



UNIVERZITET U NOVOM SAOU
TEHNOLOŠKI FAKULTET

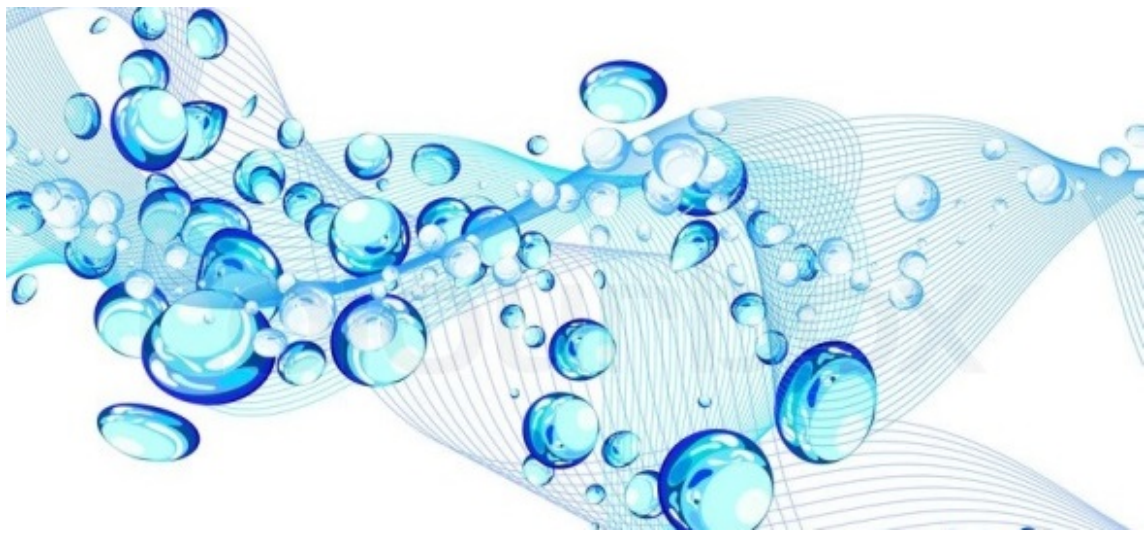


Nataša Lukić

**SAMO-ROTIRAJUĆI IMPELERI U *AIRLIFT*
REAKTORU SA SPOLJAŠNjom
RECIRKULACIJOM**

Doktorska disertacija

Novi Sad, 2016.



UNIVERZITET U NOVOM SADU
TEHNOLOŠKI FAKULTET

KLJUČNA DOKUMENTACIJSKA INFORMACIJA

Redni broj: RBR	
Identifikacioni broj: IBR	
Tip dokumentacije: TD	Monografska dokumentacija
Tip zapisa: TZ	Tekstualni štampani materijal
Vrsta rada: VR	Doktorska disertacija
Ime i prezime autora: AU	Nataša Lj. Lukić
Mentor: MN	dr Dragan Petrović, docent
Naslov rada: NR	Samo-rotirajući impeleri u <i>airlift</i> reaktoru sa spoljašnjom recirkulacijom
Jezik publikacije: JP	Srpski (latinica)
Jezik izvoda: JI	Srpski/engleski
Zemlja publikovanja: ZP	Republika Srbija
Uže geografsko područje: UGP	AP Vojvodina
Godina: GO	2016.
Izdavač: IZ	Autorski reprint
Mesto i adresa: MA	Novi Sad, Bulevar cara Lazara 1
Fizički opis rada: FO	8 poglavlja, 107 strana, 50 slika, 12 tabela, 6 priloga i 147 literaturnih navoda
Naučna oblast: NO	Tehničko-tehnološke nauke
Naučna disciplina: ND	Reaktorsko inženjerstvo
Predmetna odrednica, ključne reči: PO	Impeleri; Samo-rotirajući; <i>Airlift</i> reaktor sa spoljašnjom recirkulacijom; Nenjutnovski; Distributor; Hidrodinamika; Prenos mase
UDK	66.023:532.1:66.021.3(043.3)
Čuva se: ČU	Biblioteka Tehnološkog fakulteta u Novom Sadu, Bulevar cara Lazara 1, 21000 Novi Sad

Važna napomena:

VN

Izvod:

IZ

Nema

Cilj doktorske disertacije je poboljšanje hidrodinamičkih i masenoprenosnih karakteristika *airlift* reaktora sa spoljašnjom recirkulacijom umetanjem samo-rotirajućih impelera u uzlaznu cev. Uticaj ugradnje samo-rotirajućih impelera na osnovne hidrodinamičke i masenoprenosne osobine ispitan je pri radu sa različitim tečnostima i distributorima gasa. Rezultati su tumačeni poređenjem vrednosti za sadržaj gasa u uzlaznoj cevi, za brzinu tečnosti u silaznoj cevi, i za zapreminski koeficijent prenosa mase, dobijenih za dve konfiguracije reaktora (sa i bez impelera).

Rezultati disertacije ukazuju da ugradnja samo-rotirajućih impelera dovodi do znatnog razbijanja mehurova i smanjenja srednjeg prečnika mehurova gasa, naročito u viskoznim rastvorima karboksimetilceluloze. Prividna brzina gasa, vrsta tečne faze i tip distributora gasa u velikoj meri utiču na efikasnost samo-rotirajućih impelera. Dobijene vrednosti sadržaja gasa u uzlaznoj cevi su do 47% veće u konfiguraciji sa impelerima u odnosu na konfiguraciju bez impelera. Iako samo-rotirajući impeleri predstavljaju dodatni otpor proticanju tečnosti, njihovom ugradnjom je u svim ispitivanim sistemima postignuto relativno malo smanjenje brzine tečnosti (oko 10%). Zahvaljujući impelerima, zapreminski koeficijent prenosa mase uvećan je do 82% pri manjim protocima gasa. Pri većim protocima, koji odgovaraju uslovima rada koji se sreću u većini fermentacionih procesa, postignute su oko 20-30% veće vrednosti zapreminskog koeficijenta prenosa mase.

Pored empirijskih modela, u ovom radu uspešno su razvijeni i modeli veštačkih neuronskih mreža kojim se predviđaju sadržaj gasa u uzlaznoj cevi, brzina tečnosti i zapreminski koeficijent prenosa mase za obe konfiguracije *airlift* reaktora sa spoljašnjom recirkulacijom.

