak, hemijska potrošnja kiseonika, ukupni N
Bérubé i Lei [61]	ALURM D=0,14 H=1,4	šuplja vlakna	vazduh/otpadne vode	da	fluks u zavisnosti od cross flow brzine
Fan i sar. [68]	ALSRM	ravne membrane	vazduh/komunalne otpadne vode sa Aspidisca sp., Vorticella sp., Suctorina sp., Rotifer sp.,	da	Uklanjanje: 1. organskih kontaminata 2. NH ₄ -N 3. boja 4. zamućenosti

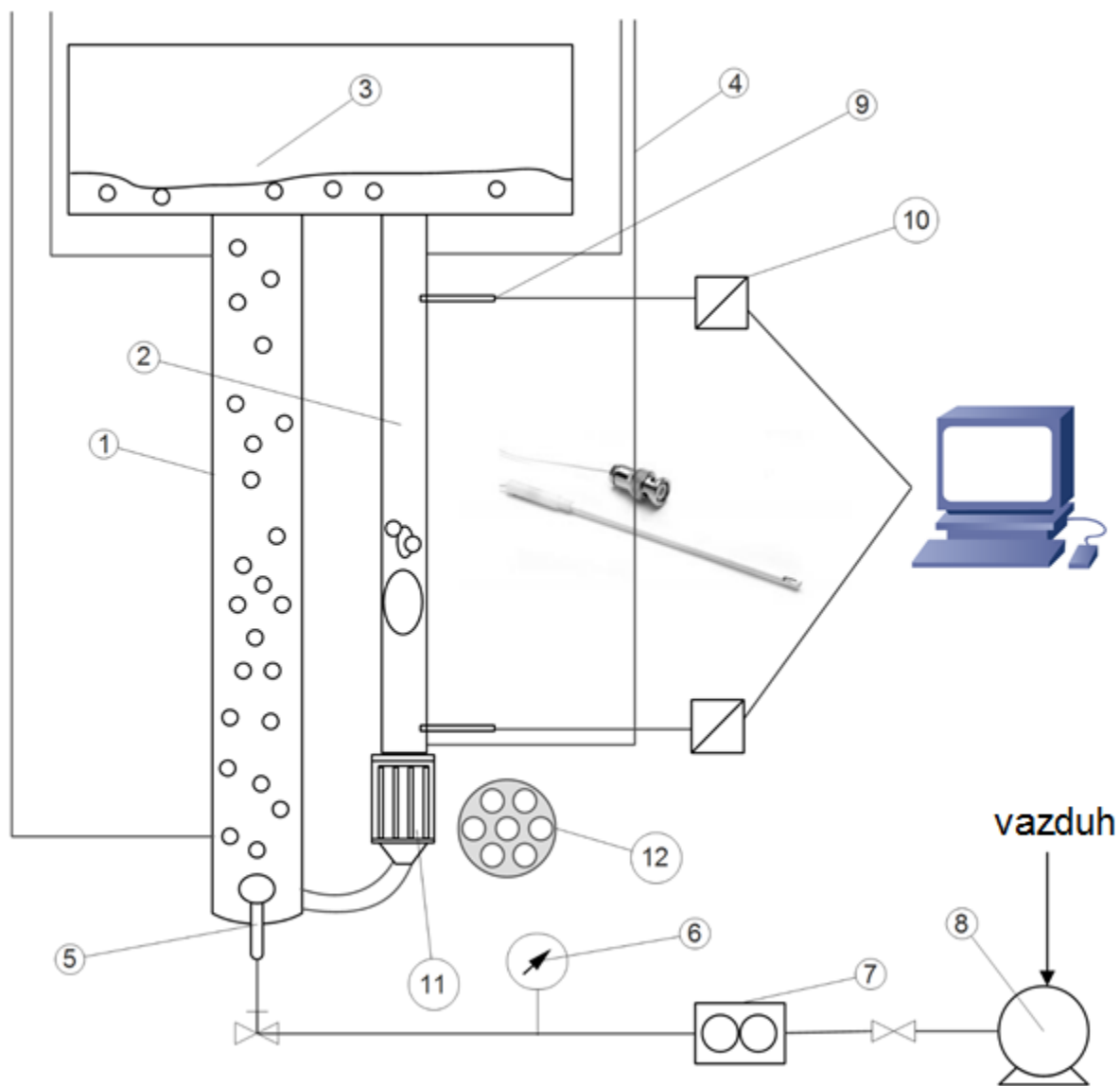
			Aeolosoma hemprichii sp.		MLSS (opterećenje suspendovanom čvrstom fazom); cirkulacioni odnos; fluks; <i>TMP</i>
Jajuee i sar. [74]	ALURM D=0,145 H=1,8	poliestarske tkanine	vazduh/voda+p-xilene+naftalen+silika	da	ε_G , k_{La} , koncentracija ugljovodonika
Futselaar i sar. [75]	ALSRM	NORIT membrane	vazduh/otpadne vode	da	NH ₄ -N, N-ukupni, P-ukupni, biohemijska potrošnja kiseonika
Li i sar. [62]	V=17,2 dm ³	šuplja vlakna	vazduh/model-sistem otpadne vode	da	promena koncentracije azota i amonijaka sa vremenom
Xu i Yu [63]	ALURM D=0,28 H=1,1	porozna čelična cevna membrana	vazduh/fermentacioni medijum sa sirćetnom i mlečnom kiselinom	da	ε_G , prividna brzina cirkulacije- U_L , t_c , k_{La} ,
Prieske i sar. [66]	ALURM 2,1×0,1×1,2	ravne membrane	vazduh/voda	ne	ε_G , U_L
Qingjuan i sar. [76]	ALURM V=18 dm ³	šuplja vlakna	vazduh/otpadna voda	da	hemijska potrošnja kiseonika, NH ₄ -N, N-ukupni
Zhang i sar. [77]	$A_M/A_u=2/5$ V=24 dm ³	19-kanalna cevna membrana $L_M=0,5m$	vazduh/voda/aktivni mulj	da	Uticaji: 1. protoka gasa 2. usisnog pritiska 3. koncentracija biomase na fluks.
Zhang i sar. [78]	$A_M/A_u=3/10$ V=24 dm ³	19-kanalna cevna membrana $L_M=0,5m$	vazduh/voda/aktivni mulj	da	U_L , dužina gasnog i dvofaznog mehura (L_{GS} , L_{LS})
Yang i sar. [79]	ALURM D=0,55 H=0,8	šuplja vlakna (Zenon)	vazduh/otpadna voda	da	reologija aktivnog mulja, smicajni napon
Shariati i sar. [69]	ALSRM 0,1×0,1×0,8 D _s =0,05	ravne membrane	vazduh/voda/aktivni mulj/paracetamol	da	promena koncentracije paracetamola sa vremenom

Khalili-Garakani i sar. [64]	ALURM 0,7×0,24×0,18 V=22 dm ³	ravne membrane (Kubota)	vazduh/otpadna voda	da	uticaj prividne brzine gasa na smicajni napon i prljanje membrane
Moraveji i sar. [80]	ALURM D=1,07 H=1,95	ravne membrane	vazduh/voda	ne	ε_G , U_L
Mihal' i sar. [67]	ALURM D=0,108 $A_s/A_u=1,23$ $H_{u,s}=1,34$	šuplja vlakna	vazduh/demineralizovana voda sa pekarskim kvascem heptanom i pentanom	da	U_L , kinetika ekstrakcije, k_L
Yan i sar. [81]	ALURM 0,4×0,45×0,2	ravne membrane	vazduh/voda	ne	uticaj pregrada na hidrodinamiku i napon smicanja

3. Eksperimentalni deo

3.1. Aparatura

Sva ispitivanja izvedena su u airlfit reaktoru sa spoljnom recirkulacijom tečnosti sa i bez membrane sačinjenog od cevi od pleksiglasa prikazanog na slici 3.1. U slučaju ALSRM ispitivana su dva načina rada: bez mehurova u silaznoj cevi (način rada A) i sa proticanjem mehurova kroz silaznu cev (način rada B). Tokom načina rada A, nivo tečnosti u gasnom separatoru bio je 4 cm. Način rada B bio je ostvaren kada je nivo tečnosti u gasnom separatoru smanjen na 3 cm. Eksperimentalna ispitivanja u okviru ovog rada obuhvatila su merenja sadržaja gasa u uzlaznoj i silaznoj cevi, određivanje brzine tečnosti u silaznoj cevi i zapreminski koeficijent prenosa mase za sisteme u kojima su tečne faze bile česmenska voda, odnosno vodeni rastvori 0,46% mas. etanola, 0,011% mas. *n*-butanola i 0,0051% mas. *n*-heksanola. Korišćena su tri distributora gasa: jednostruki uvodnik, perforirana ploča i sinter ploča. Sedmokanalna cevna keramička membrana (Novasep) je skraćena na dužinu od 20 cm i ugrađena pri dnu silazne cevi reaktora. Membranski modul je tako konstruisan da blokira izlaženje permeata, jer je cilj ovog istraživanja bio ispitivanje hidrodinamike u ALSRM.



Slika 3.1. Skica eksperimentalne aparature. Legenda: 1-uzlazna cev, 2-silazna cev, 3-separator gasa, 4-piezometarske cevi, 5-uvodnik gasa, 6-manometar, 7-merač protoka gasa, 8-kompresor, 9-konduktometrijske elektrode, 10-Iso podovi, 11-membranski modul, 12-poprečni presek cevne membrane

Geometrijske karakteristike ovog airlift reaktora prikazane su u tabeli 3.1. Sve dimenzije date su u mm.

Tabela 3.1. Geometrijske karakteristike airlift reaktora

Uzlazna cev unutrašnji prečnik visina	54 2000
Silazna cev unutrašnji prečnik visina	25 1950
Separator širina dužina visina	300 440 280
Membrana dužina spoljašnji prečnik broj kanala prečnik kanala	200 23 7 6
Distributor gasa sinter ploča prečnik prečnik pora perforirana ploča prečnik prečnik otvora broj otvora jednostruki uvodnik prečnik otvora	 38 0,1-0,16 38 1 7 4
Ostale karakteristike razmak uzlazna cev – silazna cev visina tečnosti iznad uzlazne cevi zapremina tečnosti u koloni (dm ³)	100 40 (način rada A) 30 (način rada B) 11,2

U svim eksperimentima kao gasna faza korišćen je vazduh iz centralnog kompresora, čiji je protok regulisan pomoću masenog merača protoka (Bronkhorst High-Tech model F-201AV), klase tačnosti $\pm 0,5\%$. Prividna brzina gasa računata je u odnosu na poprečni presek uzlazne cevi i pritiska na vrhu reaktora na osnovu izraza [9]:

$$U_G = \frac{Q_G P_h}{A H_L \rho_L g} \ln\left(1 + \frac{\rho_L g H_L}{P_h}\right) \quad (3.1)$$

U zavisnosti od protoka gasa, maksimalna relativna greška određivanja prividne brzine gasa bila je maksimalno 8%. Opseg prividnih brzina gasa koje su korišćene u ovom radu bio je od 0,02 do 0,22 m/s. Korišćen merač protoka je kalibrisan na radne uslove na pritisku $P_{STS} = 5$ bar i temperaturi $T_{STS} = 20,7^\circ\text{C}$, koji su bili konstantni tokom eksperimenata. Ukoliko bi došlo do promene radnih uslova izmereni protok (Q_{STS}) bi bio korigovan. Korekcija se vrši pomoću izraza:

$$Q_G = Q_{STD} \sqrt{\frac{T}{T_{STD}}} \sqrt{\frac{P_{STD}}{P}} \quad (3.2)$$

Pritisak vazduha je meren neposredno iza merača protoka, Burdonovim manometrom, opsega do 2,5 bar, klase tačnosti 1,6%, kako bi se uzeo u obzir uticaj pritiska na prividnu brzinu gasa.

Hidrostatički pritisci u reaktoru su mereni na četiri mesta na vrhu i dnu uzlazne i silazne cevi. Rastojanje između dva susedna merna mesta je iznosilo 175 i 155 cm, respektivno. Merenje pritiska vršeno je pomoću piezometarskih cevi. Radi ustaljivanja visine stuba tečnosti u piezometarskim cevima, očitavanje je vršeno 10 min nakon promene protoka. Staklene kapilare dužine 50 mm i prečnika 0,7 mm, postavljene su na ulaze u piezometarske cevi, da bi sprečavale pulzacije nivoa u cevima. Albijanić i sar. [82] i Šijački i sar. [83] ustanovili su da ovakav način merenja ne utiče na tačnost određivanja pritiska, pri čemu je, na ovaj način, apsolutna greška merenja nivoa u piezometarskim cevima svedena na $1 \div 2$ mm, dok je maksimalna relativna greška merenja iznosila oko 10%.

eDAQ (Australia) Conductivity isoPod sa minijaturnim konduktometrijskim elektrodama je korišćen za određivanje brzine tečnosti u silaznoj cevi. Promene koncentracije kiseonika u vremenu su merene kiseoničnom optičkom elektrodom tipa LDO101, HACH, klase tačnosti $\pm 0,2\%$.

Kao tečna faza korišćeni su: česmenska voda i vodeni rastvori 0,46% mas. etanola, 0,011% mas. *n*-butanola i 0,0051% mas. *n*-heksanola. Fizičke osobine ovih tečnosti date su u tabeli 3.2.

Tabela 3.2. Fizičke karakteristike korišćenih tečnosti na 20°C [84]

sistem	gustina ρ (kg/m ³)	površinski napon σ (N/m)
česmenska voda	1000	0,0724
0,46% mas. etanol	988,06	0,0704
0,011% mas. <i>n</i> -butanol	999,74	0,0718
0,0051% mas. <i>n</i> -heksanol	999,89	0,0699

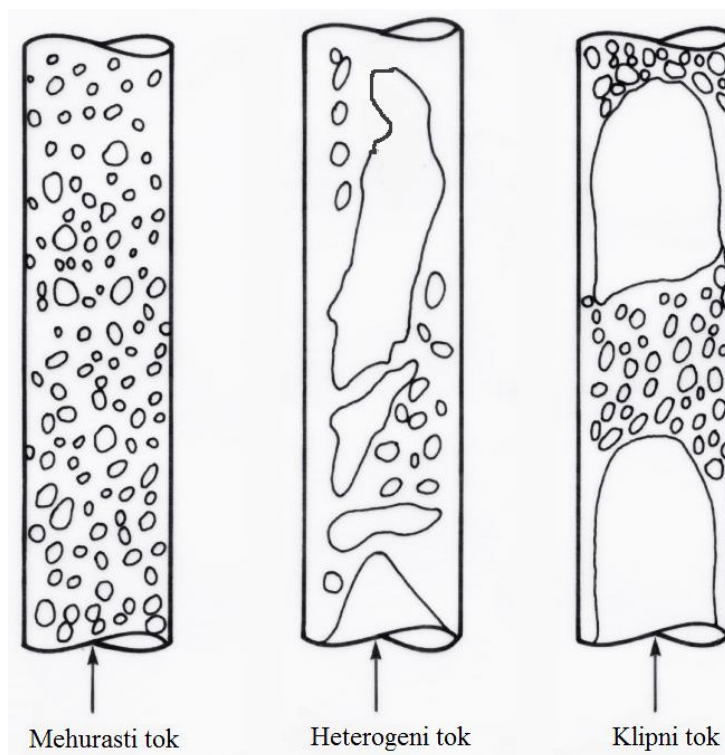
Gustine tečnosti određivane su digitalnim gustinometrom tipa AP PAAR DMA46 sa tačnošću $\pm 0,1$ kg/m³. Vrednosti površinskog napona određene su primenom tenziometra tipa Tension Balance model OS, sa greškom merenja 0,0001 N/m. Temperatura tečnosti održavana je na $20 \pm 1^\circ\text{C}$ i merena je živinim termometrom tipa TLOS čiji je merni opseg bio od 0 do 50°C, sa tačnošću od $\pm 0,1^\circ\text{C}$.

Rad kolone u odnosu na tečnu fazu bio je šaržnog tipa. Pošto su alkoholi veoma isparljivi, postojala je mogućnost da ih vazduh iz kompresora izduva iz kolone i promeni koncentraciju u sistemu voda-alkohol. Ovaj problem je rešen čestim pražnjenjem kolone i njenim ponovnim punjenjem

4. Rezultati i diskusija

4.1. Hidrodinamički režimi

Pri istostrujnom toku tečnosti i gasa u uzlaznoj cevi postoji nekoliko režima u zavisnosti od prividne brzine gasa: mehurasti tok, prelazni tok, heterogeni tok a pri velikim brzinama i manjem prečniku kolone uočava se i klipni tok [85-87]. Mehurasti tok se odlikuje uniformnim veličinama mehurova. Javlja se pri malim brzinama gasa. Pri ovom toku ne dolazi do koalescencije (stapanja) mehurova. Pri većim brzinama gasa nastaje heterogeni (turbulentni) režim. Ovaj režim karakterišu veliki mehurovi koji se kreću velikim brzinama, zajedno sa malim mehurovima koji su takođe prisutni. U ovom režimu koalescencija mehurova je veoma izražena. Prelazni režim predstavlja vezu između prethodna dva režima. U kolonama manjih prečnika pri velikim brzinama gasa javljaju se veliki mehurovi stabilisani zidovima cevi, što može da dovede do pojave klipova gasa koji zauzimaju celokupni presek cevi. Takav tok se naziva klipni tok. Navedeni režimi toka su prikazani na slici 4.1.

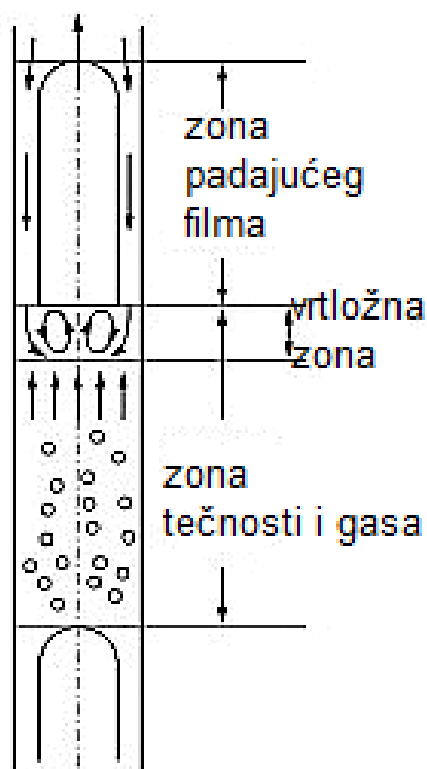


Slika 4.1. Hidrodinamički režimi pri istostrujnom toku tečnosti i gasa

Na rad ALSR i ALSRM veliki uticaj imaju hidrodinamički parametri povezani sa ponašanjem mehurova gasa, kao što su: raspodela veličina mehurova, brzina kretanja mehurova, profili brzina tečne faze i mehurova gasa. Formiranje mehurova se odvija u dva stadijuma [88]: ekspanzija i dizanje mehurova. Za vreme stadijuma ekspanzije mehur je u kontaktu sa otvorom na uvodniku gasa i tokom pristizanja gasa dolazi do njegovog rasta. Mehur počinje da se diže kada sile potiska postanu veće od sila koje vuku mehur nadole. Prilikom dizanja on je i dalje u kontaktu sa distributorom gasa preko „repa“, koji je iste veličine kao otvor na distributoru gasa. Kroz rep gas i dalje ulazi u mehur. Rast mehura prestaje otkidanjem mehura od uvodnika. Veličinu mehura određuje odnos sila dinamičkog pritiska usled lokalne turbulencije i sila međufaznog napona. U skladu s tim, veličina mehura u mehurastom toku određena je silama potiska i međufaznog napona, u prelaznom režimu nestabilnošću površine gas-tečno i pri velikim brzinama gasa u turbulentnom režimu odnosom sila dinamičkog pritiska prema silama površinskog napona. Međutim, zbog koalescencije početna veličina mehura se obično ne zadržava tokom njegovog prolaska kroz uređaj. U sistemima sa inhibiranom koalescencijom, nastalom dodavanjem surfaktanata, soli ili alkohola, veličina mehura dostignuta na distributoru može se očuvati celom visinom uređaja. U čistim tečnostima koalescencija je brza tako da prečnik mehura slabo zavisi od konstrukcije distributora gasa [7]. Brzina kretanja mehurova zavisi od režima toka, osobina faza, veličine mehurova, njihove koncentracije, kao i stepena koalescencije. Pri velikom broju mehurova, brzina kretanja grupe mehurova je mala zbog uzajamnog ometanja mehurova i povratnog toka tečnosti. Koalescencija dovodi do povećavanja veličine mehurova i povećavanja njihove brzine, što smanjuje zapreminski udeo gasa u smeši gas-tečno (tzv. sadržaj gasa).

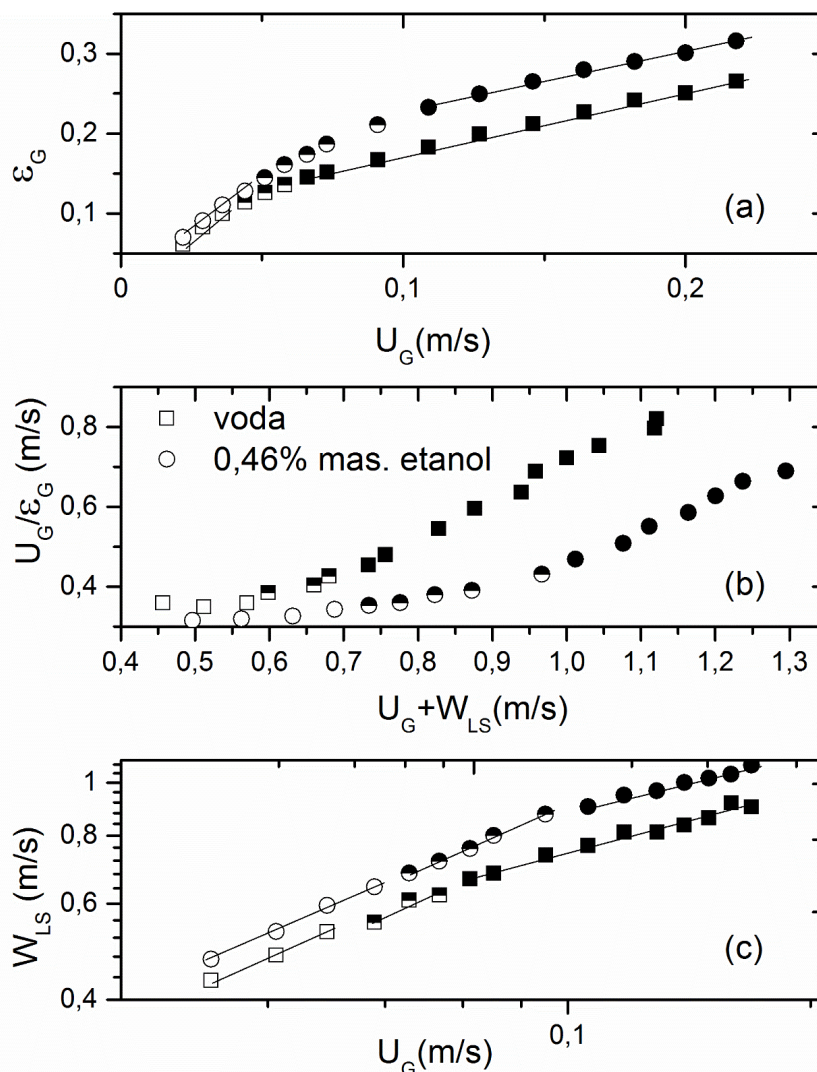
Različiti hidrodinamički režimi uzrokuju različite vrednosti smicajnih napona na površini membrane. Klipni tok je najpoželjniji jer se sastoji od velikih mehurova koji najbolje smanjuju prljanje membrane [89]. Smicajni napon usled prolaska mehurova kroz membranu je simuliran pomoću softvera za simulaciju dinamike fluida (computational fluid dynamics-CFD) i eksperimentalno [90]. Oko mehura se javljaju tri zone: zona tečnosti i gasa koja se nalazi iznad vrha mehura gasa i ima klipni tok (liquid slug zone), zona padajućeg filma tečnosti oko površine mehura (falling film zone) i vrtložna zona (wake zone) (slika 4.2). U svakoj zoni je drugačiji intenzitet smicajnog napona a najveću vrednost on ima u vrtložnoj zoni. Zbog toga vrtložna zona ima najviše uticaja na smanjenje prljanja membrane. Pošto se gas kontinualno uvodi dolazi do

koalescencije mehurova i stvaranja grupe mehurova različitih veličina koji daju različite smicajne napone u zavisnosti od vremena.



Slika 4.2. Zone oko velikog mehura

Na hidrodinamiku bitno utiču prividna brzina gasa, prečnik reaktora, tip distributora gasa, brzina i osobine tečne faze, hidrodinamički otpori i drugo. U industrijskim uslovima reaktori najčešće rade u heterogenom režimu pri prividnim brzinama gasa od 0,1 do 0,5 m/s a veoma retko u homogenom režimu [9]. Poznavanje prelaza iz mehurastog u turbulentni i klipni režim je veoma važno, jer se u zavisnosti od režima u kojem uređaj radi postiže određena konverzija u reaktoru. Granice između pojedinih režima se mogu odrediti na više načina: (a) na osnovu promene nagiba zavisnosti sadržaja gasa od prividne brzine gasa [33,91], (b) modelom koji su razvili Zuber i Findlay [28,86] i (c) promenom nagiba na logaritamskom grafiku koji prikazuje zavisnost brzine tečnosti od prividne brzine gasa [58] (slika 4.3). Kako su se svi ovi modeli pokazali uspešni u određivanju granica režima, u ovom radu su granice režima određene na osnovu promene nagiba zavisnosti sadržaja gasa od prividne brzine gasa, jer je taj način najjednostavniji.



Slika 4.3. Određivanje granica hidrodinamičkih režima u ALSR sa sinter pločom. Legenda: svetli simboli - homogeni režim, polutamni simboli - prelazni režim, tamni simboli - turbulentni režim

Tokom eksperimenata u ALSR i ALSRM uočeni su svi ovi režimi. Granica između mehurastog i prelaznog toka bila je zapažena u opsegu $U_G = 0,04-0,05$ m/s, dok je prelaz u heterogeni tok bio pri $U_G \geq 0,13-0,15$ m/s. Klipni tok se javljao samo pri $U_G \geq 0,18$ m/s u sistemima u kojima je bila izražena koalescencija. U mehurastom režimu vrednosti za nagib su bile oko 2, dok su vrednosti nagiba u turbulentnom režimu iznosile oko 0,75. Vrednosti nagiba 1,7 za mehurasti režim i 0,6 za turbulentni režim u radu Vial i sar. [92] približno odgovaraju vrednostima dobijenim u ovom radu. Prividne brzine gasa koje predstavljaju granice režima, dobijene na ovaj način, se takođe slažu i sa vizuelnim zapažanjima dvofaznog toka u uzlaznoj cevi.

U eksperimentima u ALSRM prelaz između režima se javljao pri manjim U_G nego kod ALSR. To je rezultat smanjenja brzine tečnosti u uzlaznoj cevi ALSRM, što je dovelo do dužeg boravka mehurova gasa u tom delu uređaja a time i do povećanja koalescencije. Uticaj membrane kao otpora na prelazne režime je najuočljiviji kada je korišćena sinter ploča kao distributor gasa. Joshi i sar. [93] i Bendjaballah i sar. [28] su u svojim istraživanjima primetili da otpor u ALSR, a time i brzina tečnosti i geometrijske karakteristike silazne cevi, utiču na prelazne režime. Međutim, Vial i sar. [92] uočili su da hidrodinamički otpor ima slabiji uticaj na promenu režima. Podaci dobijeni u ovom radu prikazani na slikama 4.11 i 4.12 pokazuju da dodatak alkohola ima uticaja na granice režima u ALSR i ALSRM kada su korišćeni sinter i perforirana ploča, dok kod jednostrukog uvodnika nije slučaj. Dodatkom alkohola koalescencija mehurova se pomerala ka većim prividnim brzinama gasa i time je odložila formiranje heterogenog toka [5,7]. Vrsta distributora je takođe uticala na režime u ALSR i ALSRM. U radu sa jednostrukim uvodnikom mehurasti režim nije zapažen bez obzira na korišćeni sistem, što su zapazili i Bendjaballah i sar. [28] i Vial i sar. [94].

4.2. Ukupni koeficijent trenja

Ukupni otpori kretanju tečnosti (K_f) predstavljaju zbir ukupnih mesnih (K_M) i podužnih otpora (K_{TR}) i mogu se odrediti preko sledeće jednačine:

$$\sum K_f = \sum K_M + \sum K_{TR} = \sum K_M + \sum \lambda \frac{L}{D} \quad (4.1)$$

Ukupni otpori trenja opadaju sa povećanjem razmera uređaja, a rastu sa povećavanjem visine ili dužine, smanjivanjem prečnika i povećanjem koeficijenta podužnog trenja (λ). U dvofaznim sistemima λ se može odrediti iz jednačina za jednofazno strujanje ako je sadržaj gasa manji od 10-15% [57] i on je uslovljen vrednostima Rejnoldsovog broja (Re) i relativne hrapavosti. Cevi od kojih se ALSR izgrađuju su najčešće od stakla ili plastike, njihove relativne hrapavosti se kreću od $6 \cdot 10^{-5}$ i $6 \cdot 10^{-6}$ za cevi prečnika od 2,54 do 25,4 cm pa se u opsezima Rejnoldsovog broja koji se najčešće javlja u ovim uređajima mogu smatrati glatkim. To znači da λ zavisi samo od vrednosti Re a ne i od relativne hrapavosti. Tako npr. sa povećanjem prečnika raste i Re (pri istoj brzini tečnosti) a λ opada što smanjuje otpore trenja. Takođe, povećanje brzine tečnosti vodi ka povećanju Re i manjem λ .

Pošto se ALSR sastoji pored cevi i od spojnih elemenata kao što su kolena, spojnice, ventili itd., to oni predstavljaju dodatne otpore strujanju fluida, tj. energetske gubitke. Otpor usled oblika više doprinosi ukupnim gubicima nego površinsko trenje. Zbog složenog kretanja fluida kada naiđe na mesni otpor, teorijskim putem nije moguće doći do koeficijenta mesnog otpora, nego se za svaki poseban slučaj eksperimentalno određuje, tako da danas postoje sređene tabelarne vrednosti koeficijenata mesnih otpora.

Ukupni koeficijent trenja se može eksperimentalno odrediti iz bilansa količine kretanja u kome je pogonska sila za recirkulaciju tečnosti (razlika pritisaka u uzlaznoj i silaznoj cevi) uravnotežena ukupnim padovima pritisaka duž puta recirkulacije [58]. Bilans količine kretanja u reaktoru se može definisati preko sledeće jednačine:

$$\rho_L g H (\varepsilon_{GU} - \varepsilon_{GS}) = \sum K_f \frac{\rho_L W_L^2}{2} \quad (4.2)$$

U jednačini 4.2 leva strana predstavlja ukupnu pogonsku silu za recirkulaciju tečnosti dok desna strana predstavlja ukupne otpore strujanju. Ako se pretpostavi da je izdvajanje gasa u gasnom separatoru potpuno i da se otpori kretanju tečnosti odnose na brzinu tečnosti u silaznoj cevi [95,96], dobija se uprošćen oblik jednačine 4.2:

$$\varepsilon_{GU} = \frac{\sum K_f}{2gH} W_{LS}^2 \quad (4.3)$$

Veza između sadržaja gasa i brzine tečnosti izražena pomoću ukupnog koeficijenta trenja je primenjivana u mnogim istraživanjima [10,95,97-99]. Hsu i Duduković [98] su utvrdili da se u laminarnom strujanju K_f vrednosti poklapaju za dvofazni i jednofazni sistem, ali da pri $Re > 1000$ dolazi do odstupanja. Garcia-Calvo [99] je uspešno proračunao u svojim eksperimentima K_f vrednosti u dvofaznom toku pomoću korelacija za jednofazni tok tako što je uzeo u obzir radijalni parabolični profil brzine tečnosti. Pretpostavljajući da se proračun može bazirati na jednofaznom toku kada je sadržaj gasa manji od 10%, Verlaan i sar. [95] dobili su dobro slaganje između eksperimentalnih i izračunatih vrednosti.