Datum prihvatanja teme od strane

Senata:

DP

Datum odbrane:

DO

Članovi komisije:

KO

21. april 2016.

dr Miodrag Tekić, profesor emeritus, Tehnološki fakultet Novi Sad, Univerzitet u Novom Sadu, predsednik

dr Dragan Petrović, docent, Tehnološki fakultet Novi Sad, Univerzitet u Novom Sadu, mentor

dr Vlada Veljković, redovni profesor, Tehnološki fakultet u Leskovcu, Univerzitet u Nišu, član

**UNIVERSITY OF NOVI SAD
FACULTY OF TECHNOLOGY**

KEY WORD INFORMATION

Accession number:
ANO

Identification number:
INO

Document type: Monograph documentation
DT

Type of record: Textual printed material
TR

Contents code: PhD Thesis
CC

Author: Nataša Lj. Lukić
AU

Mentor: dr Dragan Petrović, assistant professor
MN

Title: Self-agitated impellers in an external-loop airlift reactor
TI

Language of text: Serbian (Roman alphabet)
LT

Language of abstract: Serbian/English
LA

Country of publication: Republic of Serbia
CP

Locality of publication: AP of Vojvodina
LP

Publication year: 2016
PY

Publisher: Author's reprint
PU

Publication place: Novi Sad, Bulevar cara Lazara 1
PP

Physical description: 8 chapters, 107 pages, 50 figures, 12 tables, 6 appendices and 147 references
PD

Scientific field: Technical-Technological Sciences
SF

Scientific discipline: Chemical reaction engineering
SD

Subject, Key words: Impellers; Self-agitated; External-loop airlift; Non-Newtonian; Hydrodynamics; Mass transfer
SKW

UC 66.023:532.1:66.021.3(043.3)

Holding data: Library of Faculty of Technology, Bulevar cara Lazara, 21000 Novi Sad
HD

Note:

None

N

Abstract:

AB

The aim of this study was intensification of hydrodynamic and mass transfer properties of external-loop airlift reactor by means of self-agitated impellers mounted in the riser section. The influence of impellers' insertion on the main hydrodynamic and mass transfer characteristics was investigated for various liquid phases and sparger types. The values of riser gas holdup, downcomer liquid velocity and volumetric mass transfer coefficient obtained in configurations with and without impellers were compared.

Results showed that the installment of self-agitated impellers led to a significant bubble breakage and decrease of bubble size, especially in viscous carboxymethylcellulose solutions. The efficiency of self-agitated impellers was immensely influenced by superficial gas velocity, liquid phase, and distributor type. Obtained riser gas holdup values were up to 47% higher in the configuration with impellers, in comparison to the configuration without impellers. Despite the fact that self-agitated impellers represented an obstacle to liquid flow, relatively low reduction of downcomer liquid velocity was attained (about 10%). Furthermore, the insertion of impellers induced up to 82% higher values of volumetric mass transfer coefficient at lower superficial gas velocities. At higher superficial gas velocities, i.e. conditions mainly operated in various fermentation processes, about 20-30% higher values of volumetric mass transfer coefficient were achieved with impellers.

In addition to empirical correlations, artificial neural network models were successfully developed to predict riser gas holdup, downcomer liquid velocity and volumetric mass transfer coefficient in both external-loop airlift configurations.

Accepted on Senate on:

April 21st, 2016

AS

Defended:

DE

Thesis Defend Board:

DB

dr Miodrag Tekić, professor emeritus, Faculty of Technology Novi Sad, University of Novi Sad, president

dr Dragan Petrović, assistant professor, Faculty of Technology Novi Sad, University of Novi Sad, mentor

dr Vlada Veljković, full professor, Faculty of Technology Leskovac, University of Niš, member

SADRŽAJ

KLJUČNA DOKUMENTACIJSKA INFORMACIJA	iii
KEY WORD INFORMATION	v
SADRŽAJ	vii
SPISAK TABELA	ix
SPISAK SLIKA	x
SPISAK OSNOVNIH OZNAKA	xiii
SPISAK PRILOGA	xvi
1. UVOD	1
2. PREGLED LITERATURE	3
2.1 KONTAKTORI GAS-TEČNO	3
2.1.1 Kontaktori gas-tečno sa mehaničkim mešanjem	3
2.1.2 Kontaktori gas-tečno sa pneumatskim mešanjem.....	5
2.2 <i>AIRLIFT</i> REAKTORI SA SPOLJAŠNJOM RECIRKULACIJOM	6
2.2.1 Opšti opis ALSR.....	6
2.2.2 Režimi toka u uzlaznoj zoni ALSR	9
2.2.3 Pregled dosadašnjih saznanja o hidrodinamičkim karakteristikama ALSR	11
2.2.3.1 Sadržaj gasa	11
2.2.3.2 Brzina tečnosti	14
2.2.4 Pregled dosadašnjih saznanja o masenoprenosnim karakteristikama ALSR	15
2.2.4.1 Zapreminski koeficijent prenosa mase	16
2.3 MODIFIKOVANI <i>AIRLIFT</i> REAKTORI	22
2.4 MODELOVANJE <i>AIRLIFT</i> REAKTORA	27
2.4.1 Empirijske korelacije	28
2.4.2 Veštačke neuronske mreže	31
3. ZADATAK I CILJ	35
4. EKSPERIMENTALNI DEO	37
4.1 OPIS EKSPERIMENTALNOG POSTROJENJA	37
4.2 FIZIČKE KARAKTERISTIKE ISPITIVANIH TEČNOSTI	41
4.3 METODE MERENJA	42
4.3.1 Određivanje sadržaja gasa u uzlaznoj cevi	42
4.3.2 Određivanje brzine tečnosti u silaznoj cevi	45
4.3.3 Određivanje zapreminskog koeficijenta prenosa mase.....	46
4.3.4 Određivanje brzine smicanja	49
4.3.5 Određivanje brzine obrtanja impelera	50
5. REZULTATI I DISKUSIJA	51
5.1 BRZINA OBRTRANJA SAMO-ROTIRAJUĆIH IMPELERA	51
5.2 HIDRODINAMIČKI REŽIMI TOKA	54
5.2.1 Hidrodinamički režimi toka u ALSR.....	54
5.2.2 Hidrodinamički režimi toka u ALSRI	55
5.3 SADRŽAJ GASA U UZLAZNOJ CEVI ALSR SA I BEZ IMPELERA	58
5.3.1 Sadržaj gasa u uzlaznoj cevi ALSR.....	58