U tabeli 4.1 date su vrednosti ukupnog koeficijenta otpora određene eksperimentalno primenom jednačine 4.3 i pomoću programskog paketa Pipe flow expert. Pomoću ovog programa simuliran je ukupan otpor jednofaznom proticanju u ALSR i ALSRM radi poređenja sa eksperimentalno dobijenim otporom. Milivojević [57] je takođe uspešno koristio ovaj program u svom doktoratu za proračun ukupnih otpora kretanju fluida u airlift reaktorima. Ukupan koeficijent

otpora u ovom programu predstavlja sumu mesnih i otpora trenja duž uzlazne i silazne cevi. Mesni otpori koji su korišćeni za simulaciju su: koleno od 90°, krivina, ulaz u gasni separator, ulaz u silaznu cev iz gasnog separatora i prelazak iz silazne u uzlaznu cev. Kako u programu ne postoji definisan koeficijent otpora koji proizvodi membrana, on je u ALSRM simuliran poluotvorenim ventilom, dok je u ALSR jednak nuli (potpuno otvoreni ventil).

Tabela 4.1. Poređenje eksperimentalno i računskih dobijenih vrednosti za ukupni koeficijent otpora

	ALSR	ALSRM
$\Sigma K_{f \text{ exp}}$	11,9	22,3
$\Sigma K_{f \text{ PipeFlow Expert}}$	12,2	23,4
$\Delta K_f, \%$	2,5	4,9

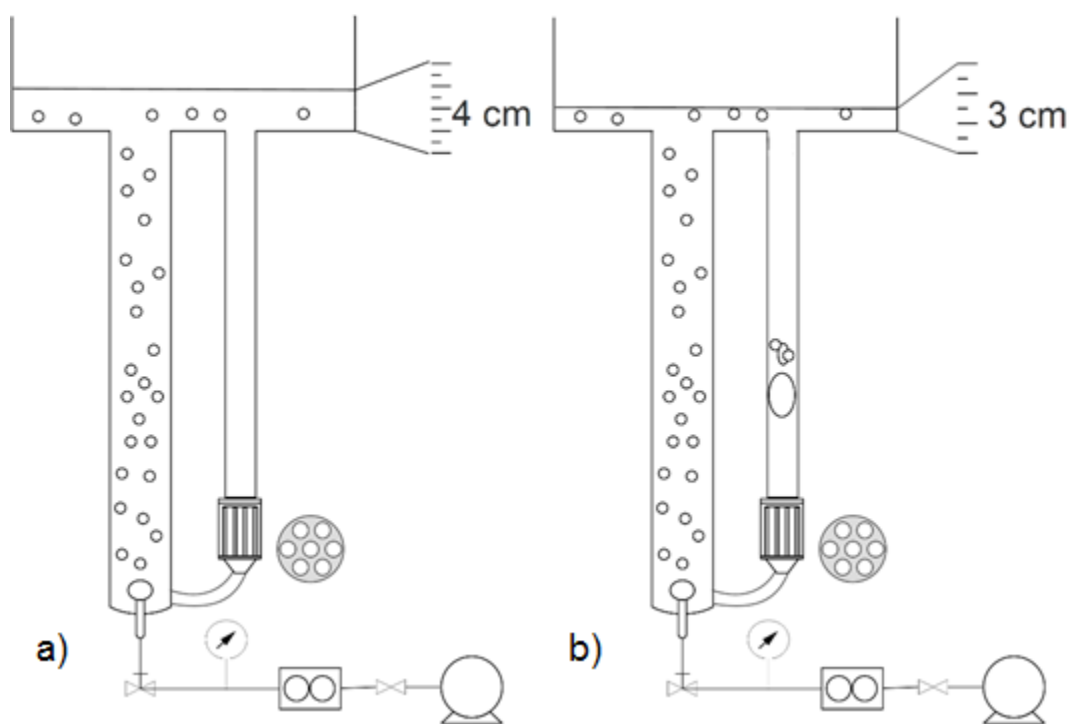
4.3. Sadržaj gasa

Sadržaj gasa (eng. gas holdup) predstavlja zapreminski udeo gasne faze u disperziji gas-tečno. Mnogobrojna ispitivanja pokazala su da je sadržaj gasa lokalno i vremenski promenljiv. Pored brzine tečnosti i specifične površine jedan je od najvažnijih zavisnih parametara za projektovanje airlift reaktora sa i bez membrane. Poznavanje sadržaja gasa u dvofaznim sistemima daje zapreminske udele faza što omogućava izračunavanje vremena boravka u reaktoru. Takođe sadržaj gasa zajedno sa srednjim prečnikom mehurova omogućava izračunavanje međufazne površine što je neophodno za određivanje brzine prenosa mase iz gasa u tečnost. Pored toga, postoji veliki broj modela i korelacija koji dobro predviđaju brzinu tečnosti na osnovu izmerenih vrednosti za sadržaj gasa [97].

Poznato je da u barbotажnim kolonama i airlift reaktorima na sadržaj gasa utiče nekoliko faktora od kojih su najznačajniji prividna brzina gasa, geometrijske karakteristike kolone, vrsta distributora gasa, fizičke osobine gasa i tečnosti i visina nivoa tečnosti.

Nivo tečnosti u separatoru gasa utiče na pogonsku silu recirkulacije tečnosti tako što određuje sadržaj gasa u silaznoj cevi. U ALSR sadržaj gasa se može nalaziti u svim njegovim delovima: u uzlaznoj i silaznoj cevi i u gasnom separatoru. U većini dosadašnjih radova nije bilo sadržaja gasa u silaznoj cevi ALSR, kako se ne bi smanjila pogonska sila za recirkulaciju tečnosti.

Međutim, pošto su brojna istraživanja u MBR [4,61,71,89] pokazala da mehurovi gasa pozitivno utiču na smanjenje prljanja membrane, u ovom radu je mehurovima gasa omogućeno da se nađu u silaznoj cevi. To znači da je ALSRM radio na dva načina (slika 4.4a-b). U zavisnosti od nivoa tečnosti u gasnom separatoru i, saglasno tome, pri određenoj brzini tečnosti u silaznoj cevi mehurovi gasa mogu da ne ulaze u silaznu cev, da uđu do određene dubine i lelujuju ili da silaze i prelaze u uzlaznu cev. Tokom načina rada A u ALSRM nije bilo mehurova u silaznoj cevi i nivo tečnosti u gasnom separatoru bio je 4 cm. Način rada B je postignut tako što je snižen nivo tečnosti u gasnom separatoru sa 4 cm na 3 cm da bi se obezbedilo uvlačenje mehurova gasa u silaznu cev. Način rada B je istražen sa ciljem da se smanji prljanje membrane ukoliko bi se radila i filtracija.



Slika 4.4. Dva načina rada airlift reaktora sa membranom: a)-način rada A, bez mehurova gasa u silaznoj cevi, b)-način rada B, sa mehurovima gasa u silaznoj cevi

Prividna brzina gasa ima najveći uticaj na sadržaj gasa. Rezultati svih istraživanja ukazuju da se sa porastom protoka gasa i sadržaj gasa povećava. Većina autora je zapazila eksponencijalnu zavisnost u obliku:

$$\varepsilon_G \sim U_G^n \quad (4.4)$$

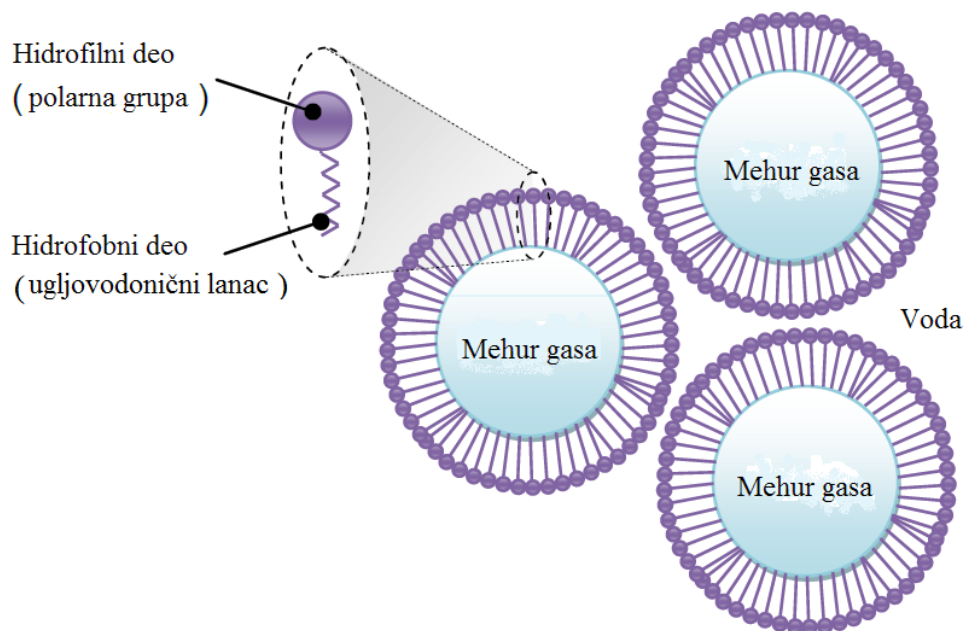
Za mehurasti tok n je u opsegu od 0,7 do 1,2 a za prelazni i turbulentni režim od 0,4 do 0,7. Očigledno je da je uticaj prividne brzine gasa manje izražen u turbulentnom toku.

Membrana ugrađena u silaznu cev u suštini predstavlja dodati hidrodinamički otpor i smanjuje brzinu tečnosti. Istraživanja raznih autora, koji su menjali otpor u spoljašnjoj petlji, pokazala su da se sa povećanjem otpora u ALSR sadržaj gasa povećava, jer je mehurovima gasa potrebno duže vremena da isplivaju na površinu [7,10,16,28,92,100]. Naime, brzina isplivavanja mehurova gasa u tečnosti koja se ne kreće je procenjena da je oko 0,24 m/s [21], i zavisi od njihovog poluprečnika. Kako je u uzlaznoj cevi tok tečnosti i mehurova gasa istostrujan, brzina tečnosti ima veliki uticaj na brzinu isplivavanja mehurova. Brzina tečnosti se smanjuje usled otpora membrane, pa zbog toga mehurovi gasa sporije isplivavaju na površinu i sadržaj gasa je veći nego u airlift reaktorima bez membrane [66].

Osobine tečnosti takođe imaju uticaja na sadržaj gasa. Dosadašnja ispitivanja na dvofaznim sistemima u airlift reaktorima pokazala su da osobine tečnosti, kao što su viskoznost, površinski napon ili jonska jačina tečnosti, utiču na sadržaj gasa u njoj. Dodatak površinski aktivnih materija kao što su: različite soli, kiseline, polimeri, agensi za razbijanje pene, alkoholi, tečnosti sa nenjutnovskim osobinama i sl., mogu izazvati znatno povećanje ili smanjenje sadržaja gasa u odnosu na čistu vodu. Sadržaj gasa raste sa smanjenjem tendencije ka koalescenciji mehurova. Usled toga, uticaj fizičkih osobina tečnosti trebalo bi razmatrati sa aspekta njihovog dejstva na koalescenciju mehurova. Poznato je da čiste tečnosti podstiču koalescenciju, dok je dodatak rastvoraka sprečava [101].

Dodatkom malih količina alifatičnih alkohola u vodu, površinski napon tečnosti se smanjuje. Površinski napon je fizička osobina na koju se dodatkom alkohola bitno utiče i koja se značajno razlikuje u odnosu na vodu [102]. Srednji prečnik mehurova opada usled sprečavanja koalescencije mehurova, što dovodi do smanjenja brzine isplivavanja mehurova, a samim tim i do porasta sadržaja gasa u rastvorima alifatičnih alkohola u odnosu na vodu. Ovo je zapaženo u svim dosadašnjim istraživanjima. Mehanizam sprečavanja koalescencije mehurova u razblaženim vodenim rastvorima alkohola objasnio je Keitel [103]. U molekulima alifatičnih alkohola mogu se uočiti dva dela: ugljovodonični lanac (hidrofobni deo) i –OH grupa (hidrofilni deo) (slika 4.5). Pošto su molekuli alkohola površinski aktivne materije, dolazi do njihove akumulacije na međufaznoj površini gas-tečno. Ovi molekuli na međufaznoj površini, na strani tečnosti, stvaraju

mono-sloj čija stabilnost zavisi od tipa, koncentracije i veličine akumuliranih molekula. Molekuli alkohola su na međufaznoj površini orijentisani sa hidrofilnim grupama u pravcu tečnosti i hidrofobnim u pravcu gasa. Zbog te uređenosti, površina tečnosti na granici mehura je naelektrisana, što pri približavanju dva mehura stvara odbojne sile. Na taj način prvi stupanj koalescencije - kontakt dva mehura je sprečen.



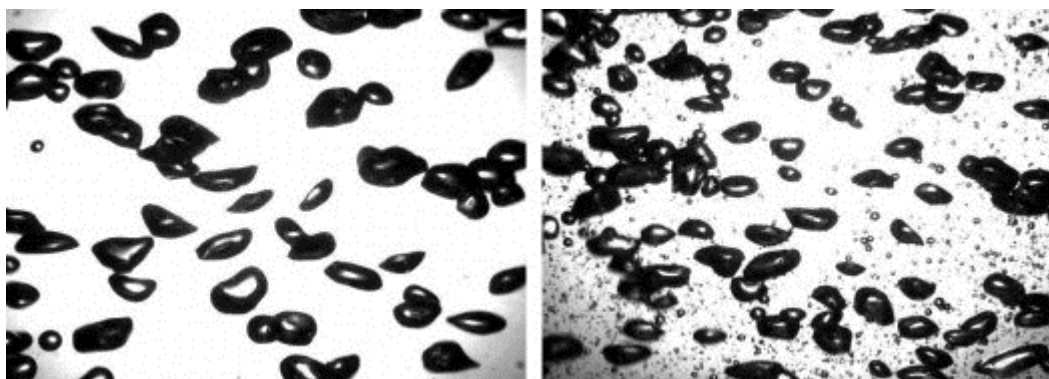
Slika 4.5. Mehanizam sprečavanja koalescencije mehurova gasa

Uticaj alkohola na sadržaj gasa zavisi od njegove koncentracije i dužine ugljovodoničnog lanca. Ispitujući sprečavanje koalescencije mehurova u razblaženim rastvorima monovalentnih alkohola (C_1 do C_8) u barbotажnoj koloni, Keitel [103] je konstatovao da postoji minimalna koncentracija dodatog alkohola iznad koje dolazi do znatnog smanjenja koalescencije mehurova, tj. značajnog povećanja sadržaja gasa u odnosu na vodu, kao i maksimalna koncentracija alkohola iznad koje ne dolazi do značajnijeg povećanja sadržaja gasa. Minimalna koncentracija pri kojoj dolazi do inhibicije koalescencije mehurova znatno opada sa porastom broja ugljenikovih atoma u nizu. U tabeli 4.2 prikazane su vrednosti minimalnih i graničnih koncentracija normalnih alifatičnih alkohola od metanola do n -oktanola.

Tabela 4.2. Literaturni podaci o vrednostima minimalnih i graničnih koncentracija alifatičnih alkohola [103]

	Minimalna koncentracija		Granična koncentracija	
	(mol/l)	(% mas.)	(mol/l)	(% mas.)
metanol	$9 \cdot 10^{-3}$	0,03	1	3,2
etanol	$1,4 \cdot 10^{-3}$	0,006	$1 \cdot 10^{-1}$	0,46
n-propanol	$3,6 \cdot 10^{-4}$	0,002	$3 \cdot 10^{-2}$	0,036
n-butanol	10^{-4}	0,00074	$1,5 \cdot 10^{-3}$	0,011
n-pentanol	$3,5 \cdot 10^{-5}$	0,00031	$1 \cdot 10^{-3}$	0,0057
n-heksanol	$1 \cdot 10^{-5}$	0,0001	$5 \cdot 10^{-4}$	0,0051
n-heptanol	$8 \cdot 10^{-6}$	0,00004	$1,7 \cdot 10^{-4}$	0,002
n-oktanol	$2 \cdot 10^{-6}$	0,000039	$1,5 \cdot 10^{-4}$	0,002

Kelkar i sar. [104] su u okviru svog rada proučavali raspodelu veličine mehurova i njihovu prosečnu brzinu isplivavanja kako bi potpunije objasnili uticaj dodatka alkohola na sadržaj gasa u barbotaznim kolonskim uređajima. Rezultati su pokazali da je udeo malih mehurova u rastvorima alkohola mnogo veći nego u čistoj vodi (slika 4.6). Na osnovu toga, zaključili su da mehurovi manje koalesciraju u rastvorima alkohola nego u vodi. Takođe, su pokazali da se prosečne brzine isplivavanja mehurova smanjuju dodatkom alkohola i sa povećanjem broja ugljenikovih atoma u pravolinijskom lancu molekula alkohola.



Slika 4.6. Mehurovi gasa u vodi i u rastvoru alkohola [28]

Mnogi istraživači su koristili rastvore alkohola upravo zbog činjenice da i mala količina ovih supstanci (ispod 1%) u vodenim rastvorima značajno smanjuje površinski napon tečne faze i na taj način bitno utiče na hidrodinamička svojstva airlift reaktora. Pored toga, rastvori alkohola

se koriste kao model sistemi da bi se simulirala tečna faza u bioreaktorima i likvefakciji uglja [104]. McClure i sar. [105] su na osnovu svojih eksperimenata zaključili da su raspodela veličina mehurova gasa i sadržaj gasa u rastvoru 0,02M izopropil alkohola veoma slični stvarnom fermentacionom medijumu. Weiland i Onken [5], Pošarac [7], Al-Masry i Dukkan [106], Miyahara i Nagatani [46], Gharib i sar. [50] su pokazali u svojim eksperimentima sa ALSR da dodatak alkohola ima za posledicu povećanje sadržaja gasa u odnosu na čistu vodu.

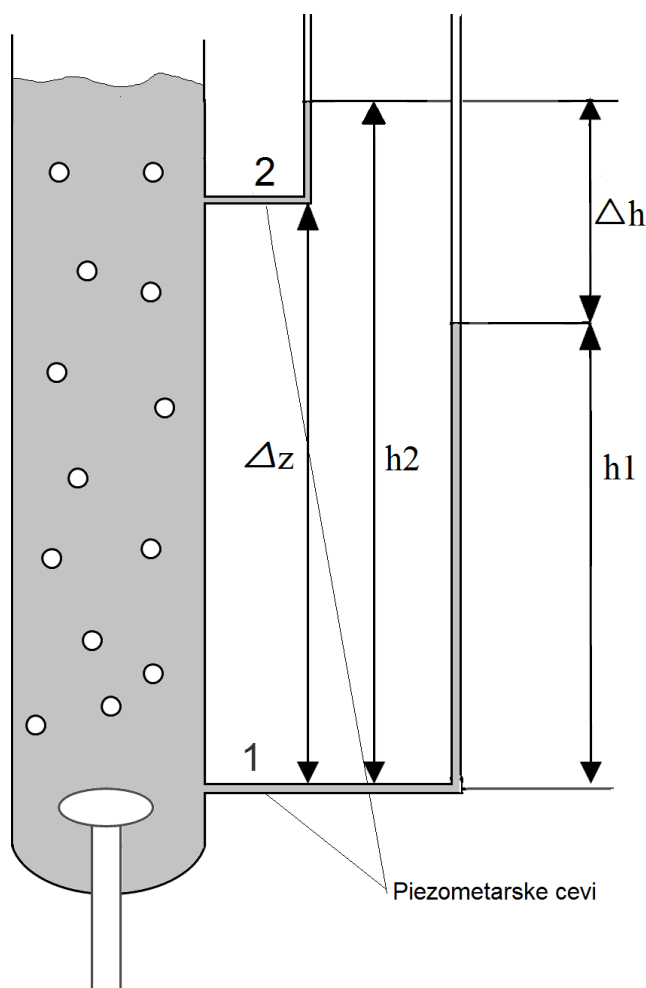
Na hidrodinamiku u ALSR utiče i vrsta korišćenog distributora gasa, budući da distributor gasa utiče na formiranje početnih mehurova [21,28,33,107]. Postoje različite vrste distributora gasa. Među najčešće korišćenim su cilindrični (jednostruki uvodnik) i pločasti distributori gasa (perforirane i sinter ploče). Uticaj različitih distributora gasa je značajniji u sistemima u kojima je smanjena koalescencija mehurova, u odnosu na sisteme u kojima je koalescencija mehurova izražena [7]. Cao i sar. [100] dali su najiscrpniju studiju o uticaju distributora na sadržaj gasa u ALSR. Zaključili su da je uticaj distributora na sadržaj gasa najznačajniji pri malim prividnim brzinama gasa, manjim od 0,025 m/s. U radu Camarasa i sar. [108] primećeno je da se korišćenjem sinter ploče sa otvorima 10-16 μm formiraju manji mehurovi gasa u poređenju sa mehurovima koji nastaju korišćenjem perforirane ploče sa 62 otvora prečnika 1 mm. Takođe, jednostruki uvodnik sa prečnikom najčešće i većim od 1-2 mm, obrazuje veće mehurove gasa još pri veoma niskim prividnim brzinama gasa stvarajući heterogenu raspodelu veličina mehurova. U ALSRM poželjni su veliki mehurovi gasa jer oni bolje utiču na smanjenje prljanja membrane tako da ovi reaktori koriste posebne distributore gasa [89]. Mayer i sar. [109] su istraživali uticaj različitih distributora gasa u različitim napojnim smešama i pri različitim protocima gasa u cevnom membranskom modulu. Istraživanja su pokazala da gasni distributori sa puno otvora daju homogenu raspodelu mehurova gasa i najbolji su za korišćenje, dok za filtraciju koja se odvija pri konstantnoj cross flow brzini običan jednostruki uvodnik se pokazao najboljim za korišćenje.

Pregledom literature utvrđeno je da postoji mali broj radova u kojima je opisan uticaj prisustva malih količina alkohola i tipa distributora gasa u vodenim rastvorima na hidrodinamiku ALSRM. Cilj ovog rada je da doprinese potpunijem saznanju o uticaju tipa distributora gasa i vrste alkohola na osnovne hidrodinamičke karakteristike ALSR i ALSRM.

4.3.1. Određivanje sadržaja gasa

U literaturi je opisano nekoliko različitih eksperimentalnih metoda za određivanje sadržaja gasa u airlift reaktorima. U zavisnosti od toga da li se sadržaj gasa meri po celoj zapremini kolone, na određenom preseku ili u jednoj tački, dobijaju se vrednosti ukupnog sadržaja gasa, lokalnog površinskog sadržaja gasa i lokalnog sadržaja gasa u jednoj tački [110]. Detaljan pregled metoda za određivanje sadržaja gasa u gas-tečno i gas-tečno-čvrsto airlift reaktorima je dat u revijalnom radu Boyer i sar. [111].

Metoda za određivanje sadržaja gasa u ovom radu se zasniva na merenju pada pritiska duž reaktora pomoću piezometarskih cevi. Na slici 4.7 šematski je prikazano određivanja sadržaja gasa ovom metodom.



Slika 4.7. Određivanje sadržaja gasa merenjem hidrostatičkog pritiska duž kolone

Postavlja se Bernulijeva jednačina za preseke 1 i 2, zanemaruju se gubici usled trenja i pretpostavlja se da nema promene brzine između uočenih preseka:

$$P_1 - P_2 = \Delta P_{12} = \rho_{GL} g \Delta z \quad (4.5)$$

Gustina disperzije u koloni je:

$$\rho_{GL} = \rho_G \varepsilon_G + \rho_L \varepsilon_L = \rho_G \varepsilon_G + \rho_L (1 - \varepsilon_G) \quad (4.6)$$

Pošto je $\rho_G \ll \rho_L$, može se usvojiti da je

$$\rho_{GL} = \rho_L (1 - \varepsilon_G) \quad (4.7)$$

te se dobija da je:

$$\Delta P_{12} = \rho_L g (1 - \varepsilon_G) \Delta z \quad (4.8)$$

S obzirom da je $P_1 = P_a + \rho_L g h_1$ i $P_2 = P_a + \rho_L g (h_2 - \Delta z)$ sledi:

$$P_1 - P_2 = \Delta P_{12} = \rho_L g (h_1 - h_2 + \Delta z) \quad (4.9)$$

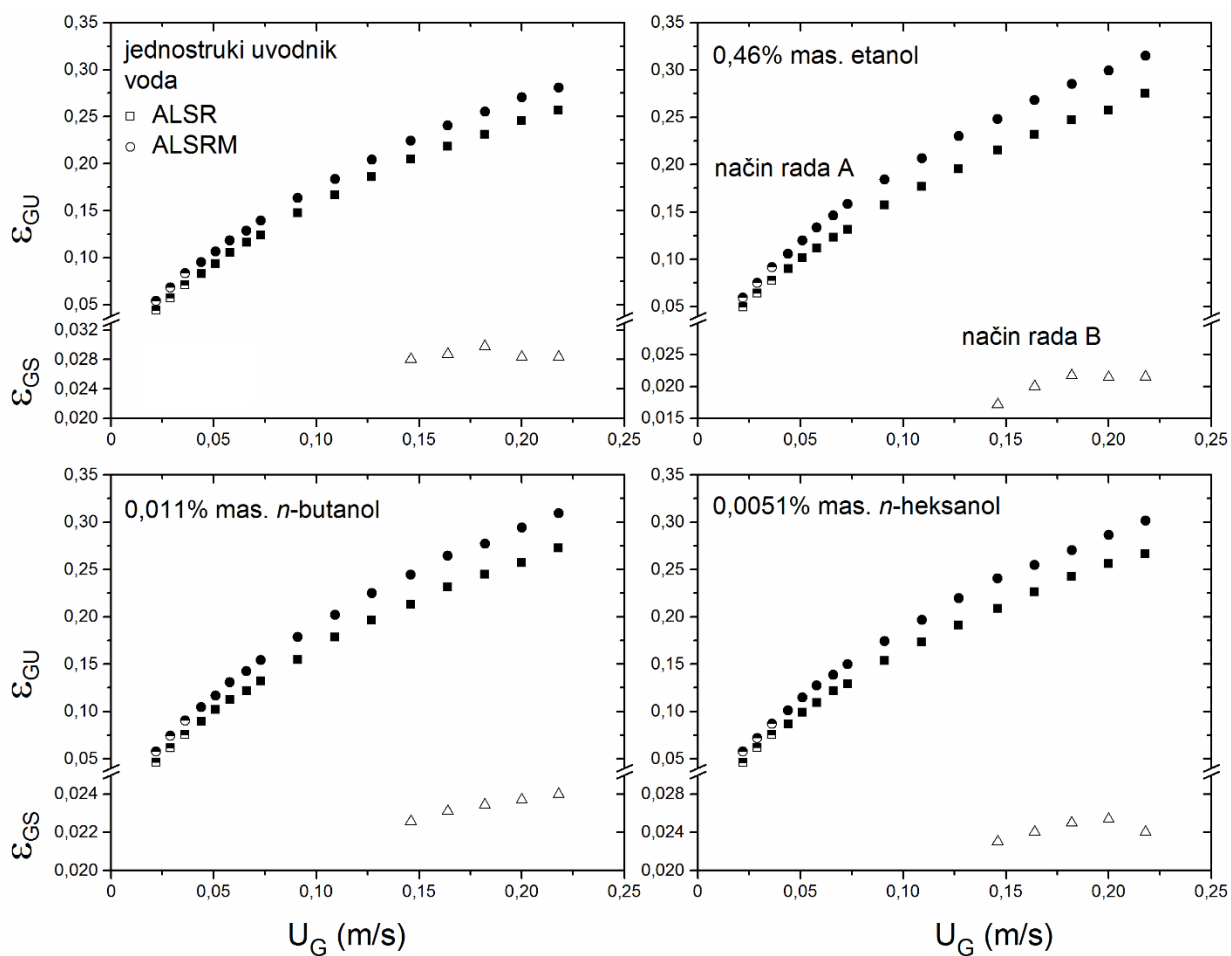
$$\Delta P_{12} = \rho_L g (\Delta z - \Delta h) \quad (4.10)$$

Kombinacijom jednačina (4.7) i (4.9) dobija se izraz za izračunavanje sadržaja gasa:

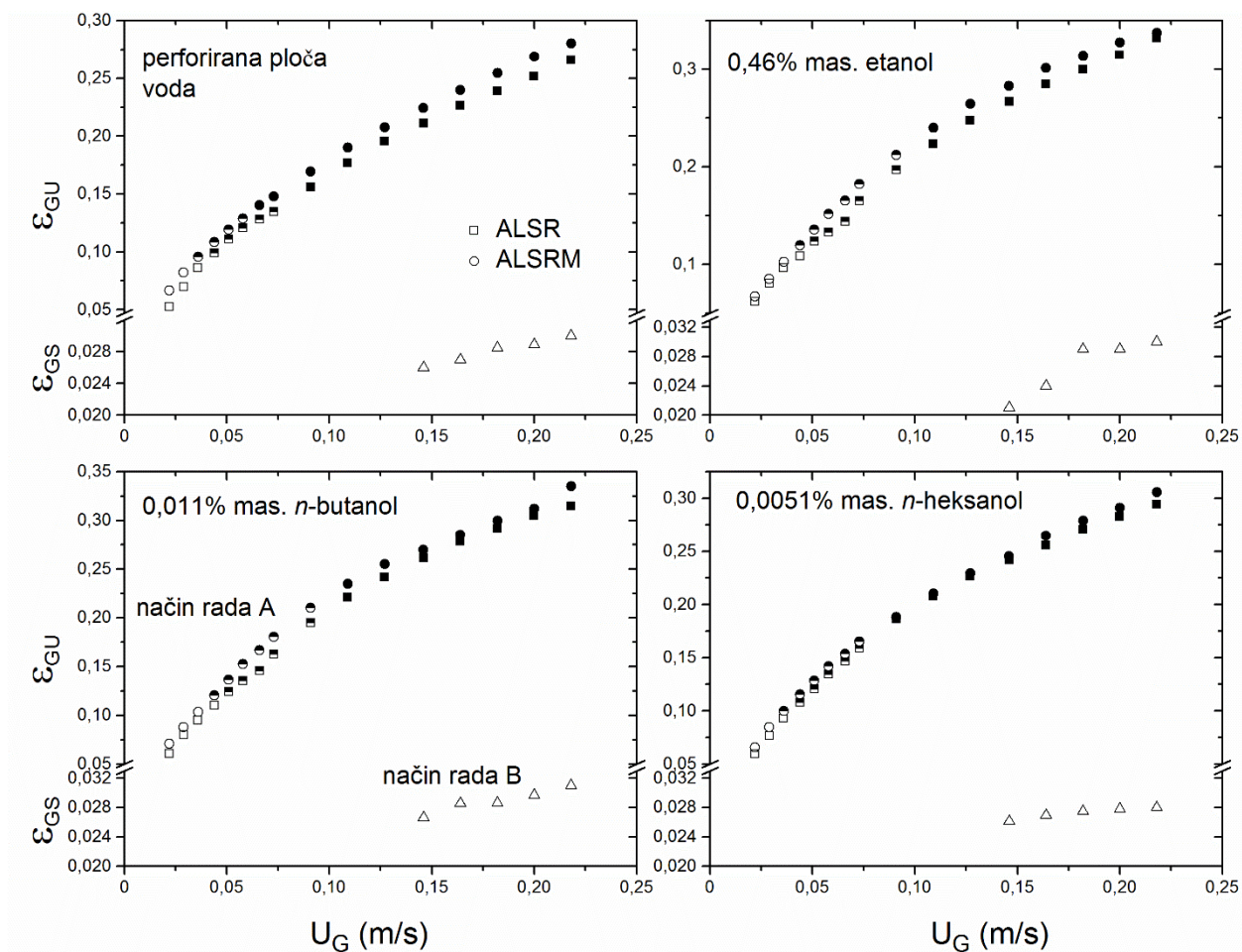
$$\varepsilon_G = \frac{\Delta h}{\Delta z} \quad (4.11)$$

4.3.2. Sadržaj gasa u airlift reaktoru sa i bez membrane

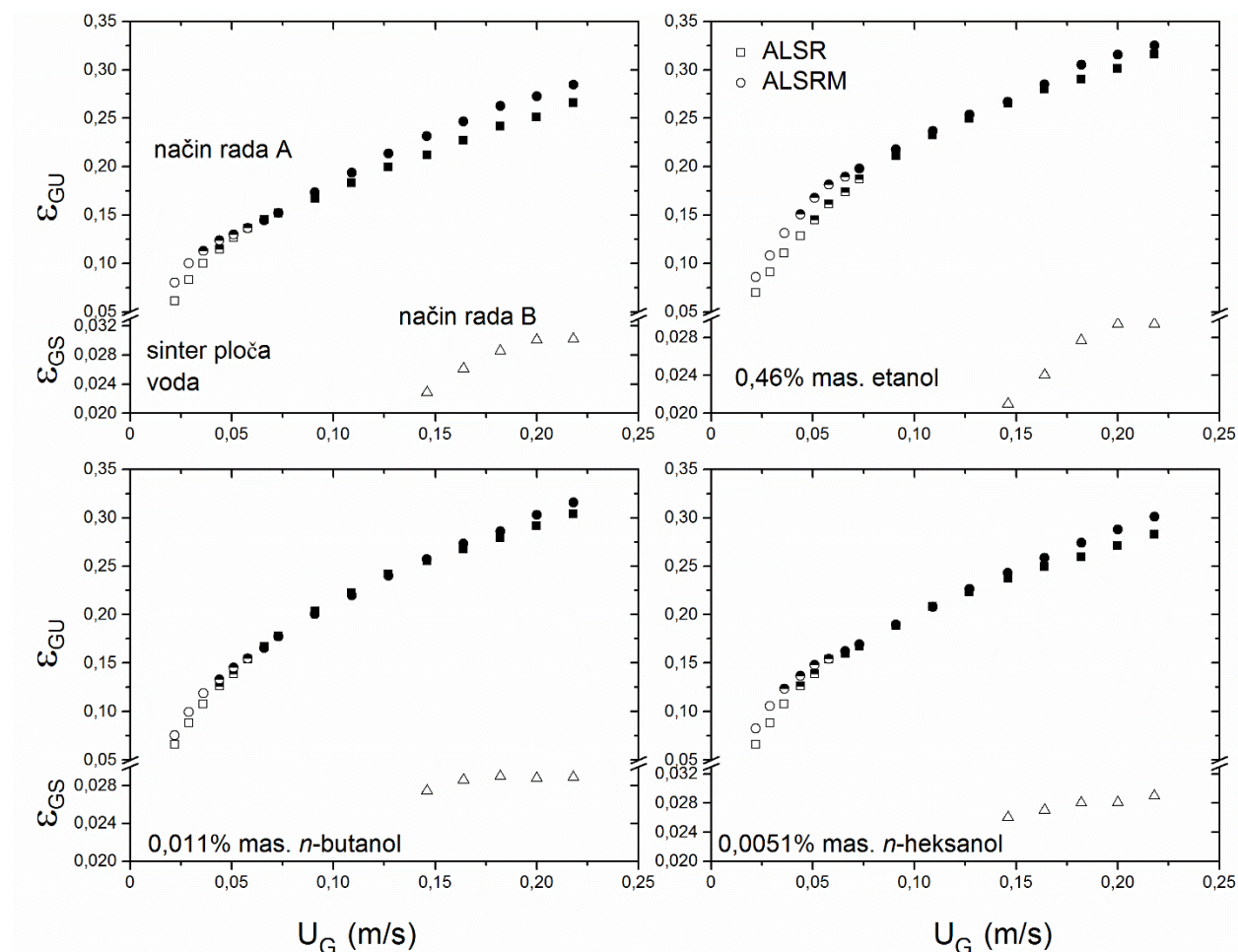
Slike 4.8-4.10 prikazuju uticaj prividne brzine gasa i ugrađene membrane na sadržaj gasa u uzlaznoj (ε_{GU}) i silaznoj cevi (ε_{GS}). Može se uočiti tendencija porasta ε_{GU} sa porastom prividne brzine gasa, što je zapaženo u svim dosadašnjim istraživanjima. U svim ispitanim sistemima vrednosti za ε_{GU} bile su veće u reaktoru sa ugrađenom membranom, zbog smanjene brzine tečnosti. Nijedan tip alkohola nije značajnije povećao ε_{GU} u ALSRM u odnosu na ALSR. Najveće razlike u ε_{GU} od oko 16% bile su između ALSRM i ALSR kada je korišćen jednostruki uvodnik, dok su za preostala dva uvodnika iznosile samo oko 8%. Tokom načina rada B ε_{GS} u ALSRM je iznosio maksimalno 0,03 dok je ε_{GU} ostao nepromenjen. Sa slika 4.8-4.10 se jasno vidi da je ε_{GS} oko 10 puta manji od ε_{GU} .