5.3.2 Uticaj ugradnje samo-rotirajućih impelera na sadržaj gasa u uzlaznoj cevi.....	61
5.4 BRZINA TEČNOSTI U SILAZNOJ CEVI ALSR SA I BEZ IMPELERA	65
5.4.1 Brzina tečnosti u silaznoj cevi ALSR.....	65
5.4.2 Uticaj ugradnje samo-rotirajućih impelera na brzinu tečnosti u silaznoj cevi	67
5.5 MASENOPRENOSNE KARAKTERISTIKE ALSR SA I BEZ IMPELERA.....	70
5.5.1 Zapreminski koeficijent prenosa mase u ALSR.....	70
5.5.2 Uticaj ugradnje samo-rotirajućih impelera na zapreminski koeficijent prenosa mase.....	73
5.5.3 Odnos k_{La}/ϵ_{GR} u ALSR	76
5.5.4 Uticaj ugradnje samo-rotirajućih impelera na odnos k_{La}/ϵ_{GR}	78
5.6 POREĐENJE REZULTATA DOBIJENIH U OVOM RADU SA REZULTATIMA DRUGIH AUTORA	79
5.7 MODELOVANJE REZULTATA.....	82
5.7.1 Empirijske korelacije.....	82
5.7.2 Veštačke neuronske mreže	87
6. ZAKLJUČAK.....	91
LITERATURA.....	95
PRILOZI	105

SPISAK TABELA

Tabela 2.1 Pregled dosadašnjih istraživanja u ALSR	18
Tabela 2.2 Pregled dosadašnjih istraživanja uticaja ugradnje umetaka na hidrodinamičke i masenoprenosne karakteristike ALSR	25
Tabela 2.3 Pregled dosadašnjih istraživanja uticaja ugradnje umetaka na hidrodinamičke i masenoprenosne karakteristike ALUR	26
Tabela 2.4 Pregled predloženih korelacija za predviđanje hidrodinamičkih karakteristika u ALSR	29
Tabela 2.5 Pregled predloženih korelacija za predviđanje masenoprenosnih karakteristika u ALSR	30
Tabela 4.1 Geometrijske karakteristike aparature	39
Tabela 4.2 Fizičke karakteristike korišćenih tečnosti na 20°C	41
Tabela 4.3 Vrednosti vremenske konstante kiseonične elektrode K_E	48
Tabela 5.1 Kvalitet fitovanja i vrednosti parametara dobijenih korelisanjem podataka za sadržaj gasa u uzlaznoj cevi	84
Tabela 5.2 Kvalitet fitovanja i vrednosti parametara dobijenih korelisanjem podataka za brzinu tečnosti u silaznoj cevi	84
Tabela 5.3 Kvalitet fitovanja i vrednosti parametara dobijenih korelisanjem podataka za zapreminski koeficijent prenosa mase	85
Tabela 5.4 Optimalna topologija i kvalitet predviđanja primenom veštačkih neuronskih mreža	89

SPISAK SLIKA

Slika 2.1 Kontaktor gas-tečno sa mehaničkim mešanjem	4
Slika 2.2 Različiti tipovi impelera. a) sa radijalnim tokom i b) sa aksijalnim tokom	4
Slika 2.3 Osnovni tipovi kontaktora gas-tečno sa pneumatskim mešanjem. a) barbotažna kolona, b) <i>airlift</i> reaktor sa unutrašnjom recirkulacijom i c) <i>airlift</i> reaktor sa spoljašnjom recirkulacijom.	5
Slika 2.4 Različita konstruktivna rešenja separacione zone ALSR. a) tip zatvorenog kanala i b) tip otvorenog kanala.	8
Slika 2.5 Međusobna zavisnost osnovnih hidrodinamičkih i masenoprenosnih parametara <i>airlift</i> reaktora (preuzeto iz Jones (2007))	9
Slika 2.6 Hidrodinamički režimi toka u uzlaznoj zoni. a) mehurast tok, b) heterogeni (turbulentni) tok i c) klipni tok.	10
Slika 2.7 Različiti tipovi umetaka. a) statički mešač SMV-12, b) punjenje od tkanog najlona, c) mrežasto punjenje od nerđajućeg čelika i d) specijalno konstruisane perforirane ploče	22
Slika 2.8 Simbolički prikaz: a) biološkog neurona, b) veštačkog neurona, c) biološke neuronske mreže i d) veštačke neuronske mreže	33
Slika 4.1 Skica eksperimentalne aparature	38
Slika 4.2 Impeler sa aksijalnim tokom	38
Slika 4.3 Distributori gasa: a) sinter ploča i b) jednostruki uvodnik	39
Slika 4.4 Određivanje sadržaja gasa merenjem hidrostatičkih pritisaka duž uzlazne cevi ALSR	42
Slika 4.5 Nomogram za određivanje sadržaja gasa za sistem vazduh-voda i jednostruki uvodnik u ALSRI	45
Slika 4.6 Krive odziva konduktometrijskih elektroda prilikom određivanja brzine tečnosti u silaznoj cevi	46
Slika 4.7 Karakteristične krive promene koncentracije rastvorenog kiseonika sa vremenom u ALSR. Legenda: simboli–eksperimentalne vrednosti; linije– izračunate vrednosti na osnovu modela (izraz 4.16)	48
Slika 5.1 Zavisnost brzine obrtanja samo-rotirajućih impelera od njihove pozicije u uzlaznoj cevi ALSRI sa jednostrukim uvodnikom za a) vodu i b) CMC-3	51
Slika 5.2 Uticaj osobina tečne faze i tipa distributora na brzinu obrtanja samo-rotirajućih impelera. a) jednostruki uvodnik i b) sinter ploča.	52
Slika 5.3 Uticaj ugradnje samo-rotirajućih impelera na pritisak gasa na ulazu u reaktor za sistem vazduh-voda i jednostruki uvodnik	53
Slika 5.4 Niz slika koje opisuju ponašanje mehurova u uzlaznoj cevi na poziciji sedmog impelera za sistem CMC-3 i jednostruki uvodnik pri $U_G=0,0096$ m/s. a) ALSR i b) ALSRI	57
Slika 5.5 Uticaj tipa distributora gasa na sadržaj gasa u ALSR. a) voda, b) 0,011 mas.% <i>n</i> -butanol, c) CMC-1, d) CMC-2, e) CMC-3 i f) CMC-4.	59