Slika 4.8. Poređenje sadržaja gasa između ALSR i ALSRM kada je korišćen jednostruki uvodnik. Legenda: svetli simboli-homogeni režim, polutamni simboli-prelazni režim, tamni simboli-turbulentni režim. Donji deo slika prikazuje ϵ_{GS} pri načinu rada B (prisutni mehuri u silaznoj cevi)



Slika 4.9. Poređenje sadržaja gasa između ALSR i ALSRM kada je korišćena perforirana ploča kao uvodnik. Legenda: svetli simboli-homogeni režim, polutamni simboli-prelazni režim, tamni simboli-turbulentni režim. Donji deo slika prikazuje ϵ_{GS} pri načinu rada B (prisutni mehurovi u silaznoj cevi)

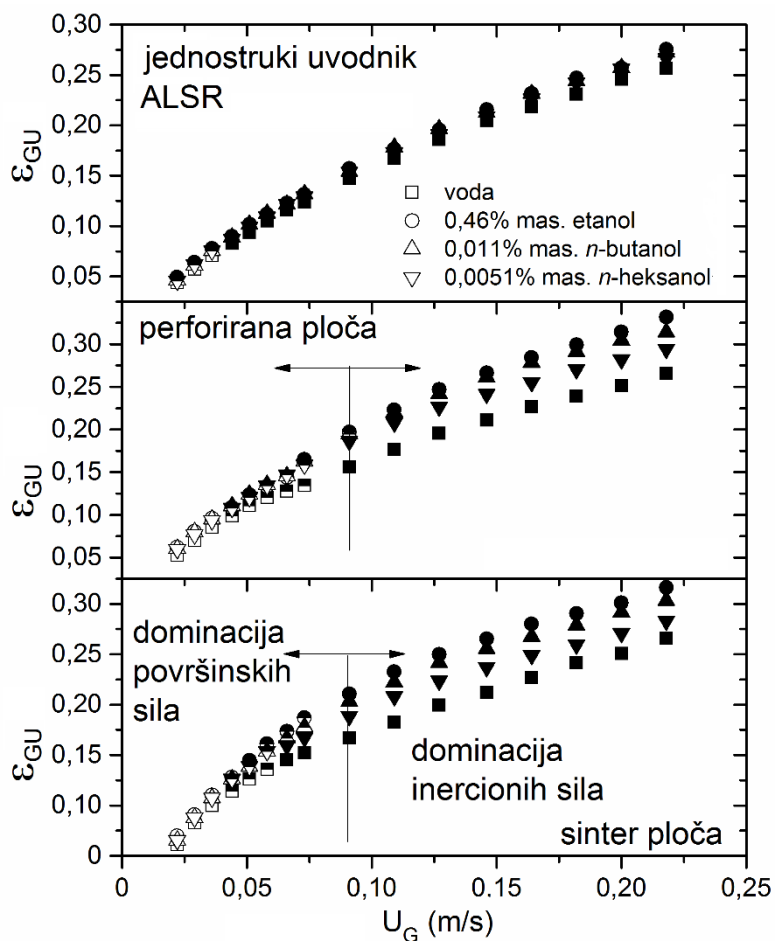


Slika 4.10. Poređenje sadržaja gasa između ALSR i ALSRM kada je korišćena sinter ploča kao uvodnik. Legenda: svetli simboli-homogeni režim, polutamni simboli-prelazni režim, tamni simboli-turbulentni režim. Donji deo slika prikazuje ϵ_{GS} pri načinu rada B (prisutni mehurovi u silaznoj cevi)

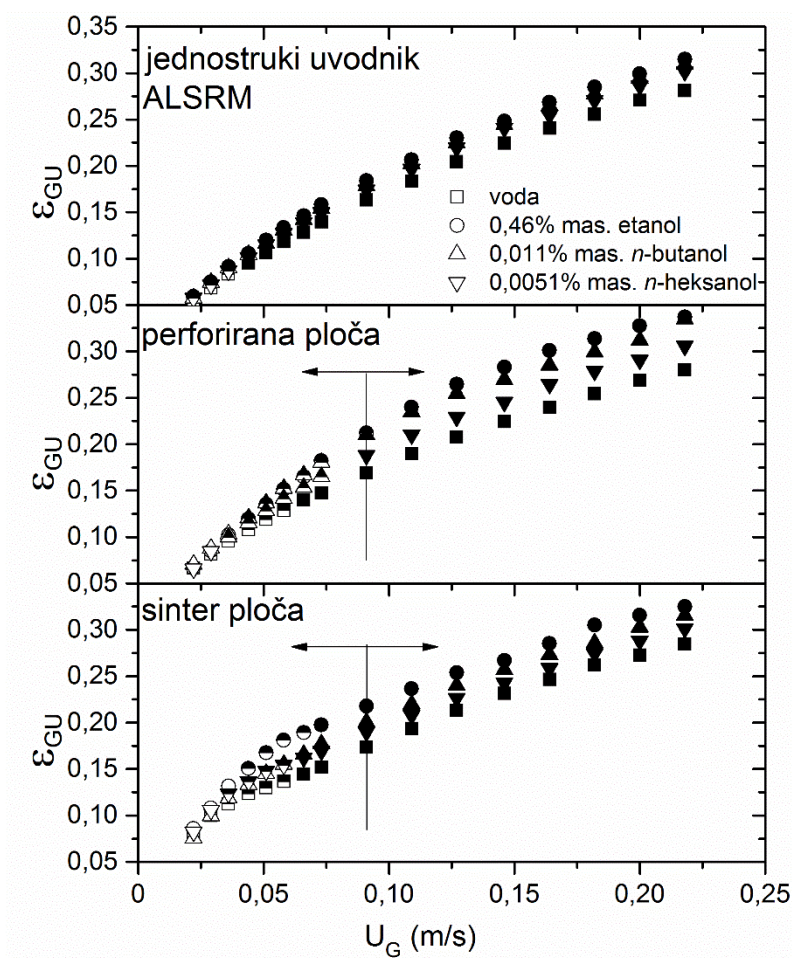
4.3.3. Uticaj dodatka alkohola na sadržaj gasa

Uticaj dodatih alkohola na ϵ_{GU} bio je isti u reaktoru sa i bez ugrađene membrane. Rezultati za rastvore alkohola pokazuju da je ϵ_{GU} viši u odnosu na vodu bez obzira koji je distributor korišćen (slike 4.11-4.12). Razlike u vrednostima za ϵ_{GU} su uočljivije za sinter i perforiranu ploču dok za jednostruki uvodnik dodatak alkohola ima manji uticaj. Pri nižim prividnim brzinama gasa (do 0,045 m/s) nema većih razlika u vrednosti ϵ_{GU} između pojedinih sistema. U mehurastom režimu ($\epsilon_{GU} < 0,15$) ne dolazi do značajnije koalescencije, čak ni kod vode. Međutim, u ALSRM i ALSR u prelaznom i turbulentnom režimu u rastvorima etanola, *n*-butanola i *n*-heksanola ϵ_{GU} za sinter i

perforiranu ploču bio je veći u odnosu na vodu za oko 22, 17,5 odnosno 10%. U prelaznom i heterogenom režimu pri velikim U_G sudari mehurova su učestaliji te je koalescencija izraženija. Zato je uticaj alkohola na povećanje ε_{GU} usled sprečavanja koalescencije naglašeniji. Dodatak alkohola nije značajno povećao ε_{GU} kada je korišćen jednostruki uvodnik. U prelaznom i turbulentnom režimu ε_{GU} je bio svega 7% veći kada su korišćeni alkoholi u odnosu na vodu. Razlog tome je što ovaj distributor proizvodi velike mehurove tako da alkoholi teže formiraju mono-sloj oko njih [108]. Dodatkom etanola i *n*-butanola ε_{GU} bio je veći nego dodatkom *n*-heksanola. Ako se osvrnemo na ranije radove Zahradnik i sar. [112] i Gharib i sar. [50] sa porastom broja ugljenikovih atoma u molekulu alkohola iste koncentracije sadržaj gasa bi trebalo da raste. Veći ε_{GU} za ova dva alkohola je posledica njihove veće koncentracije u rastvoru u odnosu na *n*-heksanol. Sa slike 4.14 uočava se da *n*-heksanol ne deluje pri velikim U_G . Pri malim U_G kod *n*-heksanola površinske sile bile su dominantnije u odnosu na inercione sile. Međutim, pri većim protocima gasa, s obzirom na njegovu malu koncentraciju za razliku od druga dva alkohola, inercione sile su nadjačale uticaj površinskih sila. Kada je ALSRM bio u načinu rada B, dodati alkoholi su umereno snizili ε_{GS} vrednosti u odnosu na vodu kod jednostrukog uvodnika (slika 4.8), dok se zaključci za efekat alkohola na ε_{GS} kod perforirane i sinter ploče ne mogu izvesti jer su razlike između vode i dodatih alkohola bile manje od 10%.



Slika 4.11. Uticaj dodatih alkohola na sadržaj gasa u ALSR. Legenda: svetli simboli-homogeni režim, polutamni simboli-prelazni režim, tamni simboli-turbulentni režim

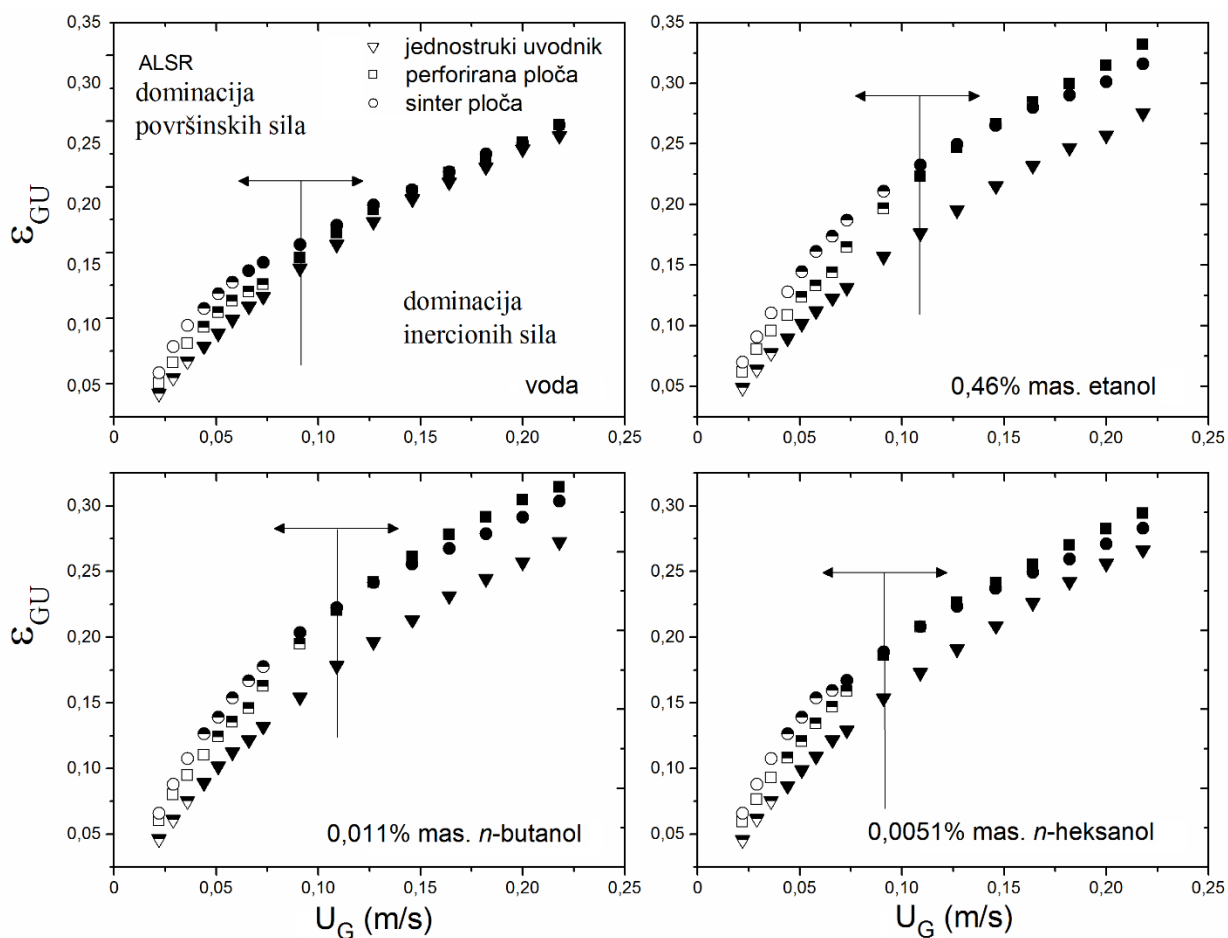


Slika 4.12. Uticaj dodatih alkohola na sadržaj gasa u ALSRM. Legenda: svetli simboli-homogeni režim, polutamni simboli-prelazni režim, tamni simboli-turbulentni režim

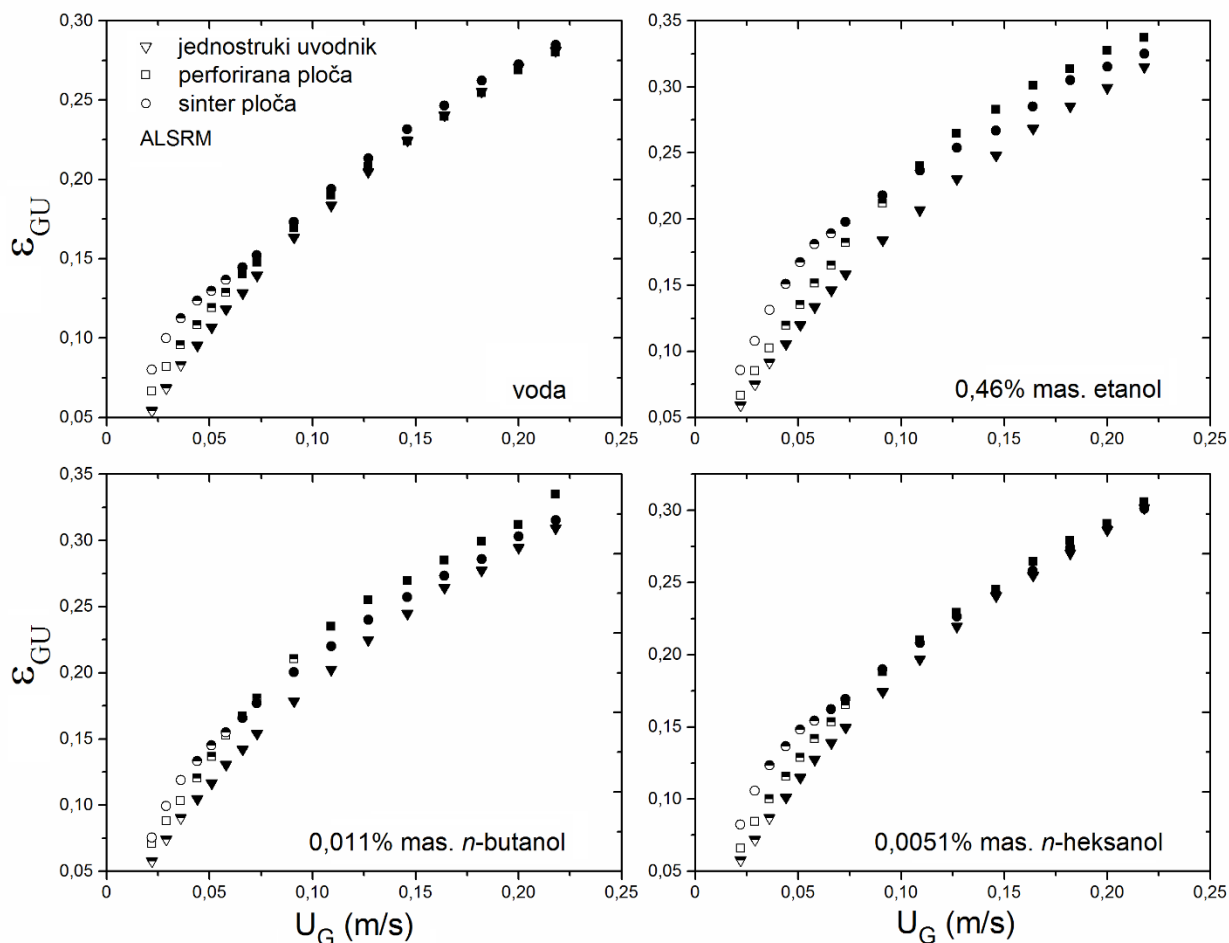
4.3.4. Uticaj distributora gasa na sadržaj gasa

Na slikama 4.13 i 4.14 prikazani su rezultati za ε_{GU} dobijeni korišćenjem tri tipa distributora gasa: jednostrukog uvodnika (JU), perforirane ploče (PP) i sinter ploče (SP). Može se primetiti da je ε_{GU} najveći pri korišćenju SP. Očigledno je da su SP i PP efikasniji distributori od JU. Membranski modul smanjuje prednost SP i PP u odnosu na JU u pogledu ε_{GU} za 25% do 50% zavisno od sistema. Ovo proizilazi iz toga da efikasnost SP i PP počinje da opada pri manjim U_G kod ALSRM jer se heterogeni režim javlja ranije nego kod ALSR. Ugrađena membrana smanjuje W_{LS} što dovodi do dužeg vremena zadržavanja mehurova u uzlaznoj cevi a time do povećane koalescencije. Sinter ploča je efikasnija od PP do prividne brzine gasa od oko $U_G = 0,1$ m/s, tj. dok dominiraju površinske sile. Pri većim U_G dominiraju inercione sile te su razlike u ε_{GU} bile manje

od 3%. Alkoholi poboljšavaju efikasnost SP i PP u odnosu na JU naročito u heterogenom režimu. Na primer, u oblasti dominacije površinskih sila ($U_G < 0,1$ m/s) u sistemima: vazduh-voda odnosno rastvori alkohola, ε_{GU} izmeren u radu sa SP bio je oko 30 odnosno 40% veći od ε_{GU} za JU. Međutim, pri $U_G > 0.1$ m/s, kada je koalescencija veoma izražena, ε_{GU} bio je veći samo 4 odnosno 20%. Prilikom načina rada B u ALSRM, JU je davao manje ε_{GS} vrednosti u odnosu na SP i PP (slika 4.8-4.10).



Slika 4.13. Uticaj distributora gasa na sadržaj gasa u ALSR. Legenda: svetli simboli-homogeni režim, polutamni simboli-prelazni režim, tamni simboli-turbulentni režim



Slika 4.14. Uticaj distributora gasa na sadržaj gasa u ALSRM. Legenda: svetli simboli-homogeni režim, polutamni simboli-prelazni režim, tamni simboli-turbulentni režim

4.3.5. Zaključci o sadržaju gasa

Na osnovu dobijenih rezultata i njihove analize mogu se izvesti sledeći zaključci o sadržaju gasa u airlift reaktoru sa i bez membrane.

- Povećanje prividne brzine gasa dovodi do porasta sadržaja gasa u uzlaznoj cevi reaktora sa i bez membrane. Porast sadržaja gasa izraženiji je pri manjim prividnim brzinama.
- Ugrađena višekanalna cevna membrana u silaznu cev povećala je sadržaj gasa do 16% i pomerila prelazak režima strujanja ka manjim prividnim brzinama gasa.
- Sadržaj gasa u silaznoj cevi tokom načina rada B bio je oko 3%. Način rada B nije uticao na sadržaj gasa u uzlaznoj cevi.

- Pri prividnim brzinama gasa manjim od 0,04 m/s dodati alkoholi neznatno utiču na sadržaj gasa u uzlaznoj cevi. Na višim prividnim brzinama gasa sadržaj gasa u rastvorima etanola, *n*-butanola i *n*-heksanola za sinter i perforiranu ploču bio je veći u odnosu na vodu u opsegu od 10 do 22%. Dodatak alkohola nije značajno povećao sadržaj gasa kada je korišćen jednostruki uvodnik.
- Sadržaj gasa u uzlaznoj cevi bio je najveći kod sinter ploče a najmanji kod jednostrukog uvodnika.

4.4. Brzina tečnosti u silaznoj cevi

Intenzivna recirkulacija tečnosti je glavna osobina airlift reaktora po kojoj se razlikuju od barbotaznih kolona. U slučaju airlift reaktora sa spoljnom cevi uvođenje gasa u uzlaznu cev uzrokuje razliku gustina fluida u uzlaznoj i silaznoj cevi, što dovodi do recirkulacije tečne faze. Brzina recirkulacije tečne faze utiče na sadržaj gasa u koloni, režim strujanja fluida, prenos mase i toplote, intenzitet mešanja i omogućava rad sa trofaznim sistemima. Otuda je brzina recirkulacije tečne faze pored sadržaja gasa, jedna od najznačajnijih projektnih veličina airlift reaktora. U MBR sa ravnim membranama se naziva cross flow brzina, dok se u MBR sa cevnom membranom cross flow brzina (W_M) dobija iz jednačine kontinuiteta:

$$A_M W_M = A_S W_{LS} \quad (4.12)$$

Cross flow brzina značajno utiče na fluks permeata i smanjuje prljanje membrane. Liu i sar. [4] i Sofia i sar. [113] su u ALURM pokazali da se povećanjem cross flow brzine smanjuje brzina prljanja membrane.

U airlift reaktorima definisane su tri vrste brzina: prividna, stvarna i ukupna brzina tečnosti [9]. Prividna brzina tečnosti (W_L) predstavlja odnos zapreminskog protoka i površine poprečnog preseka cevi kroz koji protiče ne uzimajući u obzir gas. Zbog uvođenja gasa površina poprečnog preseka za proticanje tečnosti se smanjuje. Tako da u stvarnosti tečnost protiče samo kroz jedan deo cevi dok je ostali deo ispunjen gasom. Tada brzina tečnosti predstavlja stvarnu brzinu (U_L). Veza između stvarne i prividne brzine data je sledećim izrazom:

$$U_L = \frac{W_L}{1-\epsilon_G} \quad (4.13)$$

Ukupna brzina cirkulacije predstavlja srednju vrednost stvarne brzine tečne faze u airlift reaktoru.

Brzina tečnosti u airlift reaktorima sa spoljnom cevi je funkcija prividne brzine gasa, osobina tečnosti i gasa, tipa distributora gasa i geometrijskih karakteristika kolone.

Da bi se uspostavio način rada B u ALSRM, nivo tečnosti u gasnom separatoru je smanjen, što je omogućilo da se mehurovi gasa kreću duž silazne cevi. Mehurovi gasa predstavljaju dodatni otpor kretanju tečnosti i smanjuju brzinu tečnosti. Na taj način nivo tečnosti u separatoru utiče na brzinu tečnosti. Tako su npr. malim povećanjem nivoa tečnosti u separatoru Bentifraouine i sar. [8] povećali brzinu tečnosti 2,7 puta. Takođe, Al-Masry [114] je povećao brzinu tečnosti sa povećanjem zapreminskog odnosa tečnosti u gasnom separatoru i reaktoru. Povećavanjem ovog odnosa iznad 19%, brzina tečnosti se nije više povećavala. Do istih zapažanja su došli i Gianetto i sar. [115] kod kojih je brzina tečnosti imala najveće vrednosti za zapreminski odnos od 32%.

Uticaj membrane na brzinu tečnosti se može posmatrati kao uticaj hidrodinamičkog otpora na protok tečnosti. Otpor kretanju tečnosti se može kvantifikovati pomoću ukupnog koeficijenta trenja (K_f). Povećavanjem K_f u airlift reaktoru brzina tečnosti se smanjuje. Povećanjem K_f Verlaan [58] je brzinu recirkulacije tečnosti smanjio i do 90%. Kod dugačkih membrana veći je pad pritiska, a brzina tečnosti manja. Prieske i sar. [66] su određivali brzinu tečnosti u reaktoru sa i bez ravnih membrana. Razvili su model za predviđanje vrednosti brzine tečnosti u reaktoru sa ravnom membranom.

U svim dosadašnjim istraživanjima u ALSR brzina tečnosti raste sa porastom prividne brzine gasa. Porast brzine je izraženiji pri nižim prividnim brzinama gasa, dok pri većim protocima gasa dolazi do ispunjavanja uzlazne cevi mehurovima gasa, što predstavlja otpor kretanju tečnosti i usporava njeno kretanje. Kod ALURM, Sofia i sar. [113] su eksperimentalno pokazali da cross flow brzina dostiže plato pri protocima gasa većim od $0,017 \text{ m}^3/\text{m}^2\text{s}$, tako da je dalje povećanje protoka gasa ekonomski neisplativo. U airlift MBR u kojima tečnost cirkuliše bez pumpe, javlja se problem kontrolisanja i podešavanja brzine tečnosti jer se može jedino regulisati preko protoka gasa. Zbog toga je za pravilno korišćenje airlift MBR bitno poznavati zavisnost brzine tečnosti od protoka gasa.

Osobine tečnosti na brzinu tečnosti mogu uticati na dva načina [101]:

- direktno - npr. povećana viskoznost tečnosti povećava gubitke usled trenja i tako smanjuje brzinu cirkulacije i

- indirektno - osobine tečnosti utiču na raspodelu gasa u koloni, utičući tako na pogonsku silu za recirkulaciju.

Površinski napon na brzinu tečnosti utiče menjajući lokalnu raspodelu gasa u airlift reaktoru sa spoljnom cevi. Na osnovu ranijih ispitivanja, poznato je da snižavanje površinskog napona kao osnovni efekat dodatka alkohola, ima za posledicu sprečavanje koalescencije, a samim tim i smanjenje veličine mehurova. Usled manje brzine isplivavanja ovakvih mehurova, raste sadržaj gasa u uzlaznoj cevi dok u silaznoj cevi nema mehurova. Na taj način raste pogonska sila za cirkulaciju tečnosti. Kako se broj mehurova znatno povećava dodatkom alkohola oni predstavljaju dodatni otpor kretanju tečnosti. To znači da alkoholi imaju dvojako dejstvo na brzinu tečnosti.

Weiland i Onken [5] u ALSR su zapazili povećanje brzine tečnosti u odnosu na vodu usled dodatka 2-propanola, povećanje je bilo srazmerno koncentraciji alkohola. Kod Pošarca [7] koji je koristio perforiranu ploču, prisustvo metanola i *n*-butanola povećalo je brzinu tečnosti u odnosu na vodu za oko 10%, za oba otvora blende. Interesantno je da kod potpuno otvorene blende tj. pri velikim brzinama tečnosti do 0,7 m/s nije bio zapažen uticaj tipa i koncentracije alkohola. Sa druge strane, kod manjih brzina tečnosti do 0,4 m/s (blenda 20%), ovaj uticaj bio je uočen. Al-Masry i Dukkan [106] i Miyahara i Nagatani [46] u ALSR nisu uočili značajniji uticaj alkohola na brzinu tečnosti. Nakon pregleda dosadašnje literature može se zaključiti da je efekat koncentracije i tipa alkohola na brzinu tečnosti još uvek nedovoljno istražen i da po svoj prilici zavisi od vrednosti brzine tečnosti i tipa uvodnika.

Pored uticaja osobina tečne faze, na vrednosti brzine tečne faze u razblaženim rastvorima alkohola utiče i distributor gasa, budući da distributor gasa stvara početne mehurove i tako utiče na sadržaj gasa u uzlaznoj cevi. Usled većeg sadržaja gasa u uzlaznoj cevi pogonska sila za recirkulaciju tečnosti se povećava, te se i brzina tečne faze povećava. Bendjaballah i sar. [28] su dobijali veće brzine tečnosti primenom višecevnog uvodnika gasa nego kad su koristili jednostruki uvodnik - razlike u vrednostima za brzinu tečnosti između dva uvodnika bile su iste za ceo opseg prividnih brzina gasa. Cao i sar. [100] su zaključili da je uticaj distributara bio najuočljiviji na promenu brzine cirkulacije u prelaznom režimu pri prividnim brzinama gasa od 0,025 m/s do 0,045 m/s. Međutim, Miyahara i sar. [116] nisu primetili značajnije razlike u vrednostima za brzinu tečnosti kada su poredili perforiranu ploču sa više otvora i samo sa jednim otvorom.

Zbog protivrečnih tvrdnji o uticaju alkohola i različitih distributora na brzinu tečnosti u ALSR i radi poređenja airlift reaktora sa i bez membrane javila se potreba za detaljnim istraživanjima ovih fenomena u ovom radu.

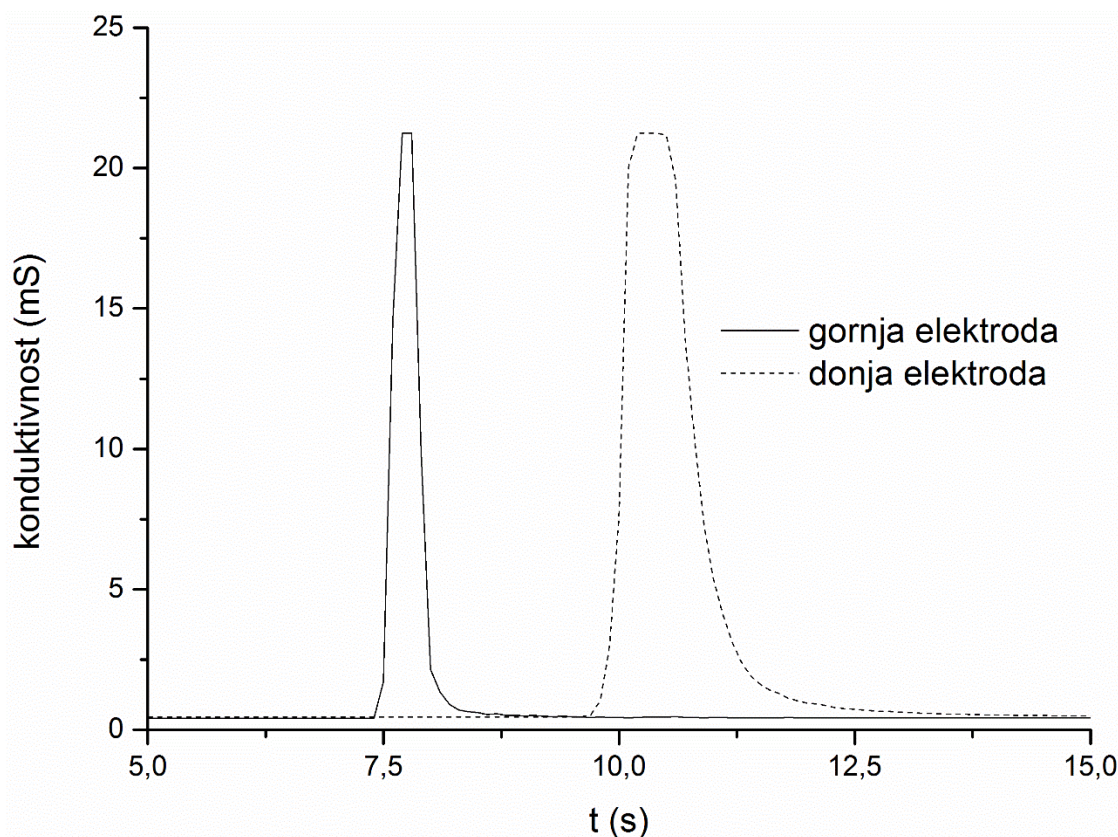
4.4.1. Određivanje brzine tečnosti

Budući da je brzina tečnosti veoma značajna za projektovanje airlift reaktora, razvijene su brojne metode za njeno merenje. Prema fizičkom principu merenja, sve metode za merenje brzine tečnosti se mogu podeliti na invazivne i neinvazivne metode [111]. Među najčešće korišćenim neinvazivnim metodama je merenje brzine primenom različitih obeleživača toka. Obeleživač toka može da bude u tečnom ili čvrstom agregatnom stanju. Tečni obeleživač toka može da bude: rastvor elektrolita, boja, zagrejana tečnost i sl. Ukoliko se koristi elektrolit mora se paziti da njegova koncentracija ne pređe kritičnu vrednost iznad koje dolazi do inhibiranja koalescencije. Prednost korišćenja tečnog obeleživača toka je u tome što se pored podataka za brzinu tečne faze dobijaju i podaci za vreme mešanja tečne faze. Takođe, prednost korišćenja tečnog obeleživača toka u odnosu na čvrsti obeleživač toka je mogućnost određivanja brzine tečne faze u sistemu u kome postoji čvrsta faza. Najznačajnije invazivne tehnike koje se koriste za određivanje brzine tečne faze u višefaznim kontaktorima su ultrazvučne tehnike, tehnike anemometrije toplog filma i primena Pitove cevi [111].

Brzina tečnosti u silaznoj cevi u ALSR i ALSRM u ovom radu određivana je široko rasprostranjenom metodom obeleživača toka. Kao obeleživač toka korišćen je rastvor natrijum hlorida (NaCl) koncentracije 4 mol/dm^3 . Rastvor NaCl zapremine 20 cm^3 ubrizgavan je kroz bočni otvor na vrhu silazne cevi. Sistem za merenje brzine tečnosti obuhvatao je dve minijaturne konduktometrijske elektrode tipa eDAQ i uređaj (isoPod) za prikupljanje signala sa A/D konvertorom koji je bio povezan za računar serijskim portom. Brzina tečnosti je određivana na osnovu razlike vremena pojave pika tj. prolaska NaCl. Sa grafika je očitavano vreme potrebno obeleženoj supstanci da prođe rastojanje od 175 cm između dve elektrode postavljene u silaznoj cevi. Pri prolasku rastvora NaCl preko elektroda registrovani su pikovi sa višom provodljivosti, u odnosu na provodljivost radne tečnosti.

Na slici 4.15 prikazani su pikovi koji se javljaju pri prelasku rastvora NaCl preko konduktometrijskih elektroda. Prvi pik na slici 4.15 uočen je pri prelasku rastvora NaCl preko

gornje elektrode, tj. neposredno nakon ubrizgavanja rastvora NaCl, dok je donji pik na slici uočen na drugoj elektrodi nakon što je rastvor NaCl prešao put od 175 cm od prve elektrode.



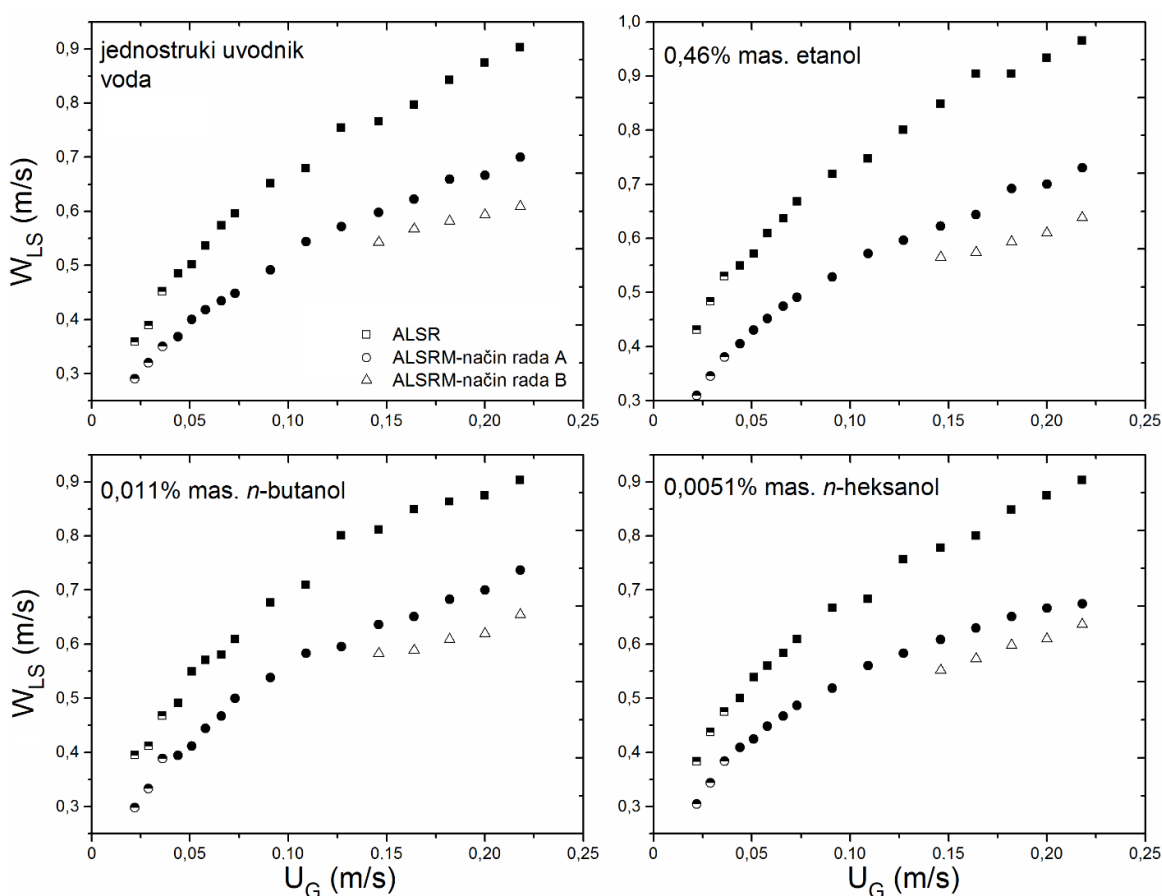
Slika 4.15. Pik za određivanje brzine tečnosti u silaznoj cevi u vodi

Za svaki protok gasa vršena su dva merenja, te je zatim određena srednja brzina tečnosti u silaznoj cevi. Relativna greška rezultata nije prelazila $\pm 3\%$. Problem koji se stvarao prilikom primene ove metode bila je mogućnost da se tečnost u airlift reaktoru zasiti NaCl i time onemogući detektovanje prolaska supstance elektrodom. Zato je bilo neophodno menjanje rastvora nakon svakog trećeg merenja brzine [9]. Takođe, dodavanjem tečnosti rastao je i njen nivo u airlift reaktoru, što je rešavano ispuštanjem rastvora preko slavine na dnu kolone.

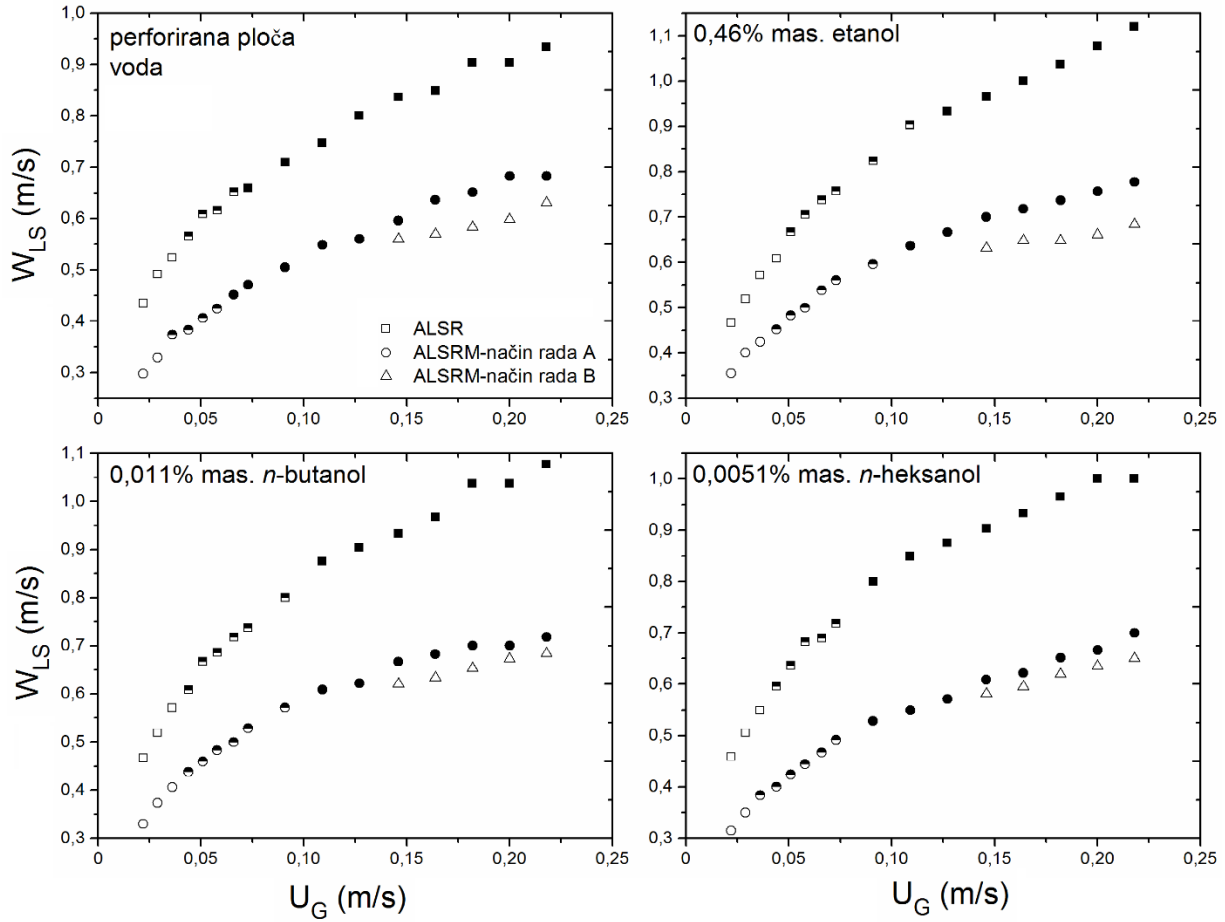
4.4.2. Brzina tečnosti u silaznoj cevi u airlift reaktoru sa i bez membrane

Na slikama 4.16-4.18 prikazan je uticaj prividne brzine gasa i ugrađene membrane na brzinu tečnosti u silaznoj cevi. U skladu sa dosadašnjim istraživanjima i u ovom radu je zapažen porast brzine tečnosti sa povećanjem prividne brzine gasa. Iz eksperimentalnih podataka se uočava

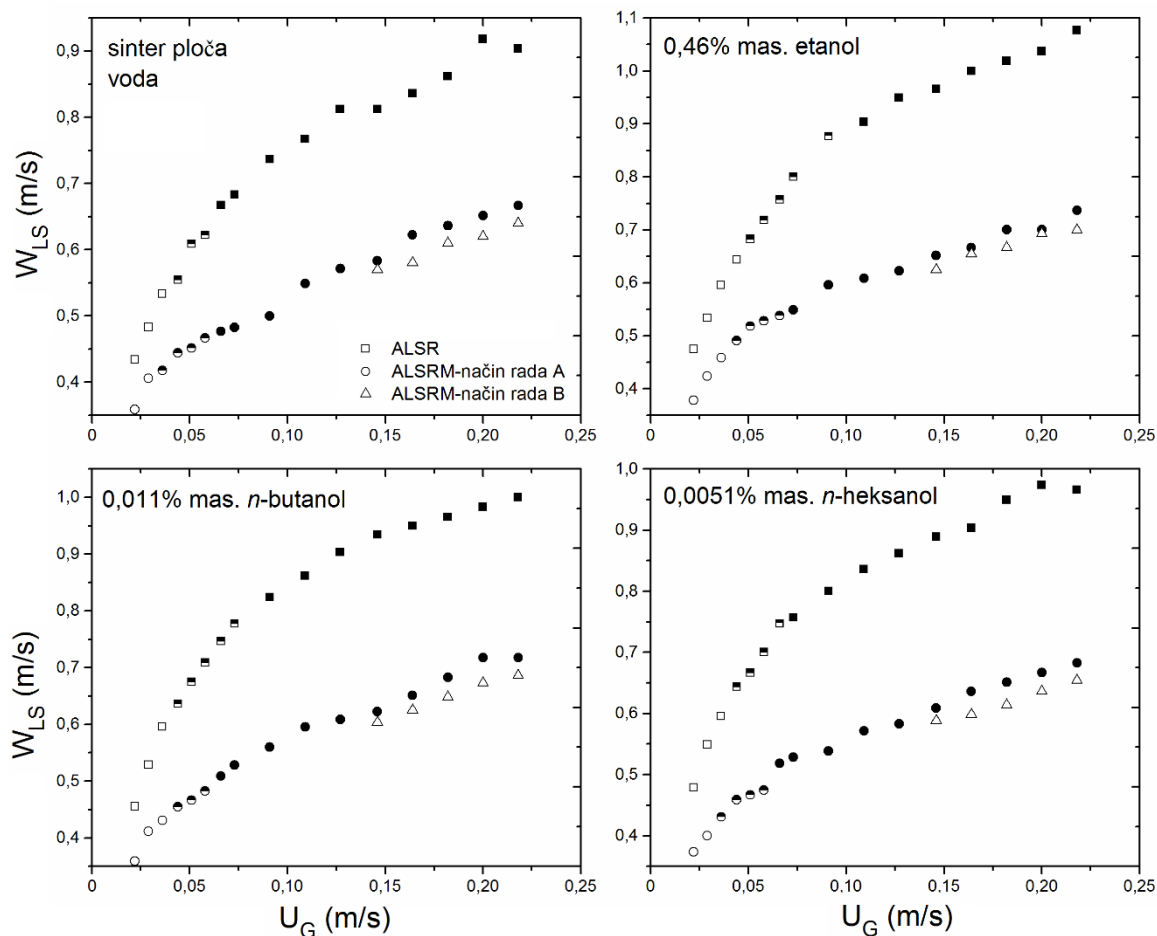
da je W_{LS} u ALSRM u odnosu na ALSR za SP i PP bila manja od 36% do 49%, dok je za JU smanjenje iznosilo od 19% do 27% zavisno od sistema. Brzina tečnosti veoma zavisi od hidrodinamičkih otpora u reaktoru, tako da male promene u konstrukciji reaktora značajno menjaju brzinu tečnosti. Poznavanje brzine tečnosti kroz kanale membrane, tj. *cross flow* brzine, je veoma bitno da bi se smanjilo prljanje membrane. Jednačina kontinuiteta se može primeniti za izračunavanje brzine u sedmokanalnoj cevnoj membrani. Brzina tečnosti u sedmokanalnoj membrani je oko 2,5 puta veća od W_{LS} . Naš ALSRM je pri većim U_G na donjoj granici pogodnosti za postizanje *cross flow* brzina koje se inače koriste za laboratorijsku mikrofiltraciju u bioreaktorima [117,118]. *Cross flow* brzine prema ovim autorima bi trebalo da se kreću u opsegu od 2 do 3 m/s. Prilikom načina rada B u ALSRM veliki mehurovi gasa u silaznoj cevi smanjili su W_{LS} oko 5-15 % zavisno od sistema gas-tečno i tipa distributora gasa. U opsegu ispitivanih U_G brzine mehurova u silaznoj cevi su se kretale od 35 - 46 cm/s.



Slika 4.16. Poređenje brzina tečnosti u silaznoj cevi između ALSR i ALSRM kada je korišćen jednostruki uvodnik. Legenda: svetli simboli-homogeni režim, polutamni simboli-prelazni režim, tamni simboli-turbulentni režim



Slika 4.17. Poređenje brzina tečnosti u silaznoj cevi između ALSR i ALSRM kada je korišćena perforirana ploča. Legenda: svetli simboli-homogeni režim, polutamni simboli-prelazni režim, tamni simboli-turbulentni režim

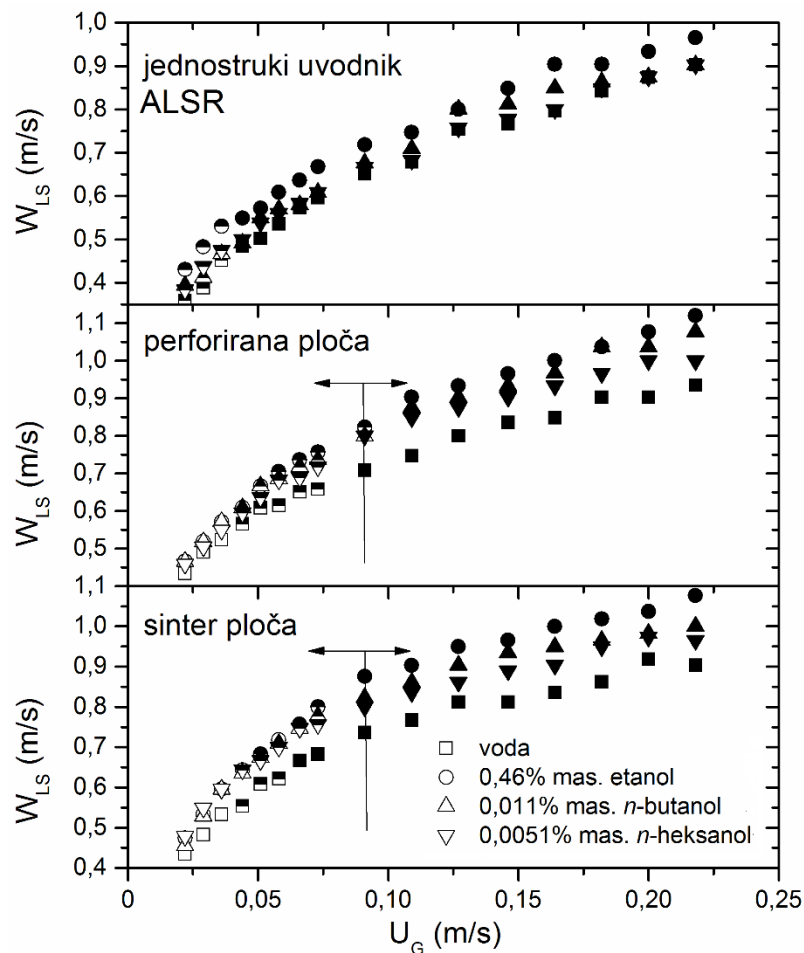


Slika 4.18. Poređenje brzina tečnosti u silaznoj cevi između ALSR i ALSRM kada je korišćena sinter ploča. Legenda: svetli simboli-homogeni režim, polutamni simboli-prelazni režim, tamni simboli-turbulentni režim

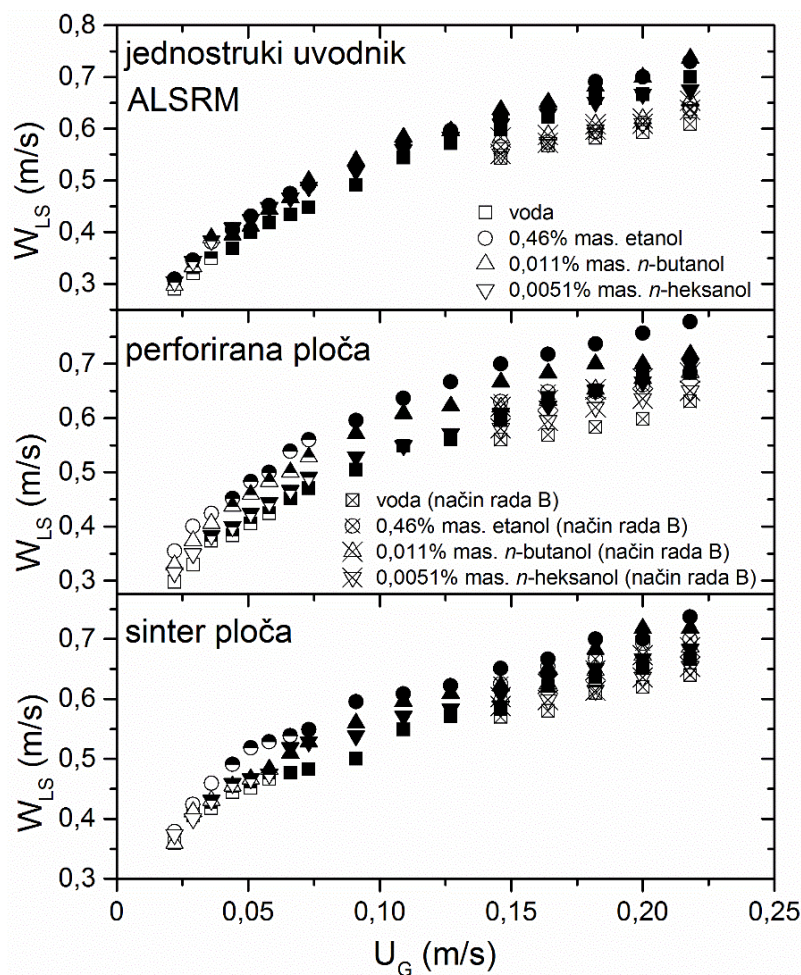
4.4.3. Uticaj alkohola na brzinu tečnosti

Rezultati za rastvore alkohola prikazani su na slikama 4.19-4.20., pokazuju da se brzina tečnosti u silaznoj cevi menja dodatkom alkohola. Razlog tome je povećanje pogonske sile za cirkulaciju tečnosti. Naime, pogonska sila proporcionalna je razlici hidrostatičkih pritisaka u uzlaznoj i silaznoj cevi. Dodatkom alkohola povećava se ε_{GU} dok sadržaj gasa ostaje nepromenjen u silaznoj cevi jer ne dolazi do uvlačenja mehurova, pa se kao rezultat toga W_{LS} povećava. Ugrađena membrana u silaznoj cevi smanjila je uticaj alkohola na W_{LS} . Na primer, povećanje W_{LS} usled dodatka alkohola u ALSR u odnosu na vodu kada je korišćena SP iznosilo je od 10% do 15,6%, zavisno od sistema gas-tečno, dok je u ALSRM ono iznosilo samo od 3,7% do 10,7%. Rastvori etanola i *n*-butanola su imali veći uticaj na W_{LS} nego rastvor *n*-heksanola, što se može

objasniti stvaranjem većeg broja znatno manjih mehurova gasa u rastvoru *n*-heksanola. Mehurovi gasa bili su gusto pakovani u uzlaznoj cevi i predstavljali su veliki otpor kretanju tečnosti. Prilikom oba načina rada ALSRM dodati alkoholi su imali isti uticaj na W_{LS} .



Slika 4.19. Uticaj dodatih alkohola na brzinu tečnosti u silaznoj cevi u ALSR. Legenda: svetli simboli-homogeni režim, polutamni simboli-prelazni režim, tamni simboli-turbulentni režim

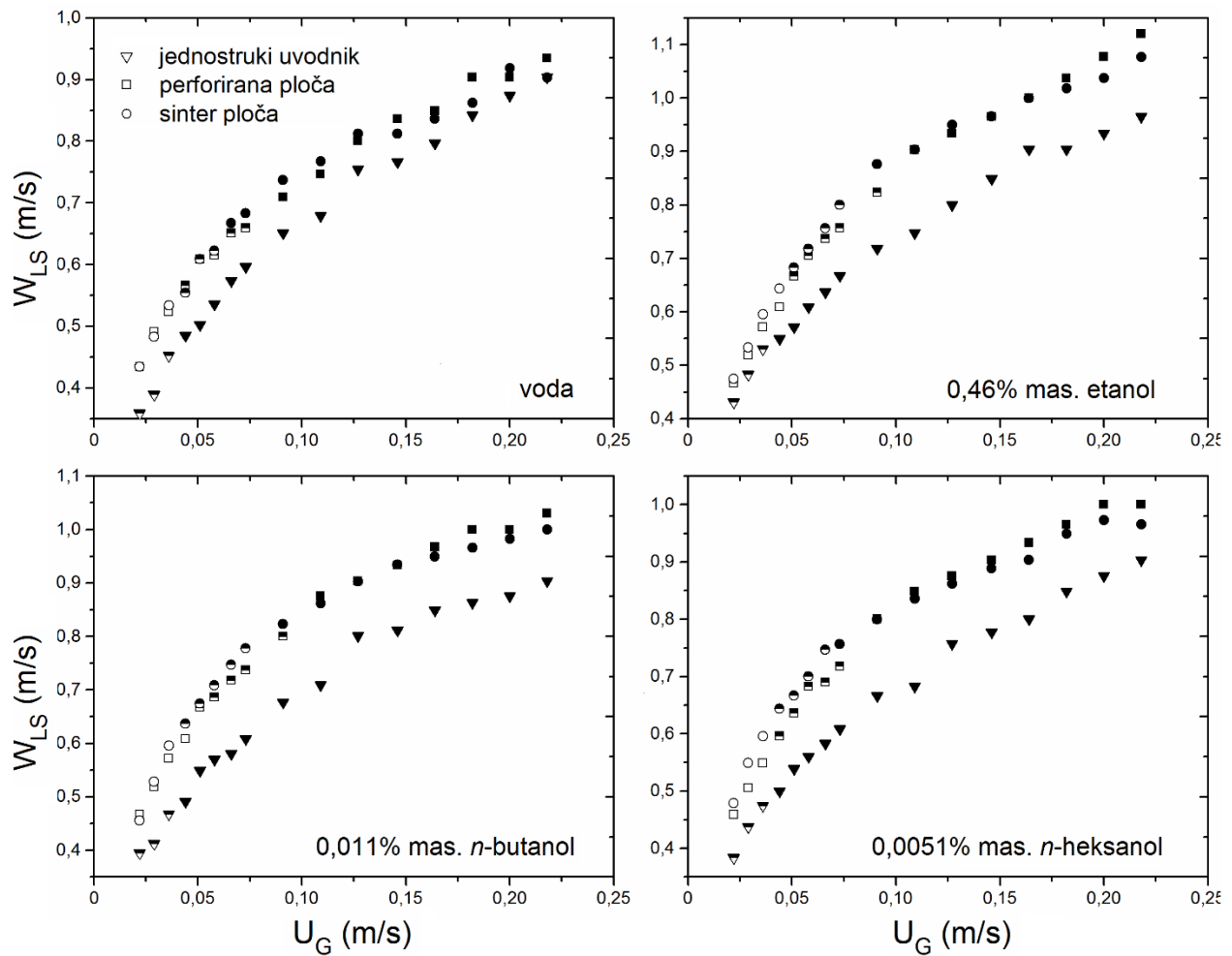


Slika 4.20. Uticaj dodatih alkohola na brzinu tečnosti u silaznoj cevi u ALSRM. Legenda: svetli simboli-homogeni režim, polutamni simboli-prelazni režim, tamni simboli-turbulentni režim

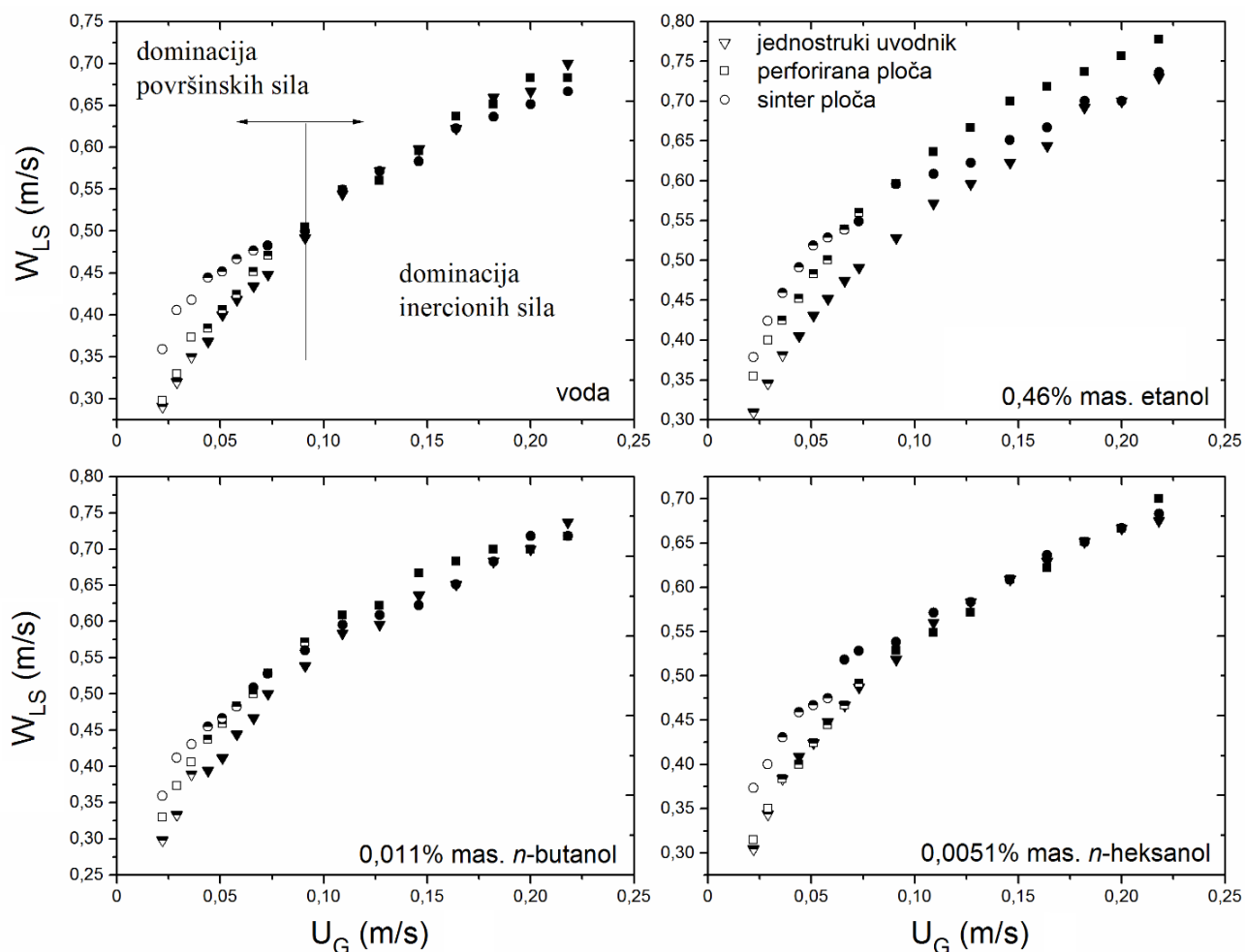
4.4.4. Uticaj distributora gasa na brzinu tečnosti

Ekperimentalni podaci dobijeni u ovom radu su pokazali da distributori gasa utiču na brzinu tečnosti u silaznoj cevi (slika 4.21-4.22). U oblasti površinskih sila (mehurasti i prelazni tok) u ALSRM najveće W_{LS} su se postigle korišćenjem SP, pa zatim PP i JU. Međutim, u oblasti inercionih sila, tj. u turbulentnom toku, ($U_G > 0,1$ m/s) razlike u vrednostima za W_{LS} između distributora kod većine sistema nisu bile veće od 10% (Slika 4.22). Ugrađena membrana je smanjila uticaj distributora na W_{LS} zbog povećane koalescencije pri manjim U_G u odnosu na ALSR, usled smanjene W_{LS} . Kod ALSR jednako efikasni uvodnici su bili SP i PP. Njihova prednost u odnosu na JU je iznosila od 12 do 20% zavisno od sistema gas-tečno. Sa slika 4.21 i 4.22 može se uočiti trend koji pokazuje da je SP efikasnija pri manjim U_G a PP pri većim. Razlike

između dva uvodnika nisu velike ali je trend bio stalan za sve sisteme gas-tečno. Ovo proizilazi iz toga što kod dominacije površinskih sila najmanji mehurovi koje obrazuje SP stvaraju najveći ε_{GU} i time najveću pogonsku silu za kretanje tečnosti. Međutim, u inercionom režimu usled izražene koalescencije mehurova uticaj distributora gasa se smanjuje, pogonske sile su slične za oba distributora. Kako SP formira vrlo male mehurove u odnosu na PP, tako se oni duže zadržavaju u uzlaznoj cevi i time stvaraju veći otpor proticanju tečnosti, što dovodi do manje W_{LS} . Prilikom oba načina rada ALSRM tip distributora je imao isti uticaj na W_{LS} .