Slika 5.6 Uticaj karakteristika tečne faze na sadržaj gasa u ALSR. a) njutnovske tečnosti i b) nenjutnovske tečnosti.	60
Slika 5.7 Uticaj ugradnje samo-rotirajućih impelera na sadržaj gasa. a) voda, b) 0,011 mas.% <i>n</i> -butanol i c) CMC-3.	61
Slika 5.8 Uticaj ugradnje samo-rotirajućih impelera na sadržaj gasa (distributor: jednostruki uvodnik). a) 46 mas.% šećer, b) CMC-1, c) CMC-2 i d) CMC-4.	62
Slika 5.9 Uticaj samo-rotirajućih impelera na <i>HI</i> u vodi, 0,011 mas.% <i>n</i> -butanolu i rastvoru CMC-3. a) jednostruki uvodnik i b) sinter ploča.	64
Slika 5.10 Uticaj samo-rotirajućih impelera na <i>HI</i> u 46 mas.% rastvoru šećera, CMC-1, CMC-2 i CMC-4 (distributor: jednostruki uvodnik).....	64
Slika 5.11 Uticaj tipa distributora gasa na brzinu tečnosti u silaznoj cevi ALSR u neviskoznim tečnostima. a) voda i b) 0,011 mas.% <i>n</i> -butanol.	65
Slika 5.12 Uticaj tipa distributora gasa na brzinu tečnosti u silaznoj cevi ALSR u rastvoru CMC-3.	66
Slika 5.13 Uticaj karakteristika tečne faze na brzinu tečnosti u silaznoj cevi u ALSR. a) jednostruki uvodnik i b) sinter ploča.	66
Slika 5.14 Uticaj ugradnje samo-rotirajućih impelera na W_{LD} u silaznoj cevi u ALSR. a) voda, b) 0,011 mas.% <i>n</i> -butanol i c) CMC-3.	67
Slika 5.15 Uticaj ugradnje samo-rotirajućih impelera na brzinu tečnosti u silaznoj cevi (distributor: jednostruki uvodnik). a) 46 mas.% šećer, b) CMC-1, c) CMC-2 i d) CMC-4.	68
Slika 5.16 Uticaj samo-rotirajućih impelera na <i>LVR</i> u vodi, 0,011 mas.% <i>n</i> -butanolu i rastvoru CMC-3. a) jednostruki uvodnik i b) sinter ploča.....	69
Slika 5.17 Uticaj samo-rotirajućih impelera na <i>LVR</i> u 46 mas.% rastvoru šećera, CMC-1, CMC-2 i CMC-4 (distributor: jednostruki uvodnik).....	69
Slika 5.18 Uticaj tipa distributora gasa na zapreminski koeficijent prenosa mase u ALSR u neviskoznim tečnostima. a) voda i b) 0,011 mas.% <i>n</i> -butanol.....	71
Slika 5.19 Uticaj tipa distributora gasa na zapreminski koeficijent prenosa mase u ALSR u nenjutnovskim tečnostima. a) CMC-1, b) CMC-2, c) CMC-3 i d) CMC-4.....	71
Slika 5.20 Uticaj karakteristika tečne faze na zapreminski koeficijent prenosa mase u ALSR. a) jednostruki uvodnik i b) sinter ploča.....	72
Slika 5.21 Uticaj ugradnje samo-rotirajućih impelera na zapreminski koeficijent prenosa mase. a) voda, b) 0,011 mas.% <i>n</i> -butanol i c) CMC-3.....	73
Slika 5.22 Uticaj ugradnje samo-rotirajućih impelera na zapreminski koeficijent prenosa mase (distributor: jednostruki uvodnik). a) 46 mas.% šećer, b) CMC-1, c) CMC-2 i d) CMC-4.....	74
Slika 5.23 Uticaj samo-rotirajućih impelera na relativno povećanje zapreminskog koeficijenta prenosa mase. a) jednostruki uvodnik i b) sinter ploča.	75
Slika 5.24 Uticaj tipa distributora gasa na odnos k_{La}/ε_{GR} u ALSR. a) voda, b) 0,011 mas.% <i>n</i> -butanol, c) CMC-1, d) CMC-2, e) CMC-3 i f) CMC-4.....	77
Slika 5.25 Uticaj karakteristika tečne faze na odnos k_{La}/ε_{GR} u ALSR. a) jednostruki uvodnik i b) sinter ploča.	78

Slika 5.26 Uticaj samo-rotirajućih impelera na relativnu promenu odnosa k_{LA}/ε_{GR} . a) jednostruki uvodnik i b) sinter ploča.	79
Slika 5.27 Poređenje postignutih vrednosti za sadržaj gasa u uzlaznoj cevi u ovom radu sa rezultatima drugih autora	80
Slika 5.28 Poređenje postignutih vrednosti za zapreminski koeficijent prenosa mase u ovom radu sa rezultatima drugih autora	80
Slika 5.29 Poređenje relativnih promena hidrodinamičkih veličina postignutih ugradnjom impelera u ovom radu sa rezultatima drugih autora uz korišćenje drugih umetaka (tečna faza: voda). a) <i>HI</i> i b) <i>LVR</i>	81
Slika 5.30 Poređenje relativnog povećanja zapreminskog koeficijenta prenosa mase postignutog ugradnjom impelera u ovom radu sa rezultatima drugih autora uz korišćenje drugih umetaka (tečna faza: voda).	82
Slika 5.31 Poređenje eksperimentalnih i izračunatih vrednosti hidrodinamičkih veličina primenom korelacija. a) sadržaj gasa i b) brzina tečnosti.....	86
Slika 5.32 Poređenje eksperimentalnih i izračunatih vrednosti zapreminskog koeficijenta prenosa mase primenom korelacija	86
Slika 5.33 Uticaj broja neurona u skrivenom sloju na normalizovanu vrednost srednje kvadratne greške i koeficijent determinacije za mrežu VNM-3	88
Slika 5.34 Poređenje eksperimentalnih i izračunatih vrednosti hidrodinamičkih veličina primenom veštačkih neuronskih mreža. a) sadržaj gasa (mreža VNM-1) i b) brzina tečnosti (mreža VNM-2).	90
Slika 5.35 Poređenje eksperimentalnih i izračunatih vrednosti zapreminskog koeficijenta prenosa mase primenom veštačke neuronske mreže VNM-3.....	90

SPISAK OSNOVNIH OZNAKA

<i>a</i>	specifična međufazna površina gas-tečno, 1/m
<i>A</i>	površina poprečnog preseka, m ²
<i>Bo</i>	Bodenštajnov broj $Bo = \frac{gD^2\rho_L}{\sigma}$, -
<i>C</i>	koncentracija, mol/m ³
<i>C_N</i>	broj ugljenikovih atoma u molekulu alifatičnih alkohola, -
<i>d_o</i>	prečnik otvora distributora, m
<i>d₃₂</i>	Sauterov srednji prečnik mehurova gasa, m
<i>D</i>	prečnik, m
<i>D_a</i>	koeficijent aksijalne disperzije, m ² /s
<i>D_L</i>	difuzivnost tečne faze, m ² /s
<i>Fr</i>	Frudov broj $Fr = \frac{U_G^2}{Dg}$, -
<i>g</i>	gravitaciono ubrzanje, m/s ²
<i>H</i>	visina, m
<i>HI</i>	relativno povećanje sadržaja gasa u uzlaznoj cevi definisano izrazom 5.1, %
<i>k_L</i>	koeficijent prenosa mase sa strane tečnosti, m/s
<i>k_{La}</i>	zapreminski koeficijent prenosa mase, 1/s
<i>k_{LaL}</i>	zapreminski koeficijent prenosa mase računat na zapreminu tečne faze, 1/s
<i>K</i>	faktor konzistencije, Pa·s ⁿ
<i>K_E</i>	vremenska konstanta kiseonične elektrode, 1/s
<i>K_f</i>	ukupni koeficijent trenja, -
<i>L</i>	dužina, m
<i>LVR</i>	relativno smanjenje brzine tečnosti u silaznoj cevi definisano izrazom 5.2, %
<i>Mo</i>	Mortonov broj $Mo = \frac{We^3}{FrRe^4}$, -
<i>MSE</i>	srednja kvadratna greška
<i>n</i>	indeks toka, -
<i>NMSE</i>	normalizovana vrednost srednje kvadratne greške
<i>p_{1-p5}</i>	parametri u izrazima 5.5 i 5.6, -
<i>P</i>	pritisak, Pa
<i>Pe</i>	Pekletov broj: $Pe = \frac{UL}{D_a}$, -
<i>Q_m</i>	molski protok gasa, mol/s
<i>R</i>	univerzalna gasna konstanta, J/(mol·K)

Re	Rejnoldsov broj $Re = \frac{DU_G}{\nu}$, -
R^2	koeficijent determinacije, -
Sc	Šmitov broj $Sc = \frac{\nu}{D_L}$, -
Sh	Šervudov broj $Sh = \frac{k_L a D^2}{D_L}$, -
St	Stantonov broj: $St = \frac{k_L a H D}{U_L}$, -
t	vreme, s; značajnost parametara
T	temperatura, K
U	prividna brzina, m/s
V	zapremina, m ³
VI	relativno povećanje zapreminskog koeficijenta prenosa mase definisano izrazom 5.3, %
W	stvarna brzina, m/s
We	Veberov broj $We = \frac{DU_L^2 \rho_L}{\sigma}$, -
ΔP	pad pritiska, Pa
Δz	razlika visina između mernih mesta piezometarskih cevi, m

Grčka slova

γ	brzina smicanja, 1/s
δ	srednja relativna greška, %
ε_G	sadržaj gasa, -
ε_{GR}	sadržaj gasa u uzlaznoj cevi, -
$\varepsilon_{GR,\nu}$	sadržaj gasa u uzlaznoj cevi meren metodom povećanja zapremine disperzije, -
μ	dinamička viskoznost, Pa·s
μ_a	prividna viskoznost, Pa·s
ν	kinematska viskoznost, m ² /s
ρ	gustina, kg/m ³
σ	površinski napon, N/m
τ	napon smicanja, Pa
ψ	relativna promena odnosa k_{La}/ε_{GR} definisana izrazom 5.4, %
$(-d\sigma/dC_A)$	gradijent površinskog napona, N·m ² /mol

Indeksi

<i>A</i>	anulus; alkohol
<i>atm</i>	atmosferski uslovi
<i>c</i>	cirkulacija
<i>C</i>	centralna cev
<i>D</i>	silazna cev (eng. <i>downcomer</i>)
<i>G</i>	gas
<i>E</i>	elektroda
<i>H</i>	visina disperzije
<i>L</i>	tečnost
<i>min</i>	minimum
<i>mix</i>	mešanje
<i>R</i>	uzlazna cev (eng. <i>riser</i>)
<i>uk</i>	ukupni
*	ravnotežni uslovi
<i>0</i>	početni uslovi

Skraćenice

ALSR	<i>airlift</i> reaktor sa spoljašnjom recirkulacijom
ALSRI	<i>airlift</i> reaktor sa spoljašnjom recirkulacijom sa samo-rotirajućim impelerima
ALUR	<i>airlift</i> reaktor sa unutrašnjom recirkulacijom
CMC	karboksimetilceluloza
OB	otvor blende
VNM	veštačka neuronska mreža

SPISAK PRILOGA

Prilog 1 Zavisnost napona smicanja od brzine smicanja za rastvore šećera i karboksimetilceluloze. Legenda: simboli–eksperimentalne vrednosti; linije–izračunate vrednosti na osnovu stepenog modela (izraz 4.2).....	105
Prilog 2 Zavisnost ε_{GR} od $\varepsilon_{GR,v}$ za sistem vazduh-voda i jednostruki uvodnik.....	105
Prilog 3 Zavisnost W_{LD}^2 od ε_{GR} za sistem vazduh-voda i jednostruki uvodnik. Legenda: simboli–eksperimentalne vrednosti; linije–izračunate vrednosti na osnovu izraza 4.11	106
Prilog 4 Dinamika kiseonične elektrode. Legenda: simboli–eksperimentalne vrednosti; linije–izračunate vrednosti na osnovu modela datog izrazom 4.17.....	106
Prilog 5 Uticaj broja neurona u skrivenom sloju na normalizovanu vrednost srednje kvadratne greške i koeficijent determinacije. a) VNM-1) i b) VNM-2.....	107
Prilog 6 Vrednosti parametara dobijenih korelisanjem podataka za zapreminski koeficijent prenosa mase primenom metode koju su predložili Cerri i sar. (2008)	107

1. UVOD

Airlift reaktori sa spoljašnjom recirkulacijom su usled svoje jednostavne konstrukcije, odsustva pokretnih delova, niskih investicionih i operativnih troškova, dobrog mešanja i niskih utrošaka energije, u velikoj meri zastupljeni ne samo u biohemijskoj i farmaceutskoj industriji, već i u hemijskoj industriji kao apsorberi, striperi ili hemijski reaktori. Njihova proizvodnost uslovljena je brzinom prenosa mase između tečne i gasne faze. Poboljšanje prenosa mase, a samim tim i veća proizvodnost ovih uređaja, ostvaruje se povećanjem specifične međufazne površine gas-tečno i/ili povećanjem koeficijenta prenosa mase.