Slika 4.21. Uticaj distributora gasa na brzinu tečnosti u silaznoj cevi u ALSR. Legenda: svetli simboli-homogeni režim, polutamni simboli-prelazni režim, tamni simboli-turbulentni režim



Slika 4.22. Uticaj distributora gasa na brzinu tečnosti u silaznoj cevi u ALSRM. Legenda: svetli simboli-homogeni režim, polutamni simboli-prelazni režim, tamni simboli-turbulentni režim

4.4.5. Zaključci o brzini tečnosti

Eksperimentalni rezultati i njihova analiza omogućavaju izvođenje sledećih zaključaka o brzini tečnosti u silaznoj cevi u reaktoru sa i bez membrane.

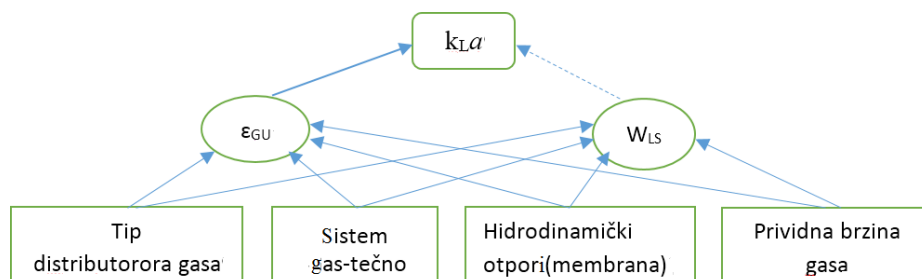
- Brzina tečnosti u silaznoj cevi u airlift reaktoru sa i bez membrane raste pri povećanju prividne brzine gasa.
- Višekanalna cevna membrana u silaznoj cevi uzrokovala je smanjenje brzine tečnosti u silaznoj cevi do 50%. Pored toga, cross flow brzina je ostala u granicama preporučenih brzina koje se koriste u ultrafiltraciji i mikrofiltraciji.

- Prisustvo mehurova gasa u silaznoj cevi tokom načina rada B smanjilo je brzinu tečnosti u silaznoj cevi do 15%. Brzine mehurova u silaznoj cevi su se kretale od 35-46 cm/s.
- Dodatkom alkohola povećala se brzina tečnosti u silaznoj cevi u reaktoru sa i bez membrane. Najveće brzine postignute su u rastvorima etanola i *n*-butanola.
- U oblasti površinskih sila (mehurasti i prelazni tok) najveće brzine tečnosti postignute su korišćenjem sinter ploče, pa zatim perforirane ploče i jednostrukog uvodnika. U oblasti inercionih sila, tj. u turbulentnom toku, perforirana ploča postaje neznatno efikasniji uvodnik od sinter ploče.

4.5. Zapreminski koeficijent prenosa mase

Definisanje brzine prenosa mase između gasne i tečne faze određuje ukupnu brzinu hemijsko-inženjerskih operacija, kao što su reakcije gas-tečno (aerobne fermentacije, oksigenacija, hidrogenizacija, hlorinacija), apsorpcija i destilacija. Korak koji određuje ukupnu brzinu prenosa mase je prenos kiseonika iz gasne u tečnu fazu, odnosno on je limitirajući stupanj u svim onim slučajevima kada se otpor prenosu mase u gasnoj fazi može zanemariti. Ovo je slučaj kada je rastvorljivost difundujuće komponente mala, kao što je to npr. kod rastvorljivosti kiseonika u vodi i vodenim rastvorima. Karakteristike ovog stupnja u prenosu mase su: specifična površina razmene mase (a) i koeficijent prenosa mase (k_L). Proizvod ovih veličina ($k_L a$) je zapreminski koeficijent prenosa mase, jedna od značajnijih veličina kod gas-tečno reaktora, a naročito kod bioreaktora. Za rast mikroorganizama potrebno je obezbediti dovoljnu količinu kiseonika u aerobnom bioreaktoru. Brzina snabdevanja kiseonikom mora da bude brža ili barem jednaka sa brzinom ukupne potražnje kiseonika od strane ćelije u procesu ravnoteže. Kako je za visoku produktivnost bioreaktora neophodna visoka koncentracija ćelija u njemu i kako je koncentracija kiseonika u sistemu ta koja ograničava broj mikroorganizama, jasno je da je poznavanje $k_L a$ neophodno za uspešno projektovanje i upravljanje gas-tečno i gas-tečno-čvrsto reaktorima. Povećanje razmera uređaja vrši se na osnovu jednakih $k_L a$ vrednosti modela i prototipa. Kako barbotiranje gasa čini glavni deo energetske potrošnje reaktora, primenljivost i kvalitet nekog reaktora u industriji zavisi od količine energije koju treba utrošiti da bi se postigao odgovarajući $k_L a$. Zato je poželjno postići što veći $k_L a$ uz što manju potrošnju energije [9].

Zapreminski koeficijent prenosa mase je proizvod dve međusobno nezavisne veličine tako da na kompleksan način zavisi od procesnih parametara, fizičkih osobina sistema i od geometrijskih karakteristika reaktora (slika 4.23).



Slika 4.23. Veza između ispitivanih hidrodinamičkih parametara i prenosa mase

Uticaj protoka gasa na k_{La} je ispitivan na mnogim airlift reaktorima. Vrednosti za k_{La} , u sistemima gas-voda, u homogenom i prelaznom režimu za U_G do oko 8 cm/s bile su u opsegu od 0,025 do 0,04 1/s, a u turbulentnom režimu do 0,065 1/s [9]. Za turbulentno strujanje nađeno je da k_{La} ne zavisi ili blago raste sa protokom gasa [119]. Vrednosti za k_{La} zavisno od sistema gas-tečno i geometrije reaktora u početku rastu linearno sa U_G i zatim se taj porast izravna u turbulentnom režimu. Najčešće ustanovljena eksperimentalna veza je:

$$k_{La} = U_G^m \quad (4.14)$$

Kod airlift reaktora vrednost eksponenta m najčešće iznosi oko 0,65 [119].

Ispitivanja uticaja dodatka alkohola na k_{La} pokazala su da površinski napon nije dovoljna karakteristika za opisivanje složenih zbivanja oko površine mehurova [120-122]. Hidrodinamičko ponašanje u blizini međufazne površine uslovljeno je oblikom molekula i prostornom preraspodelom njegovih hidrofobnih i hidrofilnih grupa što nije u direktnoj vezi sa površinskim naponom. Kod normalnih alkohola k_L opada sa rastućom koncentracijom i dužinom lanca alkohola [50]. Dodatkom alkohola u vodu a raste usled povećanja sadržaja gasa i smanjenja prečnika mehurova. Stoga k_{La} može da se poveća ili smanji u odnosu na vrednost k_{La} u vodi, u zavisnosti od toga da li je izraženije smanjenje k_L ili povećanje a . U ALSR uočeno je da k_{La} zavisi od U_G i raste sa porastom koncentracije alkohola i porastom broja ugljenikovih atoma alifatičnih alkohola [5,7,46]. Međutim, Al-Masry i Dukkan [106] su zapazili da se dodatkom 100 ppm n -oktanolu k_{La} smanjio u odnosu na vrednost k_{La} u vodi i do 3,4 puta. Takođe, Deng i sar. [123] su u svojim

eksperimentima u ALUR varirali koncentraciju *n*-butanola u intervalu od 0 do 1% mas. pri konstantnoj prividnoj brzini gasa ($U_G = 6$ cm/s) i uočili da k_{La} vrednosti pokazuju minimum pri koncentraciji *n*-butanola od 0,5% mas. Ova protivurečna zapažanja potvrđuju složeni i nedovoljno ispitani mehanizam delovanja rastvora alkohola na k_{La} .

Uticao tipa distributora gasa na k_{La} je izraženiji kod sistema gas-tečno koji inhibiraju koalescenciju mehurova, jer samo u tom slučaju je srednja veličina mehurova funkcija primarne raspodele veličina mehurova [124] [121]. Tip distributora gasa više utiče na a nego na k_L . Tako da različite geometrije distributora gasa prema Sotiriadis i sar. [125] ne utiču značajnije na k_L . Ferreira i sar. [126] su u svojim opsežnim eksperimentima ustanovili da distributor gasa sa većim otvorima ($d_o = 0,5$ mm) proizvodi veće mehurove gasa sa manjim vrednostima k_L i a , nego uodnik sa manjim otvorima ($d_o = 0,3$ mm). Ovo je objašnjeno tako što uodnik sa većim otvorima formira rojeve, tj. mehurovi se grupišu odmah posle izlaza iz uodnika, tako da i drugi mehurovi utiču na k_L jednog mehura i daju manje vrednosti za k_L . Zbog toga vrednost k_{La} raste sa povećanjem usitnjenosti mehurova. Miyahara i sar. [116] su u svojim eksperimentima u ALSR postigli veći ϵ_{GU} i k_{La} u vodi pri malim prividnim brzinama gasa (do $U_G = 0,1$ m/s) korišćenjem perforirane ploče sa više otvora nego kad su koristili perforiranu ploču sa samo jednim otvorom. Pri $U_G > 0,1$ m/s ove razlike nisu bile primećene. Goto i Gaspillo [19] su ustanovili da statički mikser ima veći uticaj na porast k_{La} kod jednostrukog uodnika u odnosu na uodnik sa plastičnom lopticom. Razlog tome je povećana koalescencija fino dispergovanih malih mehurova gasa kod uodnika sa plastičnom lopticom usled ugradnje statičkog miksera.

U literaturi postoji vrlo malo eksperimentalnih podataka o direktnom uticaju hidrodinamičkih otpora na k_{La} . Njihov uticaj na k_{La} se može posmatrati preko uticaja hidrodinamičkih otpora na ϵ_{GU} i W_{LS} . Istraživanja raznih autora koji su menjali otpor u spoljašnjoj petlji [7,10,16,28,92,100] pokazala su da se sa povećanjem otpora u ALSR, W_{LS} znatno smanjuje dok se ϵ_{GU} povećava. Verlaan [58] je pokazao u svojim eksperimentima da između k_{La} i hidrodinamičkih otpora postoji slična veza kao i između ϵ_{GU} i hidrodinamičkih otpora. Sadržaj gasa i k_{La} su rasli sa povećanjem otpora. Ovaj porast bio je izraženiji kada je poprečni presek silazne cevi bio smanjen za više od 50%. Takođe, povećanje hidrodinamičkih otpora značajno smanjuje W_{LS} , ali uticaj W_{LS} na k_{La} nije tako izražen kao uticaj ϵ_{GU} na k_{La} [14,63]. Uticaj hidrodinamičkih otpora na k_{La} uočen je i kod ALSR sa punjenjem. Punjenje u kolonama predstavlja značajan otpor proticanju tečnosti a postoji mogućnost da i usitnjava mehurove, što

rezultira povećanju k_{La} vrednosti. Nikakhtari i Hill [39] su povećali k_{La} 3,7 puta kada su u ALSR ugradili punjenje u vidu najlonske mreže. Punjenja u ALSR povećavaju ε_{GU} i time k_{La} tako što smanjuju srednji prečnik mehurova gasa i čine radijalni profil sadržaja gasa i brzine tečnosti uniformnim [36,41,42]. Takođe, Xu i Yu [63] su postigli 3 puta veće k_{La} vrednosti kada su koristili ALSRM sa tri uzlazne cevi u odnosu na ALSRM sa jednom uzlaznom cevi. Ispitivanja Chisti i sar. [17] pokazala su da prisustvo statičkog miksera u uzlaznoj cevi u ALSR dovodi do povećanja k_{La} od 30 do 500% u zavisnosti od korišćenog sistema gas-tečno. Do sličnih zaključaka su došli i Goto i Gaspillo [19]. U njihovom radu uočen je porast k_{La} od 30% kada je korišćen statički mikser u uzlaznoj cevi ALSR sa jednostrukim uvodnikom.

U cilju poređenja karakteristika ALSR i ALSRM u ovom radu izvršena su i određivanja zapreminskog koeficijenta prenosa mase u različitim dvofaznim sistemima koristeći tri tipa distributora gasa. Trebalo bi da ispitivanja doprinesu saznanjima o mogućnostima ovog tipa reaktora i njihovim osnovnim karakteristikama kada se primene u kombinaciji sa procesima mikrofiltracije.

4.5.1. Određivanje zapreminskog koeficijenta prenosa mase

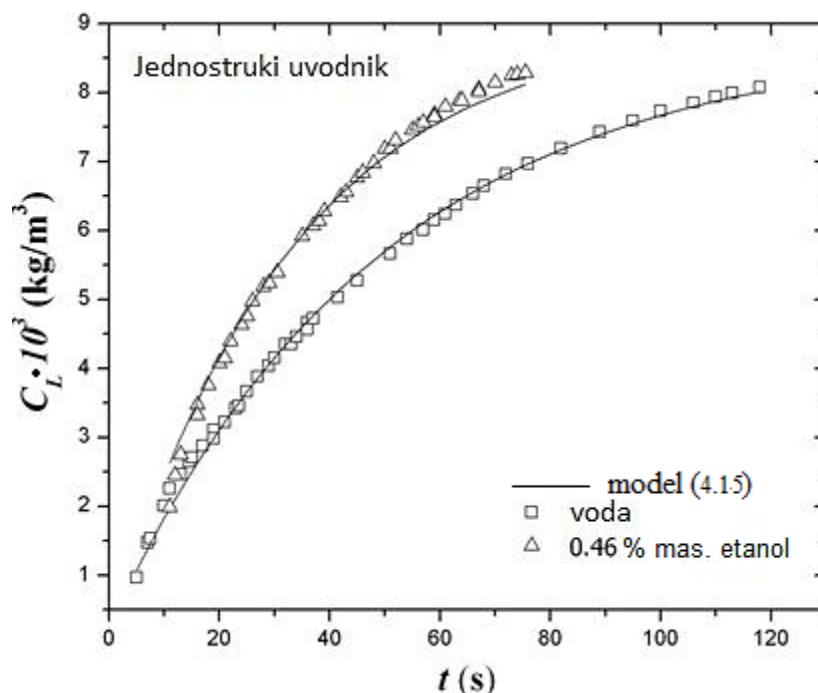
Zapreminski koeficijent prenosa mase u tečnosti određivan je u laboratorijskom airlift reaktoru sa spoljnom cevi (Slika 3.1). Ispitivanja su izvedena sa česmenskom vodom i vodenim rastvorima 0,46% mas. etanola, 0,011% mas. *n*-butanola i 0,0051% mas. *n*-heksanola. Imajući na umu da tip distributora utiče na k_{La} , u ovom radu su odabrana dva distributora; jednostruki uvodnik (JU) kao jedan od lošijih i sinter ploča (SP) kao jedan od najefikasnijih gasnih distributora. Gasna faza bio je vazduh ili azot. Promena napojne struje gasa (vazduh-azot ili azot-vazduh) vršena je pomoću trokrake slavine. Temperatura tečnosti u svim eksperimentima bila je $20 \pm 1^\circ\text{C}$. Rad kolone u odnosu na tečnu fazu bio je šaržnog tipa. Promene koncentracije kiseonika u vremenu merene su kiseoničnom optičkom elektrodom tipa LDO101, HACH. Vremenska konstanta elektrode određena je tako što je elektroda stavljena u posudu u kojoj je ispitivana tečnost zasićena azotom. U trenutku kada je merač koncentracije kiseonika pokazao da je koncentracija 0 mg/l, elektroda je brzo premeštena u posudu u kojoj se ispitivana tečnost, zasićena kiseonikom, intenzivno meša. Vreme proteklo od momenta kada je displej merača koncentracije kiseonika pokazao da je koncentracija 0 mg/l, pa do momenta kada je postignuto 63,2% ravnotežne koncentracije rastvorenog kiseonika predstavlja vremensku konstantu elektrode. Ona je za sve

ispitivane tečnosti imala vrednosti manje od 9 s. Desorpcija kiseonika iz tečnosti vršena je pomoću azota, sve dok kiseonik ne bi bio potpuno desorbovan iz tečnosti. Da bi se izbegao uticaj malih mehurova azota na merenje k_{La} , vazduh je u kolonu uveden tek posle potpunog izlaženja malih mehurova azota iz tečnosti. Oni deluju kao barijera za kontakt kiseonika i tečnosti [127] i mogu prouzrokovati značajno manje vrednosti k_{La} .

Osnova matematičkih modela za izračunavanje k_{La} dinamičkom metodom je komponentni bilans rastvorenog gasa. Uz pretpostavku o idealnom mešanju u tečnoj fazi i zanemarivanju konstante elektrode, komponentni bilans rastvorenog gasa u tečnosti može se predstaviti sledećom diferencijalnom jednačinom:

$$\frac{dC_L}{dt} = \frac{k_{La}}{1 - \epsilon_{GU}} (C_L^* - C_L), C_L(0) = 0 \quad (4.15)$$

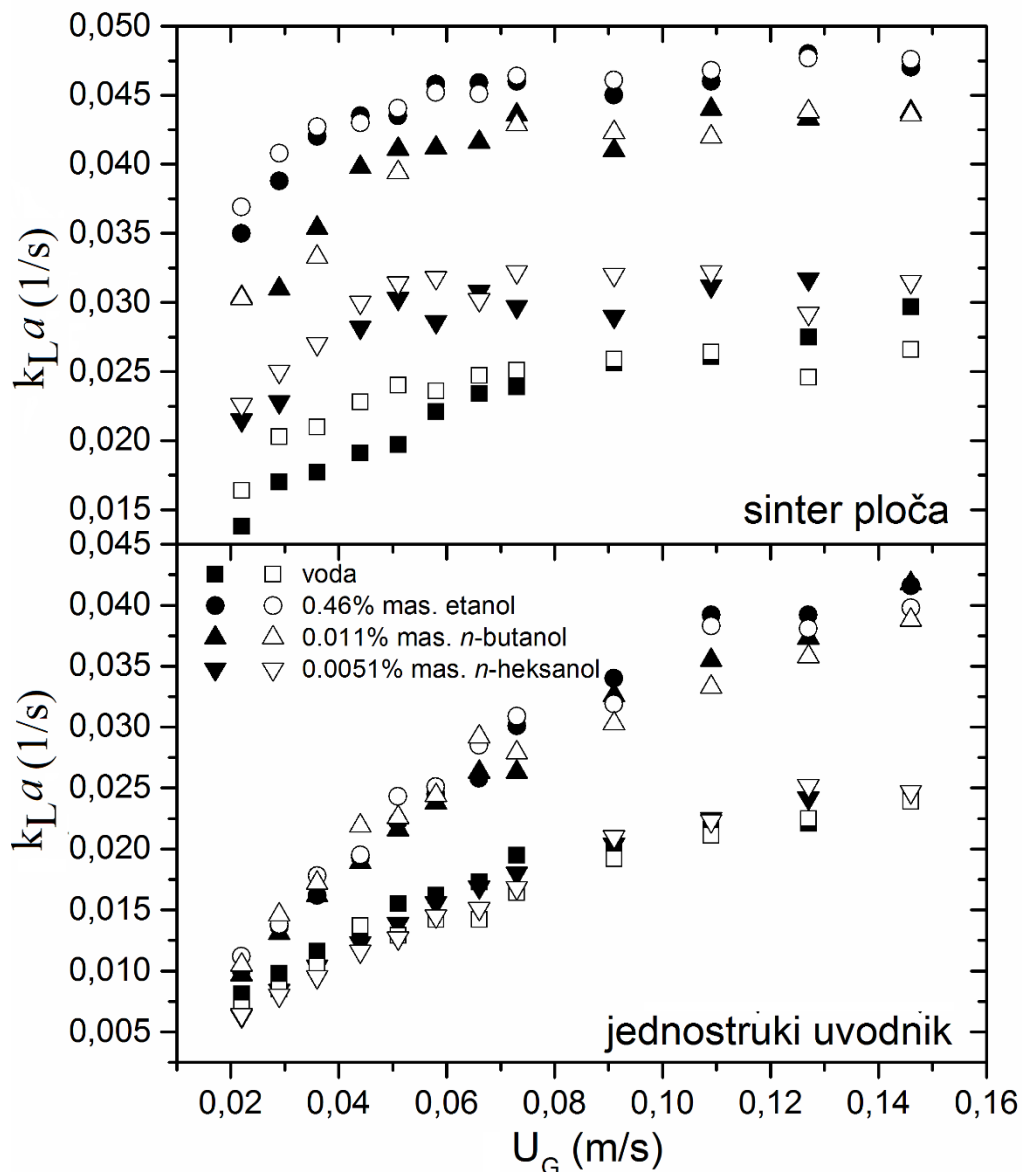
Model 4.15 zasnovan na pretpostavci o idealnom mešanju nije usvojen bez provere, na slici 4.24 prikazano je dobro slaganje između eksperimentalnih i fitovanih podataka. Relativna greška modela nije prelazila 5%, ona uključuje greške merenja sadržaja gasa i rastvorene koncentracije kiseonika. S obzirom da izračunato k_{La} primenom modela (1) nije prelazilo 0,1 1/s i da je maksimalna vrednost vremena odziva elektrode bila manja od $1/k_{La}$ za sve dvofazne sisteme, tj. van Rietov kriterijum bio je zadovoljen [128], pretpostavke o idealnom mešanju u tečnoj fazi i zanemarivanju konstante elektrode bile su opravdane.



Slika 4.24. Izmerene i izračunate vrednosti koncentracije rastvorenog kiseonika

4.5.2. Zapreminski koeficijent prenosa mase u airlift reaktoru sa i bez membrane

Slika 4.25 prikazuje uticaj prividne brzine gasa i ugrađene membrane na k_{La} . U svim ispitanim sistemima gas-tečno ugrađena membrana nije uticala na promene k_{La} vrednosti - razlike između k_{La} bile su manje od 10%. Membrana u silaznoj cevi povećala je ϵ_{GU} oko 16% za jednostruki uvodnik a za sinter ploču samo oko 8%, zbog toga se i k_{La} nije promenio. Iz prethodnih eksperimentalnih podataka (poglavlje 4.4.2) uočava se da je W_{LS} u ALSRM u odnosu na ALSR za SP bila manja od 36% do 49%, dok je za JU smanjenje iznosilo od 19% do 27% zavisno od sistema gas-tečno. Iz ovog proizilazi da promena W_{LS} slabo utiče na k_{La} .



Slika 4.25. Uticaj ugradnje membrane na zapreminski koeficijent prenosa mase. Legenda: svetli simboli-ALSR, tamni simboli-ALSRM

4.5.3. Uticaj alkohola na zapreminski koeficijent prenosa mase

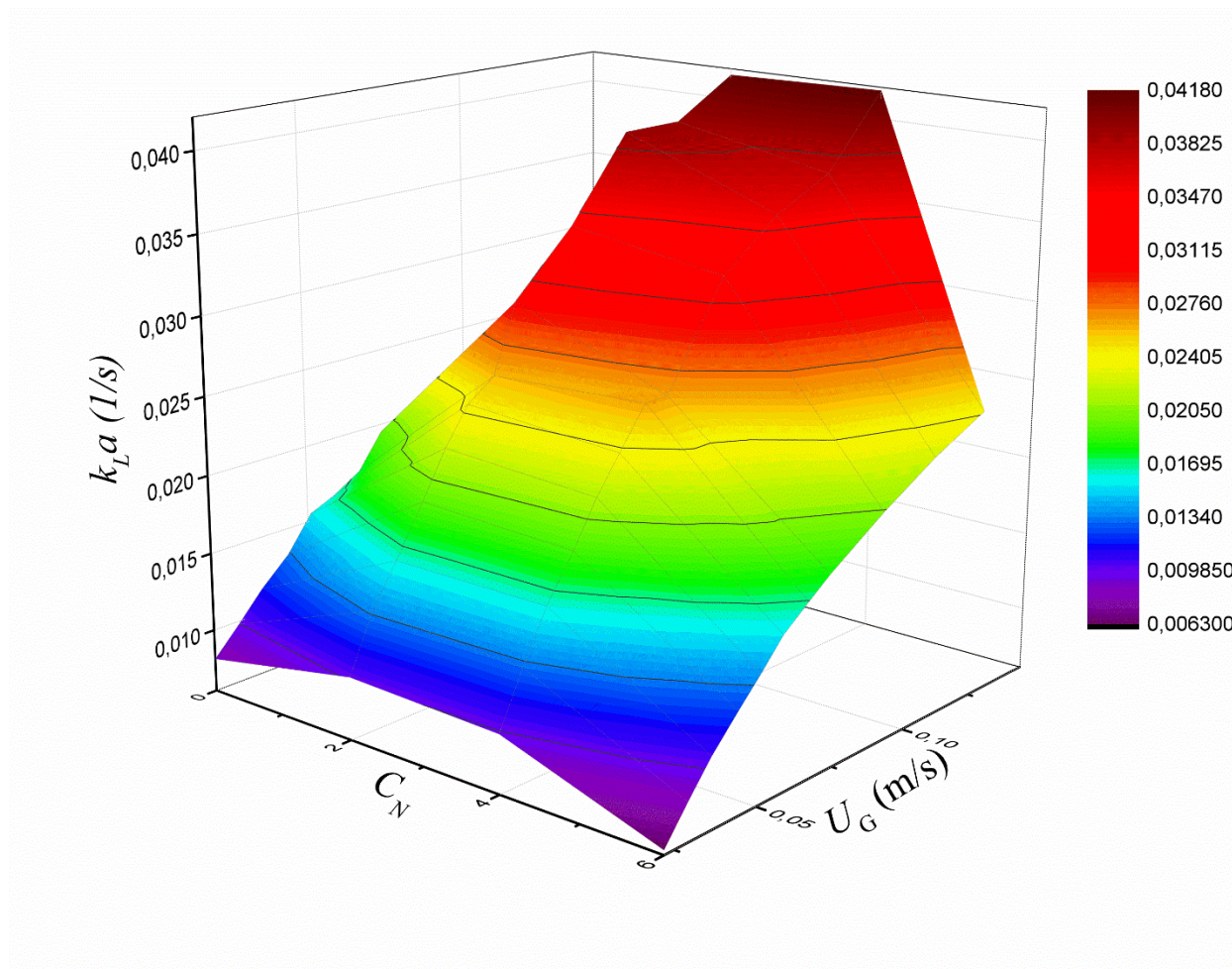
Rezultati za rastvore alkohola pokazuju da se k_{La} povećava dodatkom alkohola u odnosu na vodu (slika 4.25). Vrednosti za k_{La} su bile najveće dodatkom etanola, bez obzira na tip distributora. Uticaj pojedinačnih alkohola na k_{La} se bolje uočava kod SP. U rastvorima etanola k_{La} vrednosti u ALSR i ALSRM sa SP su bile veće u odnosu na vodu za oko 100%. U homogenom režimu, pri malim U_G , nije došlo do značajnije koalescencije čak ni kod vode, tako da dodati

alkoholi nisu mogli da iskažu svoj uticaj na sprečavanje koalescencije. Pored toga, sa slike 4.25 se uočava da za SP pri početnim vrednostima za U_G , najmanji k_{LA} se razlikuje za svaki dodati alkohol. Ovo ukazuje da rastvori alkohola utiču na k_{LA} ne samo zato što sprečavaju koalescenciju mehurova gasa smanjenjem površinskog napona, nego i zato što različito deluju na nezavisne veličine k_L i a [122]. Ovo nije slučaj za JU, jer kod ovog uvodnika homogeni režim nije uočen. Ugrađena membrana nije promenila uticaj rastvora alkohola na k_{LA} .

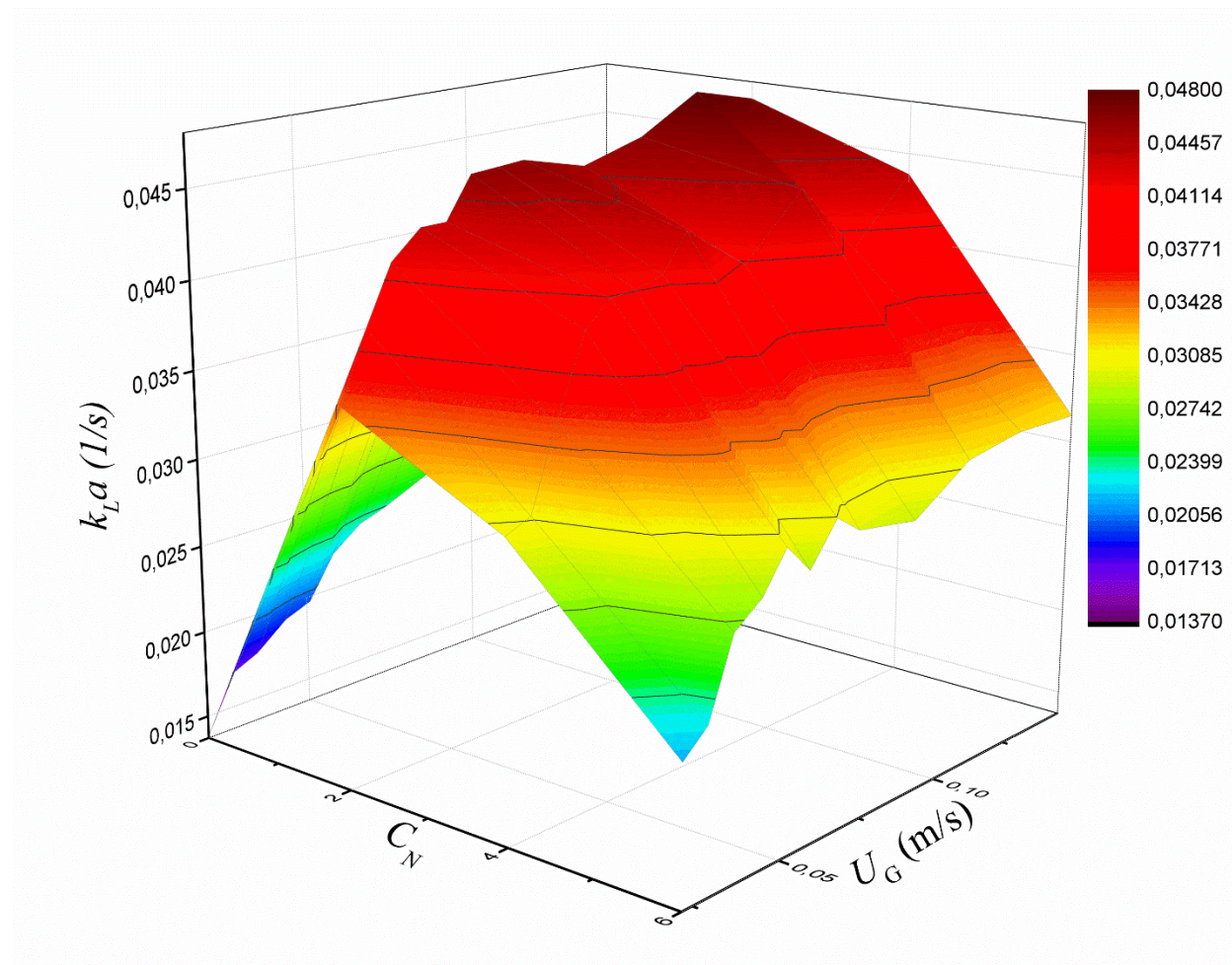
4.5.4. Uticaj distributora gasa na zapreminski koeficijent prenosa mase

Na slikama 4.26 i 4.27, prikazani su rezultati za k_{LA} dobijeni korišćenjem dva tipa distributora gasa: jednostrukog uvodnika i sinter ploče. Očigledno je da je SP efikasniji distributor od JU. Sinter ploča obrazuje manje mehurove gasa i to u većem broju u odnosu na JU, što za posledicu ima manju brzinu isplivavanja i bolju radijalnu raspodelu mehurova a time veći ϵ_{GU} i k_{LA} u poređenju sa JU. Korišćenjem SP k_{LA} je povećan za više od 50% nego kod JU u zavisnosti od rastvora alkohola. Distributor ima uticaja dok dominiraju površinske sile. Kada preovladavaju inercione sile uticaj distributora slabi, tako da se k_{LA} slabije menja sa U_G . Ovo je izraženije kod SP u odnosu na JU. Sinter ploča formira veliki broj malih mehurova, pogotovo kod rastvora alkohola, koji sporo isplivavaju. Kada se ovi mehurovi „istroše“, tj. predaju sav kiseonik, oni onda svojim daljim prisustvom smetaju „svežim“ mehurovima da obave prenos kiseonika u tečnu fazu. Ugrađena membrana nije poništila efikasnost SP.