Usled sve učestalijih zahteva za poboljšanjem efikasnosti uređaja u hemijskoj i biohemijskoj industriji, veliki broj istraživačkih radova bavi se pronalaženjem rešenja koja bi omogućila veće brzine prenosa mase između gasne i tečne faze. Iz tog razloga u poslednje vreme veoma su česte modifikacije unutrašnjosti *airlift* reaktora koje se ostvaruju ugradnjom različitih elemenata u strujni tok kako bi se postigao odgovarajući otpor proticanju tečnosti i bolja disperzija gasne faze, s krajnjim ciljem da se poboljšaju hidrodinamičke i masenoprenosne karakteristike ovih uređaja. U tu svrhu su dosad u raznim istraživanjima bili korišćeni ili nepokretni umeci poput različitih vrsta punjenja, statičkih mešača, blendi ili pregrada, ili mehanički pokretani impeleri. Jedno od mogućih rešenja su i samo-rotirajući impeleri montirani u uzlaznu cev, koji se pokreću isključivo cirkulacijom tečnosti prouzrokovanom uvođenjem gasa u reaktor. Ovaj tip umetaka do sada su ispitali samo Tekić i sar. (2014) u cilju poboljšanja hidrodinamike *airlift* reaktora sa unutrašnjom recirkulacijom uz što je moguće manji otpor proticanju tečnosti. Iako nisu ostvarili poboljšanje ukupnog sadržaja gasa, rezultati njihovog istraživanja istakli su značajan uticaj samo-rotirajućih impelera na hidrodinamičke osobine, te nagovestili da

bi uticaj impelera verovatno bio mnogo izraženiji u *airlift* reaktoru sa spoljašnjom recirkulacijom. Iz tog razloga, postoji potreba da se ispita mogućnost ugradnje samo-rotirajućih impelera u uzlaznu cev *airlift* reaktora sa spoljašnjom recirkulacijom, kao i da se kvantitativno odredi uticaj njihove ugradnje na hidrodinamičke i masenoprenosne karakteristike.

Imajući u vidu da efikasnost *airlift* reaktora sa spoljašnjom recirkulacijom u najvećoj meri zavisi od zapreminskog koeficijenta prenosa mase i hidrodinamičkih parametara kao što su sadržaj gasa i brzina tečne faze, njihova detaljna karakterizacija je od ključnog značaja za uspešno projektovanje i upravljanje ovim uređajima. Ovi parametri zavise od konstrukcionih detalja reaktora (tipa reaktora, geometrijskih karakteristika, tipa i karakteristika distributora gasa), radnih uslova (prevažodno prividne brzine gasa) i fizičko-hemijskih karakteristika prisutnih faza. Zbog toga su istraživanja u okviru ovog rada, pored uticaja ugradnje samo-rotirajućih impelera u uzlaznu cev, posvećena i ispitivanju uticaja karakteristika tečne faze i tipa distributora gasa na hidrodinamičke i masenoprenosne karakteristike *airlift* reaktora sa spoljašnjom recirkulacijom.

2. PREGLED LITERATURE

2.1 Kontaktori gas-tečno

Hemijski procesi čija brzina je uslovljena brzinom prenosa mase mogu se intenzivirati povećanjem kontaktne površine između faza. Na veličinu međufazne površine po jedinici zapremine, a samim tim i na brzinu prenosa mase, može se uticati izborom odgovarajućeg uređaja. Kontaktori gas-tečno (GL od eng. *gas-liquid*) predstavljaju tip reaktora kod kojih se formiranje međufazne površine gas-tečnost ostvaruje dispergovanjem gasa (vazduha).

U odnosu na način mešanja ovi uređaji mogu se grubo podeliti u tri grupe:

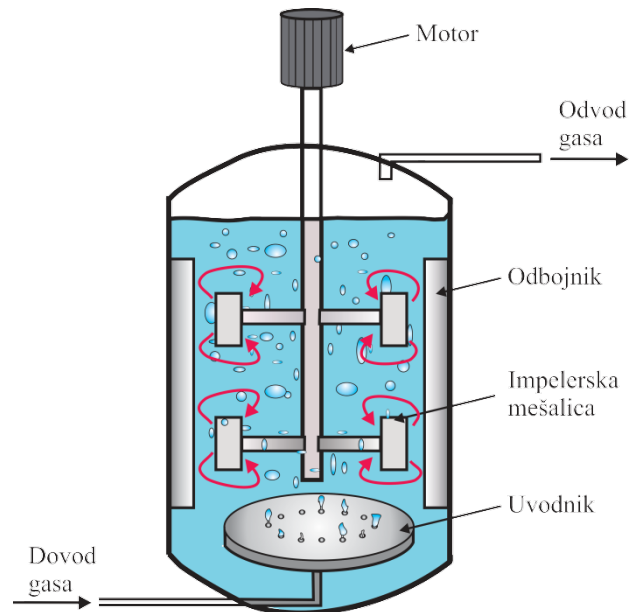
- i. kontaktore sa mehaničkim mešanjem (slika 2.1),
- ii. kontaktore sa hidrauličkim mešanjem, tj. mešanjem pomoću pumpe i
- iii. kontaktore sa pneumatskim mešanjem, tj. mešanjem pomoću dispergovane gasne faze (slika 2.3).

Izbor tipa kontaktora gas-tečno uslovljen je tehno-ekonomskim parametrima konkretnog procesa.

2.1.1 Kontaktori gas-tečno sa mehaničkim mešanjem

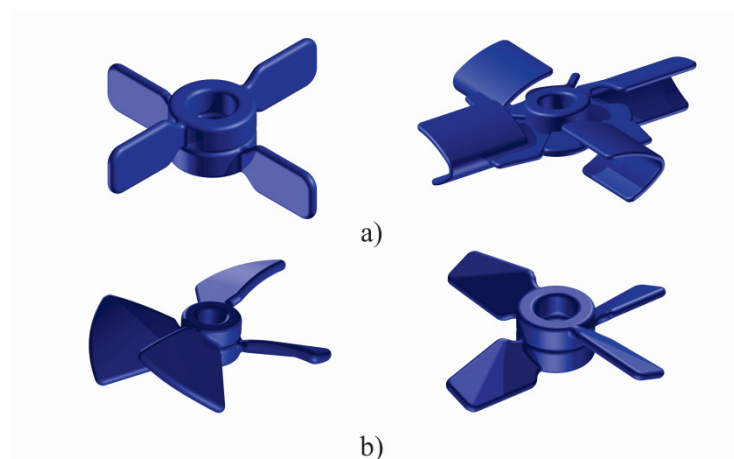
Kontaktori gas-tečno sa mehaničkim mešanjem su standardni uređaji u hemijskoj industriji kod kojih se mešanje ostvaruje impelerom (mešalicom) koju pokreće motor. Glavna karakteristika ovih uređaja je skoro idealno mešanje zahvaljujući kom se ostvaruje intenzivan kontakt između faza, uniformniji prenos toplote i mase,

ravnomernija raspodela faza, ali i sprečavaju začepjenja i pojave mrtvih zona unutar uređaja (Kadic i Heindel, 2014). Široko se koriste u procesima fermentacije, karbonizacije, oksidacije, hlorinacije, hidrogenizacije, i u tretmanu otpadnih voda. Učinak ovih kontaktora (brzina prenosa mase) može se do određene granice poboljšavati povećanjem količine mehaničke energije dovedene u sistem, što predstavlja sigurnosni faktor koji u velikoj meri olakšava njihovu konstrukciju odnosno projektovanje.



Slika 2.1 Kontaktor gas-tečno sa mehaničkim mešanjem

Brojne konstrukcione izvedbe impelera postoje pre svega da bi se ispunili najrazličitiji industrijski zahtevi. Najčešće korišćena podela impelera je prema tipu strujanja koji formiraju. Na slici 2.2 prikazani su najzastupljeniji tipovi impelera u industriji: sa primarno radijalnim (turbinski tip) i primarno aksijalnim tokom (propelerski tip). Izbor odgovarajućeg tipa impelera zajedno sa geometrijskim karakteristikama uređaja u velikoj meri utiče na ekonomsku izvodljivost procesa.

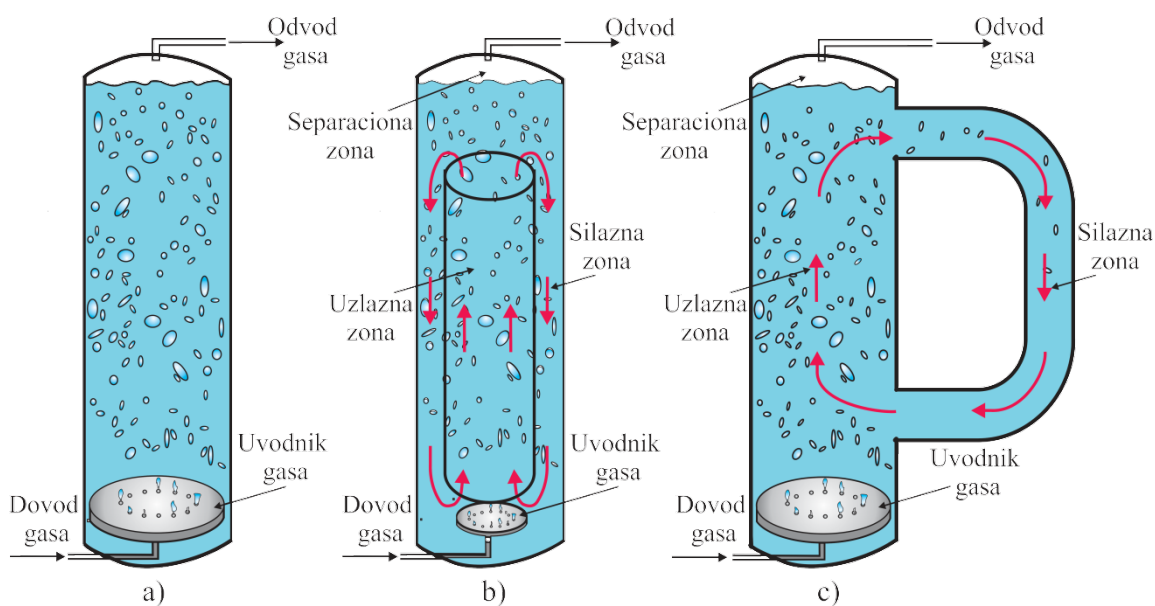


Slika 2.2 Različiti tipovi impelera. a) sa radijalnim tokom i b) sa aksijalnim tokom

Iako su najrasprostranjeniji u industrijskim postrojenjima, ovi uređaji imaju i određene nedostatke, veoma naglašene kod procesa velikog kapaciteta, kao što su mala efikasnost (u vidu malog koeficijenta prenosa mase po jedinici utrošene snage), i prekomerno zagrevanje radnog fluida usled neefikasnog odvođenja toplote oslobođene putem mešanja. Pored toga, složeno zaptivanje osovine impelera dodatno otežava održavanje sterilnih uslova u njima. Takođe, u zoni oko impelera vladaju velike smicajne sile koje kod bioprocasa mogu dovesti do mehaničkog oštećenja ćelija mikroorganizama osetljivih na smicajne sile (Chisti, 1989). Usled nabrojanih nedostataka, kontaktori sa mehaničkim mešanjem su nepogodni za određene primene (npr. proizvodnju jednoćelijskih proteina) pa su razvijani novi tipovi, kao što su kontaktori gas-tečno sa pneumatskim mešanjem, kod kojih su uklonjeni neki od tih nedostataka.

2.1.2 Kontaktori gas-tečno sa pneumatskim mešanjem

Kontaktori gas-tečno sa pneumatskim mešanjem su uređaji kod kojih se mešanje i aeracija vrše barbotiranjem gasa bez upotrebe mehaničkih mešača. Bliže se definišu kao pneumatsko agitovani kontaktori gas-tečno u kojima je gas disperzna faza i dovodi se kontinualno, dok je tečnost kontinualna faza i dovodi se kontinualno ili šaržno. Barbotажne kolone i *airlift* reaktori su osnovni tipovi ovih uređaja i prikazani su na slici 2.3.



Slika 2.3 Osnovni tipovi kontaktora gas-tečno sa pneumatskim mešanjem.
a) barbotажna kolona, b) *airlift* reaktor sa unutrašnjom recirkulacijom i c) *airlift* reaktor sa spoljašnjom recirkulacijom.

Barbotažne kolone su visoki cilindrični sudovi u kojima se komprimovani gas, koji služi za mešanje, disperguje pri dnu suda (slika 2.3a). Zahvaljujući ovome na jeftin i veoma jednostavan način osvaruje se kontakt i mešanje dve ili više faza čime se postižu odlični koeficijenti prenosa mase i toplote. Međutim, barbotažne kolone karakterišu i brojni nedostaci kao što su niže prividne brzine gasa, neravnomerna radijalna raspodela sadržaja gasa, i pojava recirkulacionog režima - toka tečnosti naviše u centralnom delu kolone i kompenzacionog toka naniže uz zid kolone (Kantarci i sar., 2005).

Airlift reaktorima se pre svega izbegavaju određeni nedostaci barbotažnih kolona i obezbeđuje bolja kontrola procesa. Njih karakteriše recirkulacija fluida kroz za tu svrhu konstruisane kanale sa usmerenim, dobro definisanim i uređenim tokom tečnosti.

Upravo je definisaniji tok tečnosti kao posledica postojanja recirkulacione petlje kod *airlift* reaktora osnovna razlika između ovih uređaja i barbotažnih kolona. Dva osnovna tipa *airlift* reaktora su:

- i. *airlift* reaktor sa unutrašnjom recirkulacijom (ALUR) (slika 2.3b) i
- ii. *airlift* reaktor sa spoljašnjom recirkulacijom (ALSR) (slika 2.3c).