Pri prividnim brzinama gasa manjim od 0,1 m/s u ALSR sa vodom i SP uticaj distributora bio je vidljiv samo u prvoj trećini uzlazne cevi, koja je bila ispunjena pravilnim sitnim mehurovima gasa (1÷3 mm), dok je iznad tog dela uzlazne cevi nastupala koalescencija mehurova. Dodatkom alkohola koalescencija je bila sprečavana duž cele kolone. Daljim povećavanjem U_G polako su se gubili uticaji distributora i alkohola, počinjala je blaga koalescencija duž cele uzlazne cevi, tako da pri velikim U_G nije bilo razlike u hidrodinamici kolone za iste alkohole.



Slika 4.26. Uticaj tipa alkohola na zapreminski koeficijent prenosa mase u ALSR sa jednostrukim uvođnikom

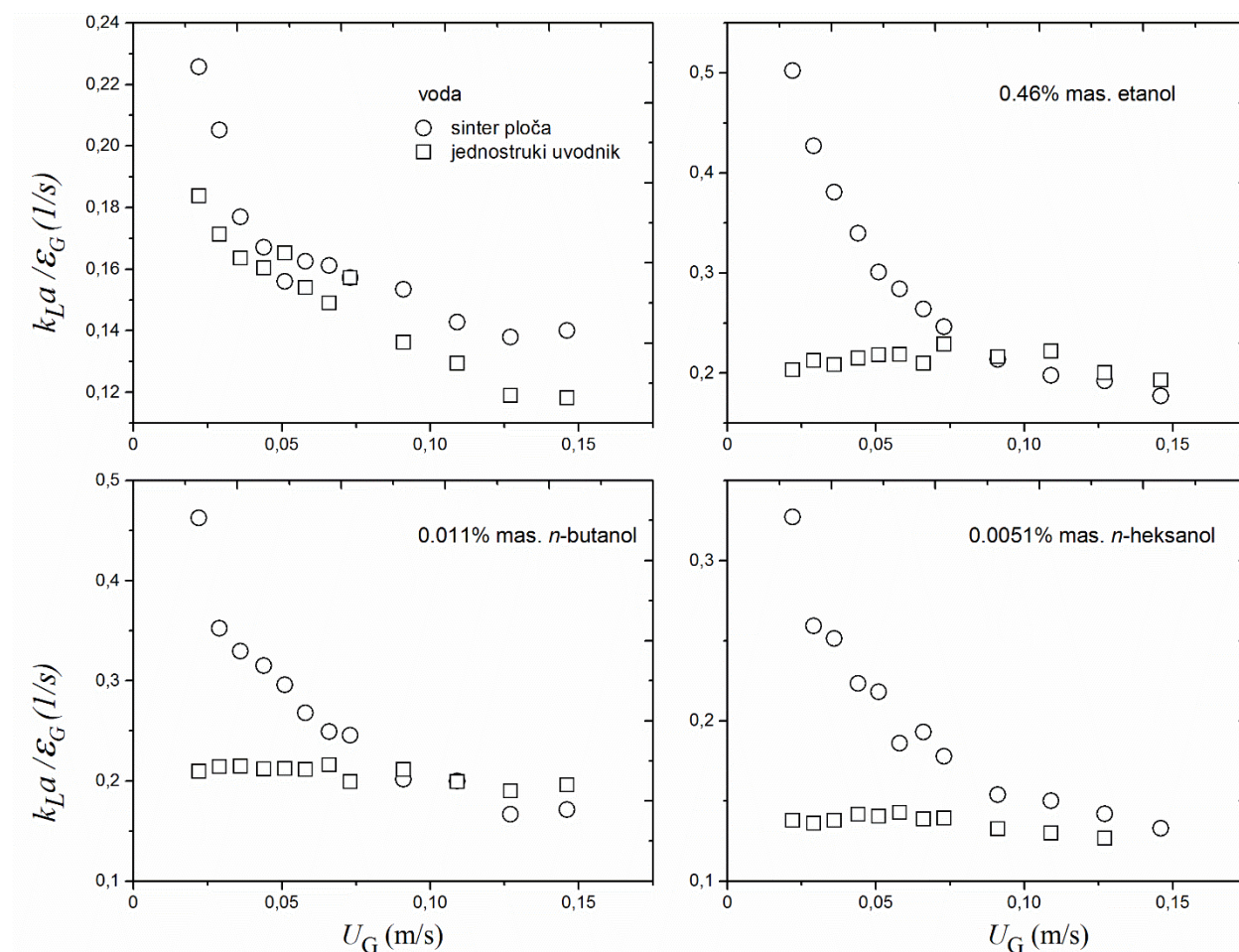


Slika 4.27. Uticaj tipa alkohola na zapreminski koeficijent prenosa mase u ALSR sa sinter pločom

4.5.5. Uticaj hidrodinamike na zapreminski koeficijent prenosa mase

Brzina prenosa mase je usko povezana sa hidrodinamikom, što znači da je trend promene $k_L a$ vrednosti sa U_G sličan promeni ϵ_{GU} sa U_G . Ovaj fenomen se može analizirati pomoću parametra $k_L a / \epsilon_{GU}$, koji predstavlja zapreminski koeficijent prenosa mase po jedinici zapremine gasnih mehurova [129]. Odnos zapreminskog koeficijenta prenosa mase i sadržaja gasa u uzlaznoj cevi u ALSR za sisteme gas-tečno i oba distributora prikazan je na slici 4.27. Imajući na umu da je odnos $k_L a / \epsilon_{GU}$ direktno proporcionalan odnosu $6k_L / d_{32}$, pošto je uz pretpostavku da su mehurovi sferični $a = \frac{6\epsilon_{GU}}{d_{32}}$, može se zaključiti sa slike 4.28 da pri malim vrednostima U_G srednji Sauterov prečnik mehurova gasa (d_{32}) raste mnogo brže nego k_L . Sauterov prečnik predstavlja srednju vrednost prečnika mehurova gasa u disperziji gas-tečnost. To je u stvari prečnik sfere koja ima istu vrednost

odnosa zapremine i površine kao gasni mehurovi. U turbulentnom režimu odnos k_{La}/ϵ_{GU} teži konstantnim vrednostima. Ovo je saglasno sa rezultatima drugih autora [129]. Moguće objašnjenje je da d_{32} nezavisan od U_G u turbulentnom režimu. Učestale koalescencije i cepanje velikih mehurova gasa uzrokuju da d_{32} ostane konstantno mali. Ovaj zaključak je potekao od De Swart i sar. [130], koji su koristili kameru za snimanje mehurova gasa u barbotажnoj koloni, kako bi odredili veličine mehurova gasa. Svi ispitani sistemi gas-tečno su pri korišćenju jednostrukog uvodnika u ALSR i pri najnižim U_G odmah bili u prelaznom režimu, tako da se odnos k_{La}/ϵ_{GU} slabo menjao sa U_G . Sa slike 4.28 se vidi da odnos k_{La}/ϵ_{GU} smanjuje sa U_G za vodu kod JU, verovatno zbog konstantnog povećavanja veličine mehurova gasa usled izražene koalescencije u vodi, tada d_{32} postaje znatno veće u poređenju sa k_L .



Slika 4.28 Zavisnost odnosa zapreminskog koeficijenta prenosa mase i sadržaja gasa od prividne brzine gasa

4.5.6. Zaključci o zapreminskom koeficijentu prenosa mase

Na osnovu dobijenih rezultata i njihove analize mogu se izvesti sledeći zaključci o zapreminskom koeficijentu prenosa mase u airlift reaktoru sa i bez membrane.

- Zapreminski koeficijent prenosa mase raste pri povećanju prividne brzine gasa. U turbulentnom toku kod sinter ploče ovaj porast se izravnava.
- U svim ispitivanim sistemima gas-tečno ugrađena membrana je slabo uticala na k_{La} -razlike su bile manje od 10%.
- Rastvori alkohola povećali su k_{La} u odnosu na vodu. Zapreminski koeficijent prenosa mase bio je najveći u rastvoru etanola.
- Sinter ploča bila je efikasniji distributor gasa od jednostrukog uvodnika za sve sisteme gas-tečno. Korišćenjem sinter ploče k_{La} povećan je za više od 50% u odnosu na k_{La} kod jednostrukog uvodnika u zavisnosti od rastvora alkohola.

5. Korelisanje rezultata

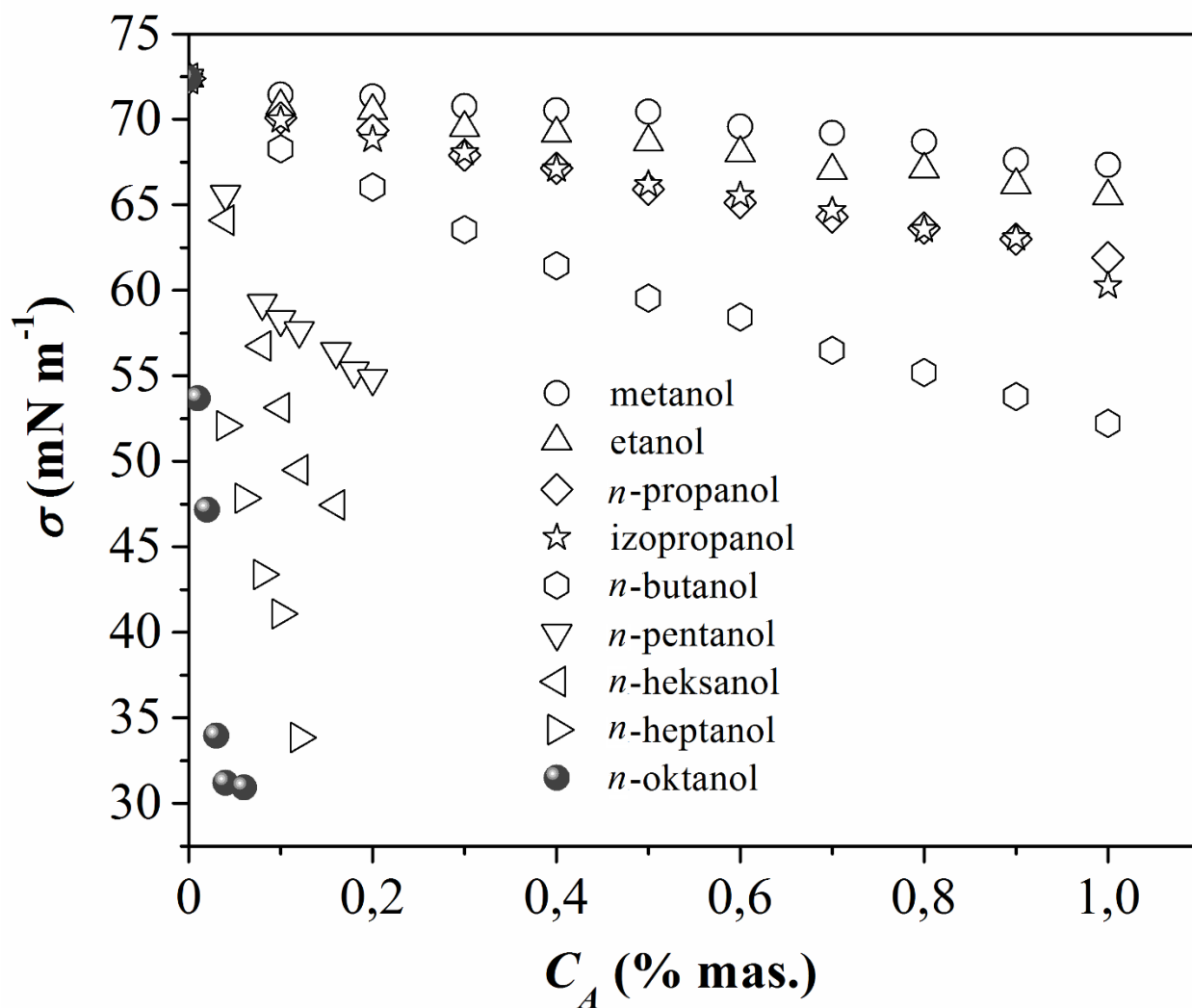
5.1. Empirijske korelacije

Pošto je u airlift reaktorima hidrodinamika veoma komplikovana, njeno modelovanje je složeno čak i u slučaju primene savremenih softvera koji se koriste u hemijskom inženjerstvu. Iz tog razloga istraživači su na osnovu eksperimentalnih podataka predlagali empirijske korelacije koje nažalost važe samo u oblasti njihovih eksperimentalnih podataka. Kada se primene na druge podatke slaganje između eksperimentalnih i izračunatih vrednosti nije zadovoljavajuće. Ali i pored toga one se još uvek koriste usled nedostatka boljeg rešenja. Prvobitne korelacije su se zasnivale samo na U_G pošto osnovne hidrodinamičke osobine (sadržaj gasa i brzina tečnosti) i k_{La} najviše zavise od nje. Dodatni problem je što i hidrodinamičke osobine međusobno utiču jedna na drugu i na k_{La} . Takođe, uticaji se razlikuju za svaki hidrodinamički režim. Pored U_G na ove zavisne hidrodinamičke osobine utiču i mnoge druge nezavisne veličine slika 1.2.

Ako posmatramo grafik zavisnosti ϵ_{GU} , W_{LS} i k_{La} od U_G , uočava se da su u nelinearnoj zavisnosti i da se mogu opisati pomoću stepenih korelacija (power law). Ideja za stepenu korelaciju korišćenu u ovom radu je potekla iz korelacija koje su uzimale u obzir fizičke osobine tečnosti. Izvornu Hughmarkovu-korelaciju [131] Pošarac i Tekić su modifikovali da bi je primenili na svoje eksperimentalne podatke [132]. Ova korelacija se dalje usavršavala kroz istraživačke radove Albijanića i sar. [82] i Šijački i sar. [84]. U ovim radovima većina koeficijenata u korelacijama je računata za svaki režim posebno što je davalo odlične koeficijente determinacije. U ovom radu svi hidrodinamički režimi će biti obuhvaćeni jednom korelacijom a korelacije će predviđati vrednosti za sadržaj gasa, brzinu tečnosti i zapreminski koeficijent prenosa mase.

Na osnovu eksperimentalnih rezultata datih u ovom radu može se zaključiti da su parametri koji utiču na hidrodinamiku u airlift reaktoru: prividna brzina gasa, površinske osobine sistema gas-tečno, karakteristike distributora i ukupni koeficijent trenja (K_f). Uticaj alkohola na ϵ_{GU} , W_{LS} i k_{La} odražava gradijent površinskog napona [82,108]. On raste sa porastom broja C-atoma u pravolinijskom delu lanca dodatog alkohola i zbog toga svaki alkohol formira drugačiju raspodelu i veličinu mehurova. Međutim, kada je potrebno porediti uticaje alkohola različitih koncentracija korišćenih u drugim radovima, mora se voditi računa da gradijent površinskog napona ne zavisi od koncentracije alkohola. U tom slučaju se uticaji alkohola na hidrodinamiku izražavaju pomoću

površinskog napona alkohola. Površinski napon u rastvoru alkohola opada sa povećanjem koncentracije alkohola (slika 5.1).



Slika 5.1. Zavisnost površinskog napona rastvora od koncentracije alkohola [84]

Tip distributora ima uticaj na formiranje mehurova i samim tim na hidrodinamiku. Parametar koji opisuje distributor je prečnik otvora distributora (d_o) koji određuje početnu veličinu mehurova [83]. Otpor proticanju tečnosti nesumnjivo utiče na W_{LS} , samim tim i na ϵ_{GU} , a veličina koja ga definiše je K_f . Stoga je u ovom radu za predviđanje ϵ_{GU} , W_{LS} i k_{La} primenjen sledeći opšti tip korelacije:

$$y_{\text{rač}} = aU_G^b \left(1 + \left(-\frac{d\sigma}{dC_A} \right) \right)^c d_o^d K_f^e \quad (5.1)$$

Za predviđanje ε_{GU} , W_{LS} i k_{LA} korišćene su nezavisne promenljive koje su se nalazile u opsezima prikazanim u tabeli 5.1.

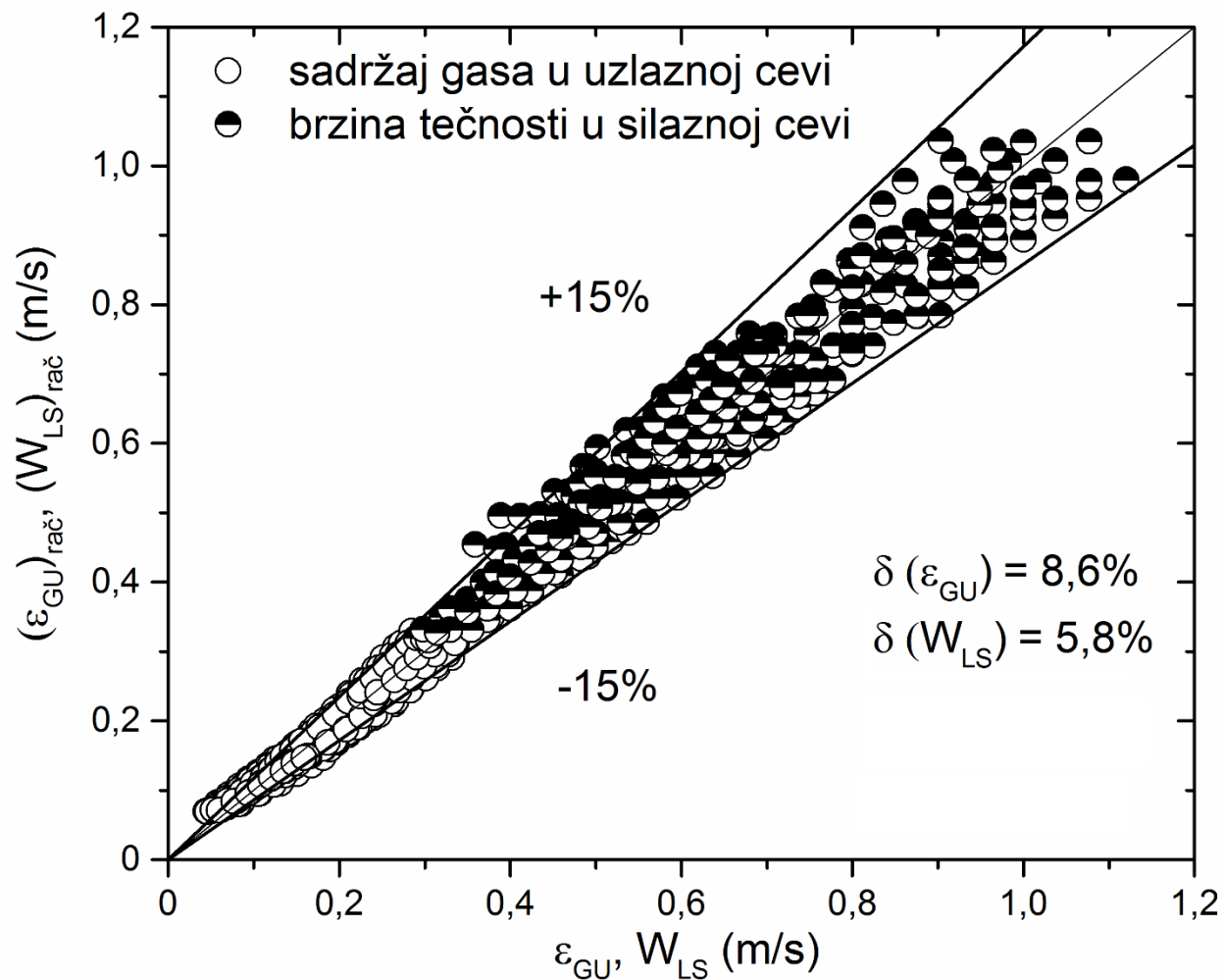
Tabela 5.1. Opseg nezavisnih promenljiva korišćenih u ovom radu

ispitivane promenljive	U_G (m/s)	$-d\sigma/dC_A$ (mNm ² /mol)	d_o (mm)	$K_{f(\text{rač})}$	način rada	tip distributora
ε_{GU} , W_{LS}	0,02-0,22	0,027-1,985	0,115-4	12,2-23,4	A, B	SP, PP, JU
k_{LA}	0,02-0,15	0,027-1,985	0,115-4	12,2-23,4	A	SP, JU

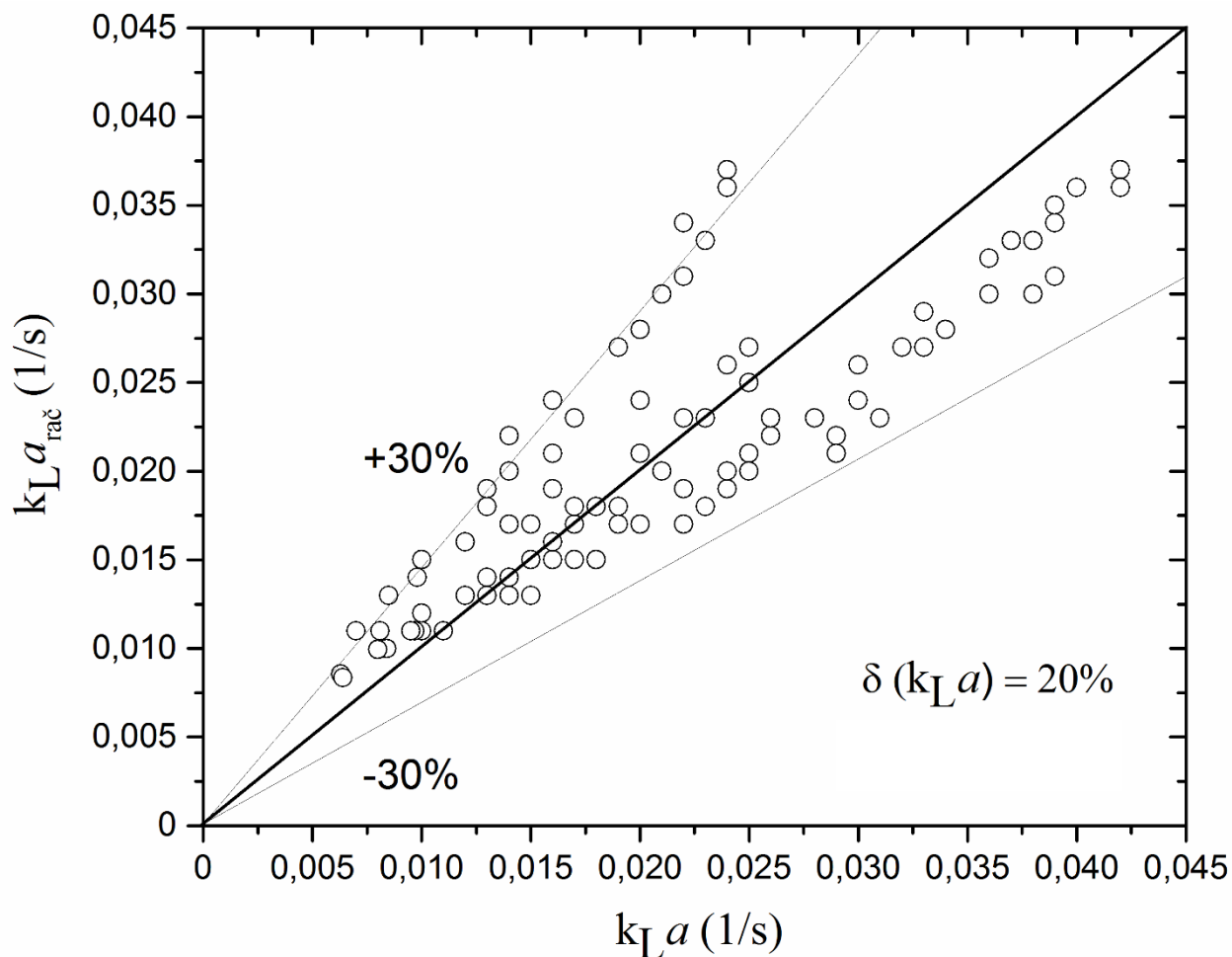
Korelacija je primenjena na po 450 podataka za ε_{GU} i W_{LS} i na 95 podataka za k_{LA} , podaci su prikupljeni u ALSR i ALSRM za oba načina rada. Koeficijenti u ovim korelacijama su određeni pomoću Levenberg-Marquardovog modela u Mathcad-u. Kvalitet korelacija prikazan je u tabeli 5.2. Slika 5.2 pokazuje odlično slaganje eksperimentalnih podataka sa vrednostima dobijenim pomoću korelacije 5.1 za ε_{GU} i W_{LS} . Međutim, korelacija loše predviđa vrednosti za k_{LA} . Razlog je drugačiji izgled krive zavisnosti k_{LA} od U_G (slika 4.25), naročito za SP, u odnosu na krive zavisnosti ε_{GU} i W_{LS} od U_G (slike 4.11 i 4.19), tako da se ovaj tip korelacije ne može koristiti za predviđanje k_{LA} u ovim eksperimentima. Zbog toga su korelisani samo rezultati za jednostruki uvodnik i kvalitet korelacije je prikazan u tabeli 5.2 i na slici 5.3.

Tabela 5.2. Vrednosti koeficijenata jednačine 5.1 i kvalitet fitovanja

$y_{\text{rač}}$ (jed. 5.1)	a	b	c	d	e
ε_{GU}	0,56	0,61	-0,01	-0,02	0,11
W_{LS}	6,33	0,32	-0,01	-0,03	-0,56
k_{LA}	0,13	0,62	-0,27	0,007	-0,04
Kvalitet fitovanja	ε_{GU}	W_{LS}	k_{LA}		
srednja relativna greška (%)	8,6	5,8	20		
koeficijent determinacije (R^2)	0,95	0,93	0,72		
srednja apsolutna greška	0,37	0,95	0,048		
greška razlike najmanjih kvadrata	0,017	0,045	0,005		



Slika 5.2. Poređenje eksperimentalnih i izračunatih vrednosti sadržaja gasa u uzlaznoj cevi i brzine tečnosti u silaznoj cevi primenom korelacije 5.1



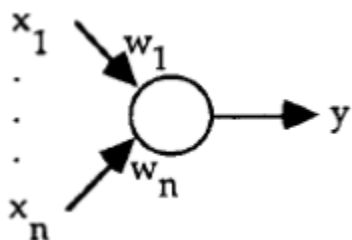
Slika 5.3. Poređenje eksperimentalnih i izračunatih vrednosti zapremnog koeficijenta prenosa mase primenom korelacije 5.1 za jednostruki uvodnik

5.2. Veštačke neuronske mreže

Veštačka neuronska mreža (NM) se sastoji od velikog broja međusobno povezanih, jednostavnih elemenata procesiranja koji rade paralelno. Elementi procesiranja su povezani između sebe pomoću težinskih koeficijenata. Služi da bi predvidela funkciju koja daje izlaze a zavisi od velikog broja ulaza. Veštačke neuronske mreže su po strukturi, funkciji i obradi informacija slične biološkim neuronskim mrežama, tj. nervnom sistemu živih bića [133]. Najvažnija osobina neuronskih mreža (veštačkih i bioloških) je njihova sposobnost da na osnovu iskustva uče na skupu primera.

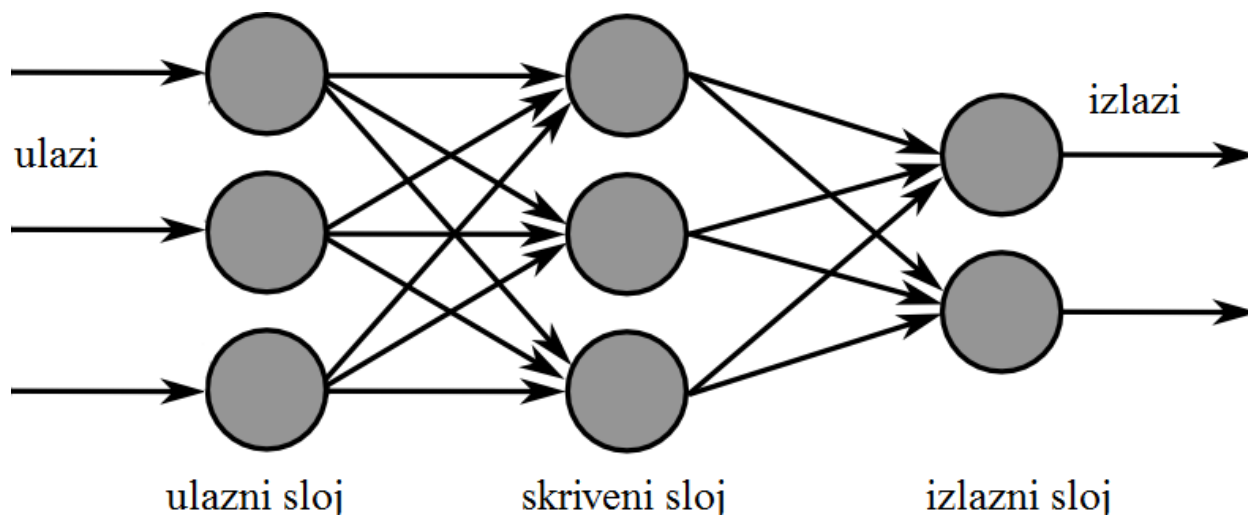
Neuronsku mrežu čine neuroni, slojevi u kojima su ti neuroni raspoređeni, težinski koeficijenti, transferna funkcija i algoritam mreže.

Neuron prima ulaze, procesira ih i proizvodi izlaz. Ulaz u neuron može biti sirov podatak ili izlaz iz nekog drugog neurona. Neuroni procesiraju signale pomoću težinskih koeficijenta (w). Na slici 5.4 ilustrovano je procesiranje informacije u veštačkom neuronu.



Slika 5.4. Veštački neuron

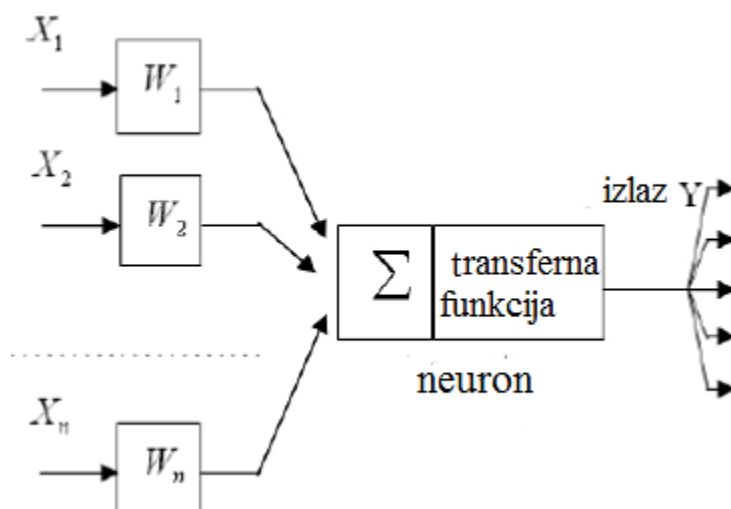
Svaka mreža sastoji se od neurona grupisanih u slojeve. Pored ulaznog i izlaznog sloja, mreža može imati jedan ili više skrivenih slojeva. Na slici 5.5 dat je primer mreže sa jednim skrivenim slojem u slučaju prostiranja signala unapred.



Slika 5.5. Neuronska mreža sa prostiranjem signala unapred

Težinski koeficijenti se označavaju strelicama na slici 5.5, predstavljaju protok signala i množe se vrednostima koje prolaze kroz njih da bi se dobilo više ili manje signala za prenos. Mreža podešava težinske koeficijente tako što stalno uči. Učenje događaja putem primera se ostvaruje preko treninga; tačnih setova podataka ulaza-izlaza koji treniraju algoritam ponavljanjem, podešavajući težinske koeficijente veza [134]. Veze memorišu znanje neophodno za rešavanje specifičnog problema. Kada primeri koji se predstavljaju mreži ne dovode više do promene težinskih koeficijenata, smatra se da je mreža obučena.

Na slici 5.6 prikazan je jedan od paralelnih procesa obrade signala. Neuron sabira sve ulazne vrednosti pomnožene sa odgovarajućim težinskim koeficijentima pa ih zatim propušta kroz transfernu funkciju, najčešće nelinearnu, i ta vrednost predstavlja izlaz iz neurona. Transferna funkcija može biti stepenasta, polu-linearna i sigmoidna (S-oblika) [133]. Transferna funkcija se sastoji od praga propustljivosti (treshold), koji dozvoljavaju prolaz signala ako su uslovi zadovoljeni.



Slika 5.6. Deo veštačke neuronske mreže [135]

Najčešće korišćeni algoritam za obučavanje NM je algoritam povratnog prostiranja (APP) i korišćen je i u ovom radu. On se može podeliti u dva koraka: prvi je proces prostiranja unapred a drugi je proces prostiranja unazad. U procesu prostiranja unapred, ulaz je poznati uzorak podataka i informacija koji se prenosi preko skrivenog sloja u izlazni sloj. U izlaznom sloju APP minimizuje grešku pomoću razlike najmanjih kvadrata između stvarnog izlaza i predviđenog izlaza tako što modifikuje svaki težinski koeficijent prvobitnog puta. Proces se ponavljaju sve dok greška ne zadovolji uslove tačnosti.

Neuronska mreža korišćena u ovom radu je formirana u programskom paketu MATLAB. U cilju predviđanja hidrodinamičkih parametara i zapreminskog koeficijenta prenosa mase korišćen je alat za neuroske mreže u Matlab-u pod nazivom Neural Network Toolbox (NNT). Ovaj alat nudi funkcije i aplikacije za modelovanje složenih nelinearnih sistema koji se ne mogu

jednostavno prikazati u formi jednačine. Uz pomoć ovog alata mogu se formirati, trenirati/učiti, predstaviti i simulirati neuronske mreže.

Eksperimentalni radovi koji se bave primenama NM u višefaznim reaktorima mogu se naći u specijalnom izdanju časopisa *Chemical engineering and processing: process intensification*, volumen 42, broj 8-9. Treba posebno izdvojiti dva rada; prvi rad Shaikh i Al-Dahhan [136] u kojem je razvijena NM za predviđanje sadržaja gasa u barbotажnoj koloni za mnogobrojne operativne i geometrijske parametre. Oni su primenili NM na bazu od oko 3500 podataka uzetih iz dostupne literature. Podatke su grupisali u četiri bezdimenzione grupe koje su činile ulazne parametre za NM. Srednja relativna greška između izračunatih i eksperimentalnih vrednosti za sadržaj gasa bila je oko 15%. Glavni nedostatak ovog rada je taj što su koristili podatke samo za čiste tečnosti. Takođe, oko 45% podataka se odnosilo na sistem gas-voda. Drugi rad, Lemoine i sar. [137], prikazuje arhitekturu NM koja je uspešno korelirala 4435 eksperimentalnih podataka sa ciljem da predvidi zapreminski koeficijent prenosa mase. Ovi autori su dobili koeficijent determinacije (R^2) od 0,91, mreža je uzimala u obzir 50 različitih sistema gas-tečno. Chen i sar. [138] su koristili NM u trofaznoj barbotажnoj koloni za predviđanje k_{La} i k_L . Postigli su koeficijente determinacije od 0,99 odnosno 0,98. Iako odlično predviđaju nepoznate izlazne parametre NM se slabo koriste u airlift reaktorima sa i bez membrane. Do sada se mogu naći samo dva rada vezana za primenu NM za predviđanje ϵ_{GU} i k_{La} u ALSR [139,140].

Pored empirijske korelacije u ovom radu korišćene su i dve različite neuronske mreže. Razlog za korišćenje dve neuronske mreže je taj što broj ulaznih podataka nije isti za obe mreže. Prilikom određivanja k_{La} opseg ispitanih prividnih brzina gasa bio je manji u odnosu na eksperimente vezane za ϵ_{GU} i W_{LS} . Takođe nije korišćen način rada B i perforirana ploča kao distributor gasa. Stoga je prva NM predviđala vrednosti za ϵ_{GU} i W_{LS} , dok je druga predviđala k_{La} . Arhitektura obe NM se sastojala od ulaznog, jednog skrivenog i izlaznog sloja. Ulazni sloj su činili ulazni podaci za U_G , $-d\sigma/dC_A$, d_o i K_f , u opsegu datom u Tabeli 5.1.

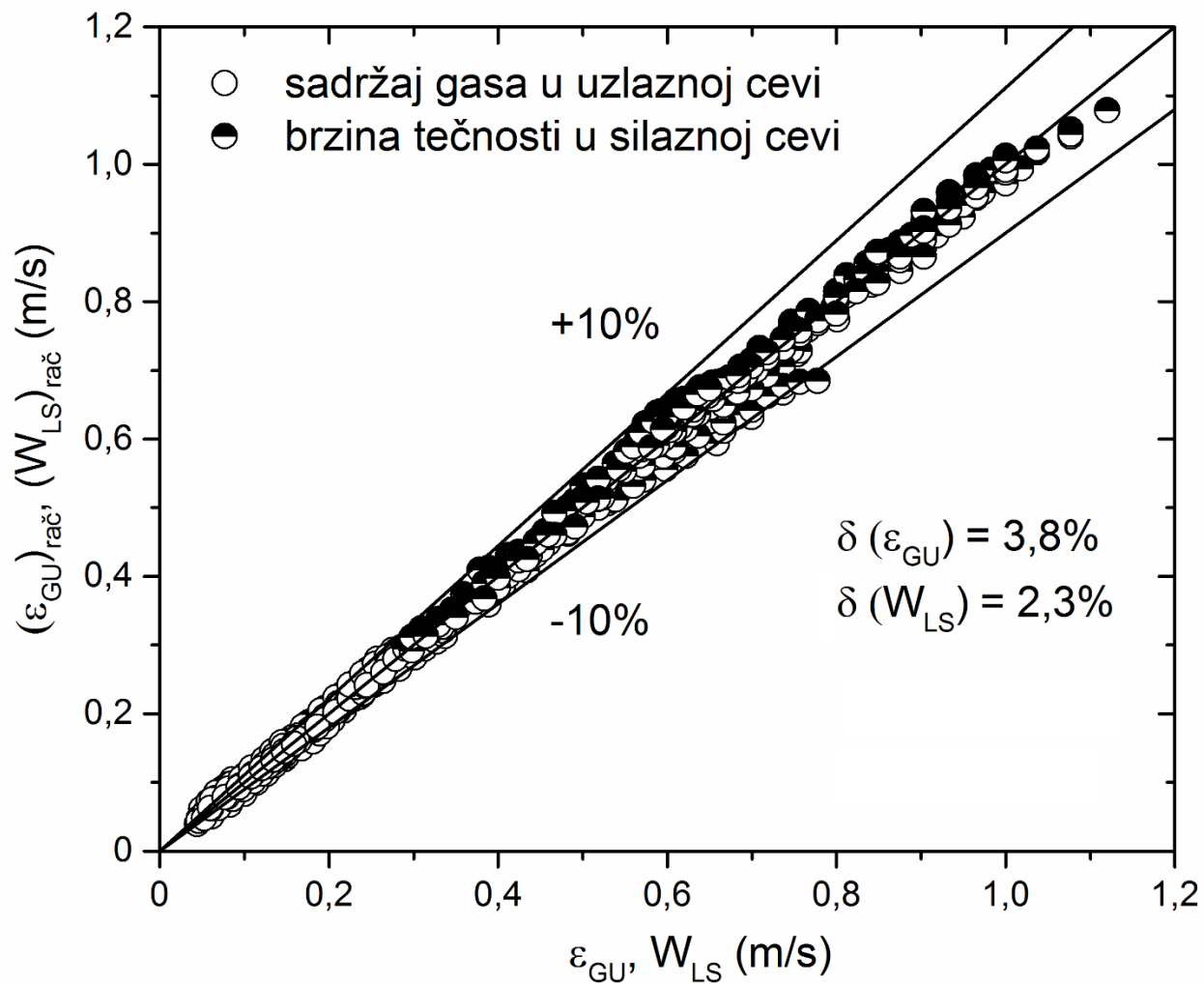
U prvoj NM, skriveni sloj je imao 20 neurona a izlazni 2. Za učenje i razvoj NM korišćeno je po 450 podataka, 70% podataka je iskorišćeno za nadgledano obučavanje NM a 30% je iskorišćeno za testiranje modela i predviđanje nepoznatih. Transferna funkcija bila je S-oblika. Ispravnost modela je prikazana u tabeli 5.3. Tabela 5.3 pokazuje da NM bolje predviđa vrednosti

za ϵ_{GU} i W_{LS} od stepenih korelacija. Slika 5.7 pokazuje odlično slaganje između eksperimentalnih i računskih vrednosti za ϵ_{GU} i W_{LS} .

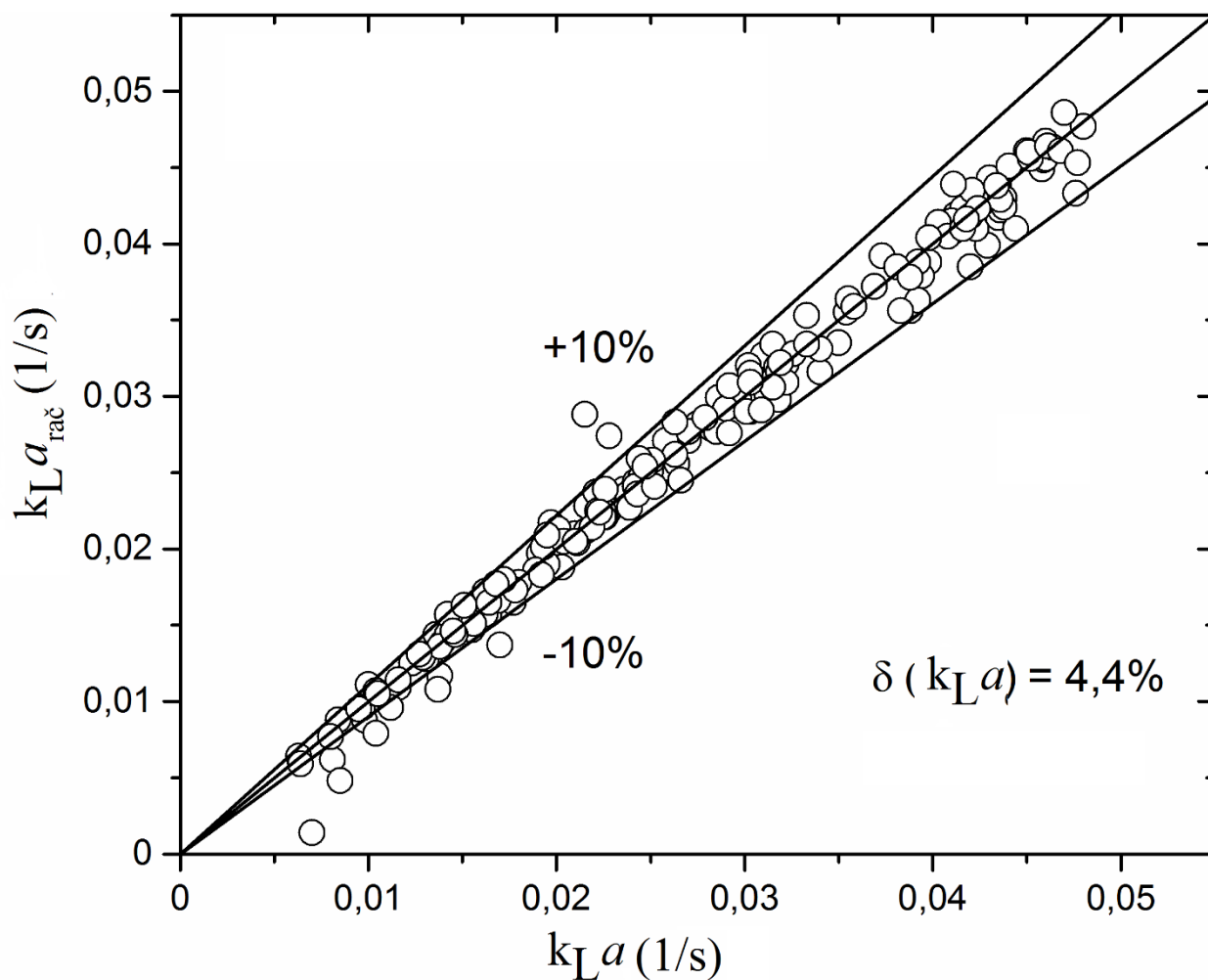
Druga NM je uspela odlično da predvidi vrednosti za k_{LA} . Skriveni sloj je imao 14 neurona a izlazni 1. Za učenje i razvoj NM korišćeno je 191 podataka, 70% podataka je iskorišćeno za nadgledano obučavanje NM a 30% je iskorišćeno za testiranje modela i predviđanje nepoznatih. Transferna funkcija bila je S-oblika. Ispravnost modela prikazana je u tabeli 5.3. Na slici 5.8 prikazano je poređenje eksperimentalnih i izračunatih vrednosti za k_{LA} .

Tabela 5.3. Kvalitet predviđanja sadržaja gasa, brzine tečnosti u silaznoj cevi i zapreminskog koeficijenta prenosa mase primenom veštačkih neuronskih mreža

Kvalitet fitovanja	ϵ_{GU}	W_{LS}	k_{LA}
srednja relativna greška (%)	3,8	2,3	4,4
koeficijent determinacije (R^2)	0,99	0,99	0,99
srednja apsolutna greška	0,167	0,417	0,02
greška razlike najmanjih kvadrata	0,008	0,019	0,001



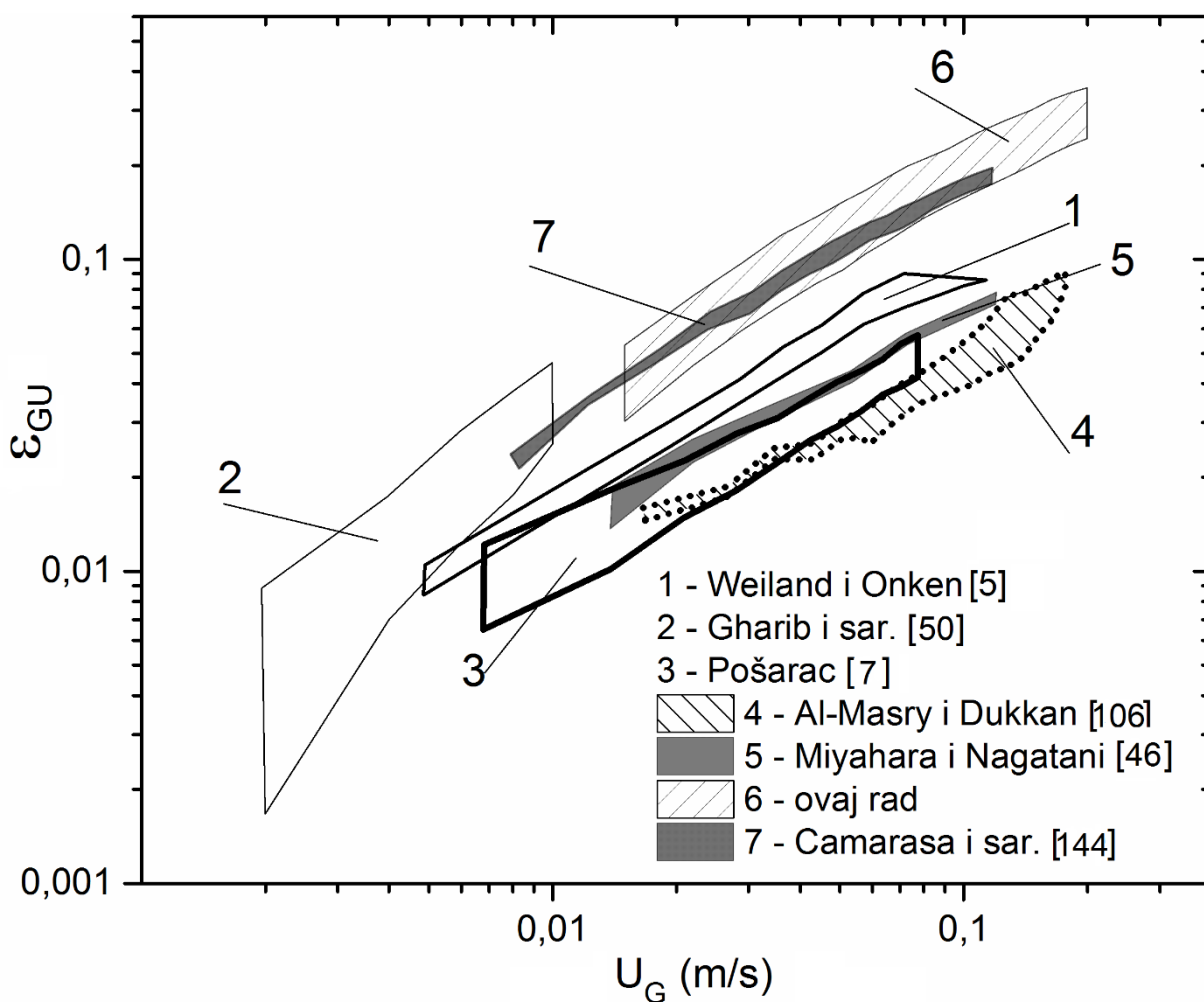
Slika 5.7. Poređenje eksperimentalnih i izračunatih vrednosti sadržaja gasa u uzlaznoj cevi i brzine tečnosti u silaznoj cevi primenom veštačke neuronske mreže



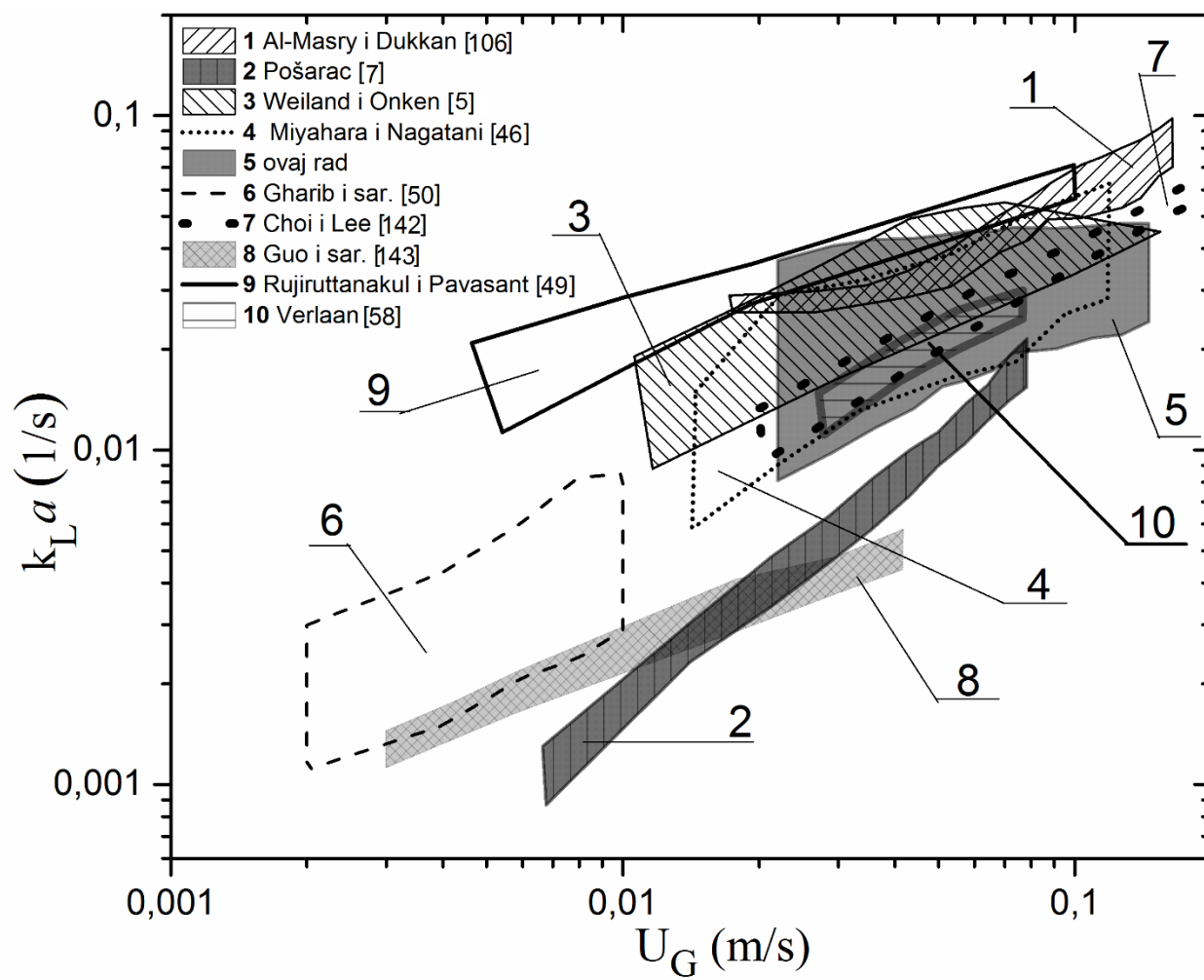
Slika 5.8. Poređenje eksperimentalnih i izračunatih vrednosti zapremnog koeficijenta prenosa mase primenom veštačke neuronske mreže za JU i SP

Odlično predviđanje eksperimentalnih rezultata iz ovog rada bio je podsticaj da NM budu primenjene i na podatke za sadržaj gasa i zapremni koeficijent prenosa mase iz literature. Brzina tečnosti nije fitovana usled malog broja literaturnih podataka za airlift reaktore sa spoljnom petljom. Da bi smo mogli da poredimo uticaj membrane na ϵ_{GU} sa drugim autorima koji su imali drugačije hidrodinamičke otpore u ALSR, trebalo bi da fitovanjem eksperimentalnih podataka odredimo K_f pomoću jednačine (4.3). Dobijene vrednosti za K_f za vodu date su u tabeli 5.4. Pri proračunu K_f može se zanemariti uticaj alkohola i distributara, s obzirom da su relativne razlike za K_f bile manje od 15%. U sledećim dijagramima (slike 5.9 i 5.10) i tabeli 5.5 izdvojeni su rezultati autora koji su ispitivali ϵ_{GU} i k_{LA} u ALSR, kako bi se opsezi merenja obuhvaćeni ovim eksperimentalnim radom uporedili sa rezultatima drugih autora i kako bi se i njihovi podaci

koristili za proveru tačnosti predviđanja NM. Kod pojedinih autora nisu pronađeni svi potrebni ulazni nezavisni podaci za NM tako da su oni izostavljeni.



Slika 5.9. Uporedni pregled literaturnih rezultata za sadržaj gasa u uzlaznoj cevi u airlift reaktoru sa spoljnom recirkulacijom



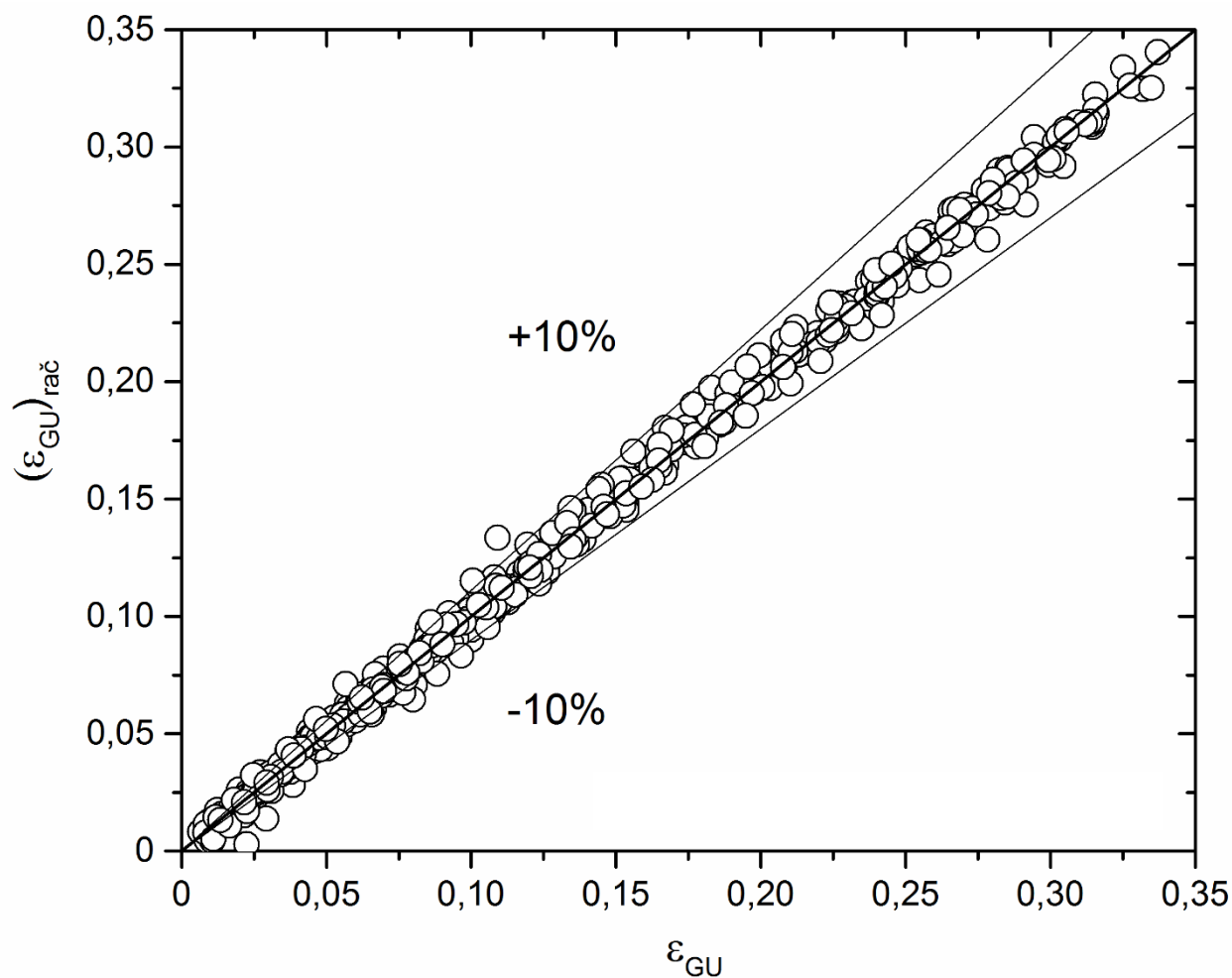
Slika 5.10. Uporedni pregled literaturnih rezultata za zapreminski koeficijent prenosa mase u airlift reaktoru sa spoljnom recirkulacijom

Tabela 5.4. Pregled ukupnog koeficijenta trenja u airlift reaktorima sa spoljnom recirkulacijom

Autori i vrsta otpora	Udeo otvorenosti blende odnosno ventila (%) i tip distributora	Koeficijent trenja (K_f)	Srednji priraštaj (%) ϵ_{GU} u odnosu na potpuno otvorenu silaznu cev	Srednje smanjenje (%) W_{LS} u odnosu na potpuno otvorenu silaznu cev
Verlaan [58] (ventil)	ne navodi podatke jednostruki uvodnik	4,6 8,9 19,3 61,5 409	- 7 22 42 55	- 24 46 68 88
Pošarac [7] (blenda)	100 50 30 5 perforirana ploča	15 19 35 793	- 17 38 117	- 9 26 77
Bendjaballah i sar. [28] (ventil)	100 77 46 23 7 perforirana cev	6,9 7,2 8,22 15,3 43,1	- 2,2 5,5 23 51	- 5,9 10,4 30 55
Vial i sar. [92] (ventil)	100 70 30 perforirana cev	23 25 45	- 2 23	- 12 43
naš rad	ALSR ALSRM jednostruki uvodnik	11,9 22,3	- 16	- 26

Arhitektura NM korišćene za predviđanje ϵ_{GU} sastojala se iz tri sloja: ulaznog od 4 neurona, skrivenog od 20 neurona i izlaznog sloja od jednog neurona. Transferna funkcija bila je S-oblika. Fitovano je 658 podataka sledećih autora [5,7,46,106]. Opsezi nezavisno promenljivih koje su činile ulaze NM su: $0,005 < U_G < 0,22$ m/s, $50 < \sigma < 74,2$ mN/m, $0,115 < d_0 < 4$ mm, $3,9 < K_f < 76,9$. Kako ne postoji teorijski metod da bi se pronašla optimalna arhitektura NM, primenjena je metoda probe i greške [141]. Broj neurona u skrivenom sloju je variran dok nije dobijeno najmanje srednje

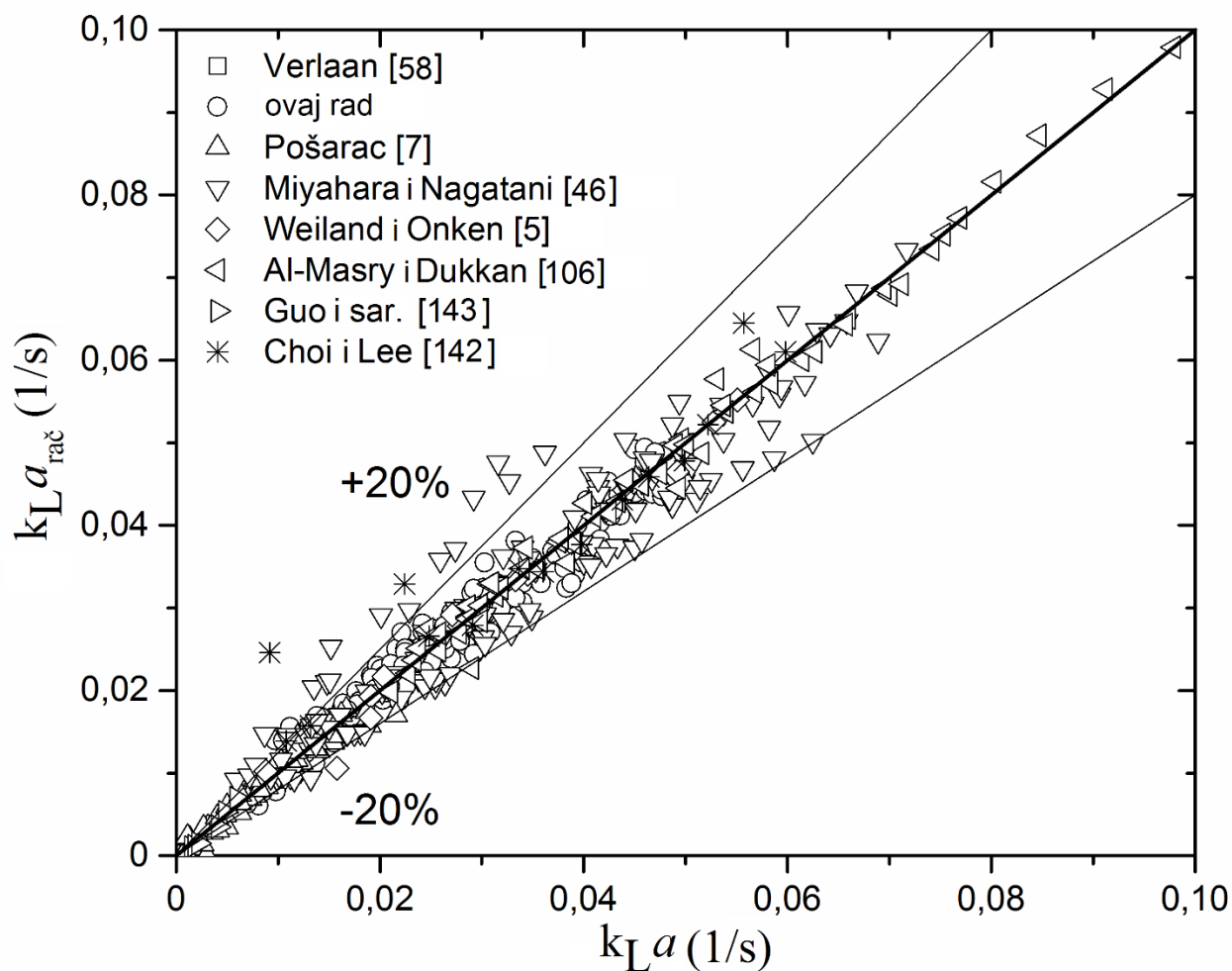
kvadratno odstupanje među obučanim podacima. Tačnost modela je proverena na novim podacima koji nisu korišćeni za obučavanje NM. Ako ε_{GU} predviđanja nisu bila dobra, model je odbijen i isproban je drugi. Ulazne veličine su proizvoljno podeljene u tri seta podataka: 70% je korišćeno za obučavanje NM, 15% je korišćeno za validaciju NM i sprečavanje ekstrapolacije i 15% je korišćeno za proveru tačnosti. Neuronska mreža je ostvarila koeficijent determinacije od 0,99 i srednje kvadratno odstupanje od 0,21. Eksperimentalne i izračunate vrednosti su prikazane na grafiku 5.11. Predložena NM odlično predviđa ε_{GU} sa srednjom relativnom greškom od 10,6%.



Slika 5.11. Poređenje eksperimentalnih i izračunatih vrednosti sadržaja gasa u uzlaznoj cevi iz ovog rada i literature primenom veštačke neuronske mreže

Arhitektura NM korišćene za predviđanje k_{LA} se sastojala iz tri sloja: ulaznog od 4 neurona, skrivenog od 13 neurona i izlaznog sloja od jednog neurona. Transferna funkcija bila je S-oblika. Fitovano je 479 podataka sledećih autora [5,7,46,58,106,142,143]. Opsezi nezavisno promenljivih

koje su činile ulaze NM su: $0,003 < U_G < 0,18$ m/s, $55 < \sigma < 74,2$ mN/m, $0,115 < d_o < 6$ mm, $3,94 < K_f < 76,9$. Neuronska mreža je ostvarila koeficijent determinacije od 0,97 i srednje kvadratno odstupanje od 0,21. Eksperimentalne i izračunate vrednosti su prikazane na slici 5.12. Predložena NM odlično predviđa $k_L a$ sa srednjom relativnom greškom od 10,6%.



Slika 5.12. Poređenje eksperimentalnih i izračunatih vrednosti zapreminskog koeficijenta prenosa mase iz ovog rada i literature primenom veštačke neuronske mreže

Tabela 5.5. Pregled dosadašnjih istraživanja autora koji su ispitivali ε_{GU} i k_{LA} u ALSR

Ref.	D_u, D_s, H , sve u mm, K_f	Tip distributora i karakteristike	Tečna faza	Ispitani parametri
ovaj rad	$D_u = 54$ $D_s = 25$ $H = 2000$ $K_f = 11,9; 22,3$	jednostruki uvodnik, $d_o = 4$ mm; perforirana ploča, $d_o = 1$ mm; sinter ploča, $d_o = (100-160)$ μm	0,1, 0,46, 1, 5% mas. etanol; 0,011% mas. <i>n</i> -butanol; 0,0051% mas. <i>n</i> -heksanol	ε_G
Gharib i sar. [50]	$D_u = 100$ $D_s = 70$ $H = 1700$	distributor sa keramičkom lopticom	0,25, 0,5, 0,75, 1% mas. metanol; 0,25, 0,5, 0,75, 1% mas. etanol; 0,25, 0,5, 0,75, 1% mas. <i>n</i> -propanol 0,25, 0,5, 0,75, 1% mas. <i>n</i> -butanol	ε_G, k_{LA}
Camarasa i sar. [144]	$D_u = 230$ $D_s = 150$ $H = 3500$	jednostruki uvodnik, $d_o = 10$ mm, perforirana ploča, 12 otvora $d_o = 2$ mm i 72 otvora $d_o = 2$ mm	0,081% mas. <i>n</i> -butanol	$\varepsilon_G, W_L, d_{32}$
Miyahara i Nagatani [46]	$D_u = 140$ $D_s = 140$ $H = 2670$ $K_f = 3,94$	sinter ploča, $d_o = 300$ μm	0,01, 0,05, 0,02, 0,5, 1% mas. metanol; 0,01, 0,05, 0,02, 0,5, 1% mas. etanol; 0,002, 0,005, 0,01, 0,05, 0,1, 0,5% mas. <i>n</i> -propanol	$\varepsilon_G, W_L, d_{32}, k_{LAu}$
Al-Masry i Dukkan [106]	$D_u = 225$ $D_s = 225$ $H = 6500$ $K_f = 4,55$	perforirana ploča, $d_o = 1$ mm	30-100 ppm polipropilen glikol; 30-100 ppm oktanol	$\varepsilon_G, W_L, k_{LA}$
Pošarac [7]	$D_u = 100$ $D_s = 100$ $H = 2800$ $K_f = 15$	jednostruki uvodnik, $d_o = 4$ mm; perforirana ploča, $d_o = 2$ mm	0,5, 1, 2, 5% mas. metanol; 0,5% mas. etanol; 0,5% mas. <i>n</i> -propanol; 0,5% mas. <i>n</i> -butanol	$\varepsilon_G, W_L, k_{LA}$
Weiland i Onken [5]	$D_u = 100$ $D_s = 50$ $H = 8500$	sinter ploča, $d_o = 150$ μm	4,9% mas. 2-propanol	$\varepsilon_G, W_L, k_{LA}, D,$ t_m, t_c

	$K_f = 76,9$			
Choi i Lee [142]	$D_u = 158$ $D_s = 108, 79, 49$ $H = 1770$ $K_f = 58,7; 29,1; 15,37$	perforirana ploča 30 otvora, $d_o = 1 \text{ mm}$	voda	$\varepsilon_G, W_L, k_{LA}$
Guo i sar. [143]	$D_u = 60$ $D_s = 60$ $H = 1753, 1263$ $K_f = 47,1$	jednostruki uvodnik, $d_o = 2,2 \text{ mm}$	voda, staklene kuglice, leksan, ps	$\varepsilon_G, W_L, k_{LA}, t_m$
Rujiruttanakul i Pavasant [49]	$D_u = 104$ $D_s = 54$ $H = 2000$	sinter ploča	voda	$\varepsilon_G, W_L, k_{LA}$
Verlaan [58]	$D_u = 200$ $D_s = 100$ $H = 3230$ $K_f = 15; 29$	jednostruki uvodnik $d_o = 6 \text{ mm}$	voda	$\varepsilon_G, W_L, k_{LA}, D, t_m, t_c$

6. Zaključci

U okviru ove doktorske disertacije izvedena su eksperimentalna istraživanja osnovnih hidrodinamičkih i maseno-prenosnih karakteristika airlift reaktora sa spoljnom recirkulacijom (ALSR) i istog reaktora sa ugrađenom višekanalnom cevnom membranom u silaznu cev (ALSRM) koji je radio na dva načina: bez mehurova u silaznoj cevi (način rada A), odnosno sa mehurovima u silaznoj cevi (način rada B). Ispitivani su uticaji prividne brzine gasa, osobina tečne faze, tipa distributora, otpora membrane i prisustva mehurova gasa u silaznoj cevi na sadržaj gasa, brzinu tečnosti u silaznoj cevi i zapreminski koeficijent prenosa mase u tečnoj fazi.

Na osnovu dobijenih rezultata i njihove analize mogu se izvesti sledeći opšti zaključci:

- Sa porastom prividne brzine gasa, sadržaj gasa, brzina tečnosti u silaznoj cevi i zapreminski koeficijent prenosa mase se povećavaju.
- Dodatkom alifatičnih alkohola u vodu sadržaj gasa, brzina tečnosti u silaznoj cevi i zapreminski koeficijent prenosa mase su se povećali u odnosu na vodu.
- Sinter ploča i perforirana ploča bili su efikasniji distributori nego jednostruki uvodnik.
- Višekanalna cevna membrana u silaznoj cevi uzrokovala je povećanje ukupnog koeficijenta trenja za 90% i time dovela do smanjenja brzine tečnosti u silaznoj cevi do 50%. Smanjena brzina tečnosti u silaznoj cevi povećala je sadržaj gasa do 16%.
- Prisustvo mehurova gasa u silaznoj cevi smanjilo je brzinu tečnosti u njoj do 15%, dok je sadržaj gasa bio do 3%.
- Eksperimentalni podaci za sadržaja gasa, brzinu tečnosti u silaznoj cevi i zapreminski koeficijent prenosa mase uspešno su korelisani empirijskim korelacijama i veštačkom neuronskom mrežom. Veštačka neuronska mreža se pokazala kao superiornija metoda u predviđanju eksperimentalnih vrednosti.

Spisak oznaka

- a – specifična međufazna površina, m^2/m^3
 A – površina poprečnog preseka kolone, m^2
 C – koncentracija, mol/m^3
 C_N – broj ugljenikovih atoma u molekulu alifatičnih alkohola
 d_o – prečnik otvora distributora, m
 d_{32} – Sauterov srednji prečnik mehura gasa, m
 D – prečnik, m
 g – gravitaciono ubrzanje, m^2/s
 H – visina, m
 k_L – koeficijent prenosa mase sa strane tečnosti, $1/\text{s}$
 K_f – ukupni koeficijent trenja
 L – dužina, m
 P – pritisak, Pa
 Q – protok, m^3/s
 R^2 – koeficijent determinacije
 t – vreme, s
 T – temperatura, K
 U – prividna brzina, m/s
 V – zapremina, m^3
 W – stvarna brzina, m/s

Grčka slova:

- δ – relativna greška, %
 Δ – razlika
 ε_G – sadržaj gasa
 λ – koeficijent podužnog trenja

- ρ – gustina, kg/m³
 σ – površinski napon, N/m

Indeksi:

- c* – cirkulacija
G – gas
h – visina disperzije
L – tečnost
m – mešanje
M – membrana
S – silazna cev
U – uzlazna cev
* – ravnotežno stanje

Skraćenice:

- JU* – jednostruki uvodnik
PP – perforirana ploča
SP – sinter ploča
MBR– membranski bioreaktor
ALSR – airlift reaktor sa spoljnom recirkulacijom tečnosti
ALUR – airlift reaktor sa unutrašnjom recirkulacijom tečnosti
ALSRM – airlift reaktor sa spoljnom recirkulacijom tečnosti sa ugrađenom membranom
ALURM – airlift reaktor sa unutrašnjom recirkulacijom tečnosti sa ugrađenom membranom

Literatura

- [1] A. Gianetto, B. Ruggeri, V. Specchia, G. Sassi, R. Forna, *Chem. Eng. Sci.* **1988**, 43 (8), 1891-1896.
- [2] Y.-J. Yuan, Z.-J. Wei, Z.-L. Wu, J.-C. Wu, *Biotechnol. Lett* **2001**, 23 (20), 1659-1662.
- [3] Y. Sun, Y. L. Li, S. Bai, Z. D. Hu, *Ind. Eng. Chem. Res.* **1999**, 38 (9), 3290-3295.
- [4] R. Liu, X. Huang, C. Wang, L. Chen, Y. Qian, *Process Biochem.* **2000**, 36 (3), 249-254.
- [5] P. Weiland, U. Onken, *Ger.Chem.Eng.* **1981**, 4, 42-50.
- [6] C. Bentifraouine, C. Xuereb, J.-P. Riba, *J. Chem. Technol. Biotechnol.* **1997**, 69 (3), 345-349.
- [7] D. Pošarac, *PhD Thesis*, University of Novi Sad, Novi Sad, Serbia **1988**.
- [8] C. Bentifraouine, C. Xuereb, J.-P. Riba, *Chem. Eng. J.* **1997**, 66 (2), 91-95.
- [9] M. Y. Chisti, *Airlift bioreactors*, Elsevier Applied Science, London **1988**.
- [10] J. C. Merchuk, Y. Stein, *AIChE J.* **1981**, 27 (3), 377-388.
- [11] R. A. Bello, C. W. Robinson, M. Moo-Young, *Chem. Eng. Sci.* **1985**, 40 (1), 53-58.
- [12] M. Popovic, C. W. Robinson, *Chem. Eng. Sci.* **1987**, 42 (12), 2811-2824.
- [13] D. Pošarac, D. Petrović, *Chem. Eng. Sci.* **1988**, 43 (5), 1161-1165.
- [14] M. K. Popovic, C. W. Robinson, *AIChE J.* **1989**, 35 (3), 393-405.
- [15] P. Verlaan, A. M. M. Van Eijs, J. Tramper, K. V. t. Riet, K. C. A. M. Luyben, *Chem. Eng. Sci.* **1989**, 44 (5), 1139-1146.
- [16] P. Verlaan, J.-C. Vos, K. Van T Riet, *J. Chem. Technol. Biotechnol.* **1989**, 45 (2), 109-121.
- [17] Y. Chisti, M. Kasper, M. Moo-Young, *Can. J. Chem. Eng.* **1990**, 68 (1), 45-50.
- [18] M. A. Young, R. G. Carbonell, D. F. Ollis, *AIChE J.* **1991**, 37 (3), 403-428.
- [19] S. Goto, P. D. Gaspillo, *Chem. Eng. Sci.* **1992**, 47 (13-14), 3533-3539.
- [20] R. D. Fraser, G. A. Hill, *Can. J. Chem. Eng.* **1993**, 71 (3), 419-425.
- [21] J. B. Snape, J. Zahradník, M. Fialová, N. H. Thomas, *Chem. Eng. Sci.* **1995**, 50 (20), 3175-3186.
- [22] Y. Kawase, N. Hashiguchi, *Chem. Eng. J. Bioch. Eng.* **1996**, 62 (1), 35-42.
- [23] F. Benyahia, L. Jones, *J. Chem. Technol. Biotechnol.* **1997**, 69 (3), 301-308.
- [24] H. Dhaouadi, S. Poncin, J. M. Hornut, G. Wild, P. Oinas, J. Korpijarvi, *Chem. Eng. Sci.* **1997**, 52 (21-22), 3909-3917.
- [25] M. Gavrilesu, R. Z. Tudose, *Chem. Eng. J.* **1997**, 66 (2), 97-104.
- [26] W. A. Al-Masry, A. E. Abasaheed, *Chem. Eng. Sci.* **1998**, 53 (24), 4085-4094.
- [27] C. Bentifraouine, C. Xuereb, J. P. Riba, *Bioprocess Biosyst. Eng.* **1999**, 20 (4), 303-307.
- [28] N. Bendjaballah, H. Dhaouadi, S. Poncin, N. Midoux, J. M. Hornut, G. Wild, *Chem. Eng. Sci.* **1999**, 54 (21), 5211-5221.
- [29] C. Freitas, M. Fialová, J. Zahradnik, J. A. Teixeira, *Chem. Eng. Sci.* **1999**, 54 (21), 5253-5258.
- [30] J. Korpijarvi, P. Oinas, J. Reunanen, *Chem. Eng. Sci.* **1999**, 54 (13-14), 2255-2262.
- [31] M. Utiger, C. Guy, F. Stuber, A.-M. Duquenne, H. Delmas, *Can. J. Chem. Eng.* **1999**, 77 (2), 375-382.
- [32] W. A. Al-Masry, *Biotechnol. Bioeng.* **1999**, 62 (4), 494-498.
- [33] C. Vial, E. Camarasa, S. Poncin, G. Wild, N. Midoux, J. Bouillard, *Chem. Eng. Sci.* **2000**, 55 (15), 2957-2973.
- [34] K. Shimizu, S. Takada, T. Takahashi, Y. Kawase, *Chem. Eng. J.* **2001**, 84 (3), 599-603.
- [35] K. H. Choi, *Chem. Eng. Commun.* **2002**, 189 (1), 23-39.
- [36] A. X. Meng, G. A. Hill, A. K. Dalai, *Ind. Eng. Chem. Res.* **2002**, 41 (9), 2124-2128.
- [37] J. Lin, M. Han, T. Wang, T. Zhang, J. Wang, Y. Jin, *Ind. Eng. Chem. Res.* **2003**, 43 (18), 5432-5437.
- [38] S. Wang, Y. Arimatsu, K. Koumatsu, K. Furumoto, M. Yoshimoto, K. Fukunaga, K. Nakao, *Chem. Eng. Sci.* **2003**, 58 (15), 3353-3360.
- [39] H. Nikakhtari, G. A. Hill, *Ind. Eng. Chem. Res.* **2005**, 44 (4), 1067-1072.

- [40] T. Zhang, T. Wang, J. Wang, *Chem. Eng. Process.* **2005**, *44* (11), 1221-1227.
- [41] T. Zhang, J. Wang, T. Wang, J. Lin, Y. Jin, *Chem. Eng. Process.* **2005**, *44* (1), 81-87.
- [42] K. Mohanty, D. Das, M. N. Biswas, *Chem. Eng. Sci.* **2006**, *61* (14), 4617-4624.
- [43] S. Sarkar, K. Mohanty, B. C. Meikap, *Chem. Eng. J.* **2008**, *145* (1), 69-77.
- [44] M. Liu, T. Zhang, T. Wang, W. Yu, J. Wang, *Chem. Eng. J.* **2008**, *139* (3), 523-531.
- [45] F. Yazdian, S. A. Shojaosadati, M. Nosrati, M. Pesaran Hajiabbas, E. Vasheghani-Farahani, *Chem. Eng. Sci.* **2009**, *64* (10), 2455-2465.
- [46] T. Miyahara, N. Nagatani, *J. Chem. Eng. Jpn.* **2009**, *42* (10), 713-719.
- [47] S. T. Jones, T. J. Heindel, *Ind. Eng. Chem. Res.* **2010**, *49* (4), 1931-1936.
- [48] A. H. Essadki, B. Gourich, C. Vial, H. Delmas, *Chem. Eng. Sci.* **2011**, *66* (14), 3125-3132.
- [49] Y. Rujiruttanakul, P. Pavasant, *Chem. Eng. Res. Des.* **2011**, *89*, 2254-2261.
- [50] J. Gharib, M. Keshavarz Moraveji, R. Davarnejad, M. E. Malool, *Chem. Eng. Res. Des.* **2013**, *91* (5), 925-932.
- [51] P. S. Kojić, M. S. Tokić, I. M. Šijački, N. L. Lukić, D. L. Petrović, D. Z. Jovičević, S. S. Popović, *Chem. Eng. Technol.* **2015**, *38* (4), 701-708.
- [52] S. Judd, *The MBR Book*, Elsevier, Amsterdam **2011**.
- [53] K. Yamamoto, M. Hiasa, T. Mahmood, T. Matsuo, *Water Sci. Technol.* **1989**, *21* (4-5 -5 pt 1), 43-54.
- [54] A. Benedek, P. Côté, *International Desalination Association* **2003**, BAH03-180.
- [55] T. Imasaka, N. Kanekuni, H. So, S. Yoshino, *J. Ferment. Bioeng.* **1989**, *68* (3), 200-206.
- [56] R. R. Singhanian, G. Christophe, G. Perchet, J. Troquet, C. Larroche, *Bioresour. Technol.* **2012**, *122* (0), 171-180.
- [57] M. Milivojević, *PhD Thesis*, University of Belgrade, Belgrade, Serbia **2011**.
- [58] P. Verlaan, *PhD Thesis*, Wageningen University, Wageningen, Netherlands **1987**.
- [59] M. Moo-Young, *Bioreactor Immobilized Enzymes and Cells*, Springer Netherlands, **1998**. Vol. 1.
- [60] K. Kiss, N. Nemestóthy, L. Gubicza, K. Bélafi-Bakó, *Desalination* **2009**, *241* (1-3), 29-33.
- [61] P. R. Bérubé, E. Lei, *J. Membr. Sci.* **2006**, *271* (1-2), 29-37.
- [62] Y. Z. Li, Y. L. He, D. G. Ohandja, J. Ji, J. F. Li, T. Zhou, *Bioresour. Technol.* **2008**, *99* (13), 5867-5872.
- [63] Z. Xu, J. Yu, *Chem. Eng. Sci.* **2008**, *63* (7), 1941-1949.
- [64] A. Khalili-Garakani, M. R. Mehrnia, N. Mostoufi, M. H. Sarrafzadeh, *Process Biochem.* **2011**, *46* (5), 1138-1145.
- [65] M. K. Moraveji, B. Sajjadi, R. Davarnejad, *Theor. Found. Chem. Eng.* **2012**, *46* (3), 266-273.
- [66] H. Prieske, A. Drews, M. Kraume, *Desalination* **2008**, *231* (1-3), 219-226.
- [67] M. Mihač, S. Gavin, J. Markoš, *Chemical Papers* **2013**, *67* (12), 1485-1494.
- [68] Y. Fan, G. Li, L. Wu, W. Yang, C. Dong, H. Xu, W. Fan, *Process Biochem.* **2006**, *41* (6), 1364-1370.
- [69] F. P. Shariati, M. R. Mehrnia, B. M. Salmasi, M. Heran, C. Wisniewski, M. H. Sarrafzadeh, *Desalination* **2010**, *250* (2), 798-800.
- [70] P. Svetlana, *PhD Thesis*, University of Novi Sad, Novi Sad, Serbia **2011**.
- [71] A. Drews, *J. Membr. Sci.* **2010**, *363* (1-2), 1-28.
- [72] L. Böhm, A. Drews, H. Prieske, P. R. Bérubé, M. Kraume, *Bioresour. Technol.* **2012**, *122* (0), 50-61.
- [73] J. K. Shim, I.-K. Yoo, Y. M. Lee, *Process Biochem.* **2002**, *38* (2), 279-285.
- [74] B. Jajuee, A. Margaritis, D. Karamanev, M. A. Bergougnou, *Chem. Eng. J.* **2006**, *125* (2), 119-126.
- [75] H. Futselaar, H. Schonewille, D. de Vente, L. Broens, *Desalination* **2007**, *204* (1-3), 1-7.
- [76] M. Qingjuan, Y. Fenglin, L. Lifen, M. Fangang, *Journal of Environmental Sciences* **2008**, *20* (8), 933-939.
- [77] F. Zhang, W. Jing, W. Xing, N. Xu, *Chem. Eng. Sci.* **2009**, *64* (12), 2859-2865.
- [78] F. Zhang, W. Jing, W. Xing, *Ind. Eng. Chem. Res.* **2009**, *48* (23), 10637-10642.
- [79] F. Yang, A. Bick, S. Shandalov, A. Brenner, G. Oron, *J. Membr. Sci.* **2009**, *334* (1-2), 83-90.

- [80] M. Moraveji, B. Sajjadi, R. Davarnejad, *Theor. Found. Chem. Eng.* **2012**, *46* (3), 266-273.
- [81] X. Yan, K. Xiao, S. Liang, T. Lei, P. Liang, T. Xue, K. Yu, J. Guan, X. Huang, *Bioresour. Technol.* **2015**, *175*, 633-637.
- [82] B. Albijanić, V. Havran, D. L. Petrović, M. Đurić, M. N. Tekić, *AIChE J.* **2007**, *53* (11), 2897-2904.
- [83] I. M. Šijački, M. S. Tokić, P. S. Kojić, D. L. Petrović, M. N. Tekić, M. S. Djurić, S. S. Milovančev, *Ind. Eng. Chem. Res.* **2011**, *50* (6), 3580-3591.
- [84] I. M. Šijački, R. R. Čolović, D. L. Petrović, M. N. Tekić, M. S. Đurić, *J. Chem. Technol. Biotechnol.* **2010**, *85* (1), 39-49.
- [85] R. T. Hatch, Fermenter design. In *Single Cell Protein II*, Tannenbaum, S. R.; Wang, D. I., Eds. MIT Press: Cambridge, MA, 1975; Vol. 2, pp 46-68.
- [86] G. B. Wallis, *One-dimensional two-phase flow*, McGraw-Hill, New York **1969**.
- [87] G. W. Govier, A. Khalid, *The flow of complex mixtures in pipes*, Van Nostrand Reinhold Co., New York **1972**.
- [88] K. Schügerl, J. Lücke, U. Oels, Bubble column bioreactors. In *Advances in Biochemical Engineering, Volume 7*, Springer Berlin Heidelberg: 1977; Vol. 7, pp 1-84.
- [89] Z. F. Cui, S. Chang, A. G. Fane, *J. Membr. Sci.* **2003**, *221* (1-2), 1-35.
- [90] N. Ratkovich, C. C. V. Chan, P. R. Berube, I. Nopens, *Chem. Eng. Sci.* **2009**, *64* (16), 3576-3584.
- [91] J. Zahradník, M. Fialová, M. Ružička, J. Drahos, F. Kastánek, N. H. Thomas, *Chem. Eng. Sci.* **1997**, *52* (21-22), 3811-3826.
- [92] C. Vial, S. Poncin, G. Wild, N. Midoux, *Chem. Eng. Sci.* **2002**, *57* (22-23), 4745-4762.
- [93] J. B. Joshi, V. V. Ranade, S. D. Gharat, S. S. Lele, *Can. J. Chem. Eng.* **1990**, *68* (5), 705-741.
- [94] C. Vial, S. Poncin, G. Wild, N. Midoux, *Chem. Eng. Process.* **2001**, *40* (2), 135-151.
- [95] P. Verlaan, J. Tramper, K. Van't Reit, K. C. H. A. M. Luyben, *Chem. Eng. J.* **1986**, *33* (2), B43-B53.
- [96] E. Garcia Calvo, *Chem. Eng. Sci.* **1989**, *44* (2), 321-323.
- [97] M. E. Abashar, U. Narsingh, A. E. Rouillard, R. Judd, *Ind. Eng. Chem. Res.* **1998**, *37* (4), 1251-1259.
- [98] Y. C. Hsu, M. P. Duduković, *Chem. Eng. Sci.* **1980**, *35* (1-2), 135-141.
- [99] E. Garcia-Calvo, *AIChE J.* **1992**, *38* (10), 1662-1666.
- [100] C. Cao, S. Dong, Q. Geng, Q. Guo, *Ind. Eng. Chem. Res.* **2008**, *47* (11), 4008-4017.
- [101] D. Petrović, *PhD Thesis*, University of Novi Sad, Novi Sad, Serbia **1989**.
- [102] C. Freitas, J. A. Teixeira, *Bioprocess. Eng.* **1998**, *19* (6), 451-457.
- [103] G. Keitel, *PhD Thesis*, Universität Dortmund, Dortmund, Germany **1978**.
- [104] B. G. Kelkar, S. P. Godbole, M. F. Honath, Y. T. Shah, N. L. Carr, W. D. Deckwer, *AIChE J.* **1983**, *29* (3), 361-369.
- [105] D. D. McClure, J. Deligny, J. M. Kavanagh, D. F. Fletcher, G. W. Barton, *Chem. Eng. Technol.* **2014**, *37* (4), 652-658.
- [106] W. A. Al-Masry, A. R. Dukkan, *Chem. Eng. J.* **1997**, *65* (3), 263-271.
- [107] J. Lin, M. Han, T. Wang, T. Zhang, J. Wang, Y. Jin, *Chem. Eng. J.* **2004**, *102* (1), 51-59.
- [108] E. Camarasa, C. Vial, S. Poncin, G. Wild, N. Midoux, J. Bouillard, *Chem. Eng. Process.* **1999**, *38* (4-6), 329-344.
- [109] M. Mayer, R. Braun, W. Fuchs, *J. Membr. Sci.* **2006**, *277* (1-2), 258-269.
- [110] R. Nottenkamper, A. Steiff, P. Weinspach, *Ger. Chem. Eng.* **1983**, *6* (3), 147-155.
- [111] C. Boyer, A.-M. Duquenne, G. Wild, *Chem. Eng. Sci.* **2002**, *57* (16), 3185-3215.
- [112] J. Zahradník, G. Kuncová, M. Fialová, *Chem. Eng. Sci.* **1999**, *54* (13-14), 2401-2408.
- [113] A. Sofia, W. J. Ng, S. L. Ong, *Desalination* **2004**, *160* (1), 67-74.
- [114] W. A. Al-Masry, *J. Chem. Technol. Biotechnol.* **1999**, *74* (10), 931-936.
- [115] A. Gianetto, M. Ghirardini, G. Donati, F. Rivetti, *Chem. Eng. Sci.* **1992**, *47* (9), 2209-2214.
- [116] T. Miyahara, H. Hamanaka, T. Umeda, Y. Akagi, *J. Chem. Eng. Jpn.* **1999**, *32* (5), 689-695.

- [117] H. Choi, K. Zhang, D. D. Dionysiou, D. B. Oerther, G. A. Sorial, *J. Membr. Sci.* **2005**, *248* (1–2), 189-199.
- [118] N. Rossignol, L. Vandanjon, P. Jaouen, F. Quéméneur, *Aquacult. Eng.* **1999**, *20* (3), 191-208.
- [119] N. Mutavdžić, *Diplomski rad*, Univerzitet u Novom Sadu.
- [120] L. Wang, Y. Song, B. Zhang, E. Wang, *Thin Solid Films* **2004**, *458* (1–2), 197-202.
- [121] I. M. Šijački, M. S. Tokić, P. S. Kojić, D. L. Petrović, M. N. Tekić, N. L. Lukić, *Ind. Eng. Chem. Res.* **2013**, *52* (20), 6812-6821.
- [122] D. D. McClure, A. C. Lee, J. M. Kavanagh, D. F. Fletcher, G. W. Barton, *Chem. Eng. Technol.* **2015**, *38* (1), 44-52.
- [123] Z. Deng, T. Wang, N. Zhang, Z. Wang, *Ind. Eng. Chem. Res.* **2011**, *50* (20), 11537-11543.
- [124] T. Miyahara, N. Nagatani, T. Ohnishi, F. Takebe, *Japanese J. Multiphase Flow* **2011**, *25* (2), 142-148.
- [125] A. A. Sotiriadis, R. B. Thorpe, J. M. Smith, *Chem. Eng. Sci.* **2005**, *60* (22), 5917-5929.
- [126] A. Ferreira, G. Pereira, J. A. Teixeira, F. Rocha, *Chem. Eng. J.* **2012**, *180* (0), 216-228.
- [127] H. Herbst, H.-U. Peters, I.-S. Suh, A. Schumpe, W.-D. Deckwer, *Chem. Ing. Tech.* **1988**, *60* (5), 407-410.
- [128] K. Van't Riet, *Ind. Eng. Chem. Process Des. Dev.* **1979**, *18* (3), 357-364.
- [129] C. O. Vandu, R. Krishna, *Chem. Eng. Process.* **2004**, *43* (4), 575-579.
- [130] J. W. A. De Swart, R. E. van Vliet, R. Krishna, *Chem. Eng. Sci.* **1996**, *51* (20), 4619-4629.
- [131] G. A. Hughmark, *Ind. Eng. Chem. Process Des. Dev.* **1967**, *6* (2), 218-220.
- [132] D. Pošarac, M. Tekić, *AIChE J.* **1987**, *33* (3), 497-499.
- [133] B. Kröse, B. Krose, P. van der Smagt, P. Smagt, **1993**,
- [134] V. Ilić Neuronske Mreže. <http://solair.eunet.rs/~ilicv/neuro.html>
- [135] T. W. Chow, S.-Y. Cho, *Neural networks and computing: Learning algorithms and applications*, Imperial College Press, **2007**. Vol. 7.
- [136] A. Shaikh, M. Al-Dahhan, *Chem. Eng. Process.* **2003**, *42* (8–9), 599-610.
- [137] R. Lemoine, B. Fillion, A. Behkish, A. E. Smith, B. I. Morsi, *Chem. Eng. Process.* **2003**, *42* (8–9), 621-643.
- [138] Z. Chen, H. Liu, H. Zhang, W. Ying, D. Fang, *Can. J. Chem. Eng.* **2013**, *91* (3), 532-541.
- [139] W. A. Al-Masry, *Chem. Eng. Res. Des.* **2006**, *84* (6), 483-486.
- [140] P. S. Kojić, M. S. Tokić, I. M. Šijački, N. L. Lukić, D. L. Petrović, D. Z. Jovičević, S. S. Popović, *Chem. Eng. Technol.* **2015**, *38* (4), 701-708.
- [141] S. Amiri, M. R. Mehrnia, D. Barzegari, A. Yazdani, *Neural Comput. Appl.* **2011**, *20* (4), 487-494.
- [142] K. H. Choi, W. K. Lee, *J. Chem. Technol. Biotechnol.* **1993**, *56* (1), 51-58.
- [143] Y. X. Guo, M. N. Rathor, H. C. Ti, *Chem. Eng. J.* **1997**, *67* (3), 205-214.
- [144] E. Camarasa, E. Carvalho, L. A. C. Meleiro, R. Maciel Filho, A. Domingues, G. Wild, S. Poncin, N. Midoux, J. Bouillard, *Chem. Eng. Process.* **2001**, *40* (2), 121-128.