U slučaju ALUR, umetanjem pregrade ili koncentrične cevi u kolonu postiže se recirkulacija tečnosti. Sa druge strane, kod ALSR zone kroz koje tečnost cirkuliše fizički su odvojene jedna od druge pomoću dodatnih cevi.

Iako je pojam *airlift* reaktora jasno definisan i poznat odranije zahvaljujući patentu Lefrancois i sar. (1955), tek devedesetih godina prošlog veka evidentiran je znatan porast broja naučnih radova koji se bave problematikom ovog tipa reaktora. Intenzivnije istraživanje *airlift* reaktora može se objasniti sazrevanjem istraživanja u vezi sa ostalim kontaktorima gas-tečno, kao što su kontaktori sa mehaničkim mešanjem i barbotažne kolone, gde su uočeni njihovi brojni nedostaci, pa su stoga *airlift* reaktori viđeni kao moguće rešenje.

2.2 *Airlift* reaktori sa spoljašnjom recirkulacijom

2.2.1 Opšti opis ALSR

Usled svoje jednostavne konstrukcije, odsustva pokretnih delova, dobrog mešanja i niskih utrošaka energije, *airlift* reaktori su u velikoj meri zastupljeni ne samo u biohemijskoj i farmaceutskoj industriji, već i u hemijskoj industriji kao apsorberi,

Airlift reaktori sa spoljašnjom recirkulacijom

striperi ili hemijski reaktori. Pored toga, naponi smicanja u ovim kontaktorima su mali, što ih čini poželjnim u procesima u kojima se koriste ćelije osetljive na smicanje.

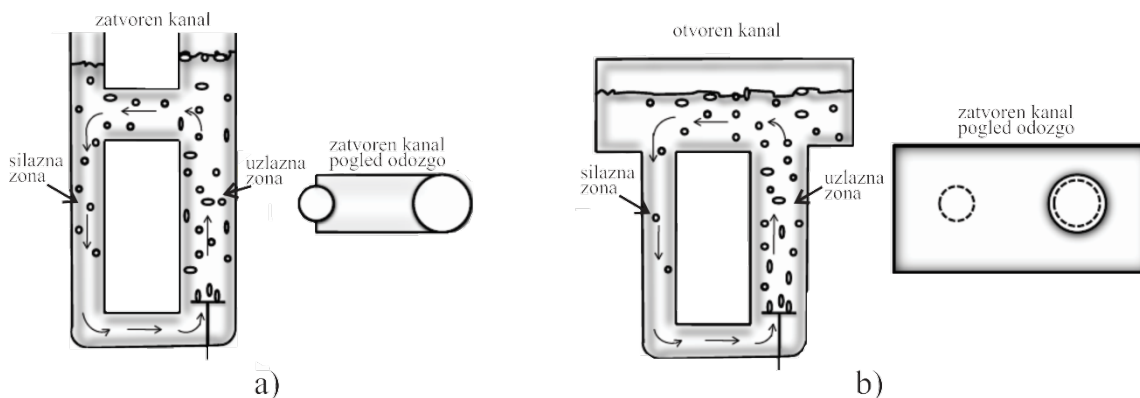
Sastoje se od četiri jasno definisane zone od kojih svaka ima specifične hidrodinamičke osobine:

- i. Uzlazna zona u kojoj se smeša gasa i tečnosti kreće naviše. Na dnu ove zone uvodi se gas. U uzlaznoj zoni je najveći sadržaj gasa te se i najveći deo kontakta između gasa i tečnosti odvija u ovoj zoni.
- ii. Silazna zona paralelna je uzlaznoj zoni s tim da se tečna faza kreće u suprotnom smeru, to jest naniže. Zahvaljujući delimičnom ili potpunom izdvajanju gasa pri vrhu reaktora, sadržaj gasa u silaznoj zoni je znatno niži što omogućava recirkulaciju tečnosti usled razlike u gustinama između uzlazne i silazne zone.
- iii. Separaciona zona povezuje uzlaznu i silaznu zonu pri vrhu reaktora i obezbeđuje izdvajanje gasa iz tečne faze. Njen oblik u velikoj meri utiče na hidrodinamičke karakteristike reaktora.
- iv. Dno služi da poveže uzlaznu i silaznu zonu. Konstruktivno rešenje dna takođe ima uticaja na hidrodinamiku *airlift* reaktora sa spoljašnjom recirkulacijom.

Usled neposredne blizine dve zone kroz koje cirkuliše tečnost u ALUR, prilikom rada sa većim brzinama tečnosti mogu da nastanu problemi jer uglavnom dolazi do uvlačenja mehurova gasa u silaznu zonu čime se znatno menjaju karakteristike reaktora. Za razliku od njih, ALSR omogućavaju bolje izdvajanje gasa, kao i bolju kontrolu brzine tečnosti a samim tim i ostalih parametara procesa usled olakšane ugradnje ventila u silaznu cev (Weiland i Onken, 1981). Najbitnija razlika između dva tipa *airlift* reaktora ogleda se upravo u većem rastojanju koje mehurovi gasa moraju da pređu u separatoru pri prelasku iz uzlazne u silaznu zonu ALSR u odnosu na ALUR, čime je verovatnoća izdvajanja mehurova gasa na vrhu reaktora mnogo veća. Ukoliko ipak dođe do uvlačenja mehurova gasa kod ALSR, to je najčešće svež vazduh koji bude uvučen usled turbulencije i pojave virova u separatoru tačno iznad silazne cevi.

Za razliku od ALUR, gde su moguća različita konstruktivna rešenja, kod ALSR ih ima manje, i razlikuju se samo na osnovu izvedbe zona koje povezuju uzlaznu i silaznu zonu, naročito separacione zone. Pravilnim izborom oblika separacione zone i dna u znatnoj meri se mogu poboljšati karakteristike *airlift* reaktora (Siegel i sar., 1986; Rujiruttanakul i Pavasant, 2011). Na slici 2.4 prikazane su dve moguće konfiguracije

separacione zone: tip zatvorenog i tip otvorenog kanala. Kao što se može uočiti, kod tipa zatvorenog kanala uzlazna i silazna zona spojene su separatorom u vidu horizontalne cevi dok su kod otvorenog kanala spojene pravougaonom posudom. Potpuno odvajanje gasa od tečnosti u separatoru uzrokuje smanjen prenos kiseonika ali, sa druge strane, omogućuje rad sa osetljivim mikroorganizmima, što nije slučaj ukoliko je separaciona zona tipa zatvorenog kanala.



Slika 2.4 Različita konstruktivna rešenja separacione zone ALSR. a) tip zatvorenog kanala i b) tip otvorenog kanala.

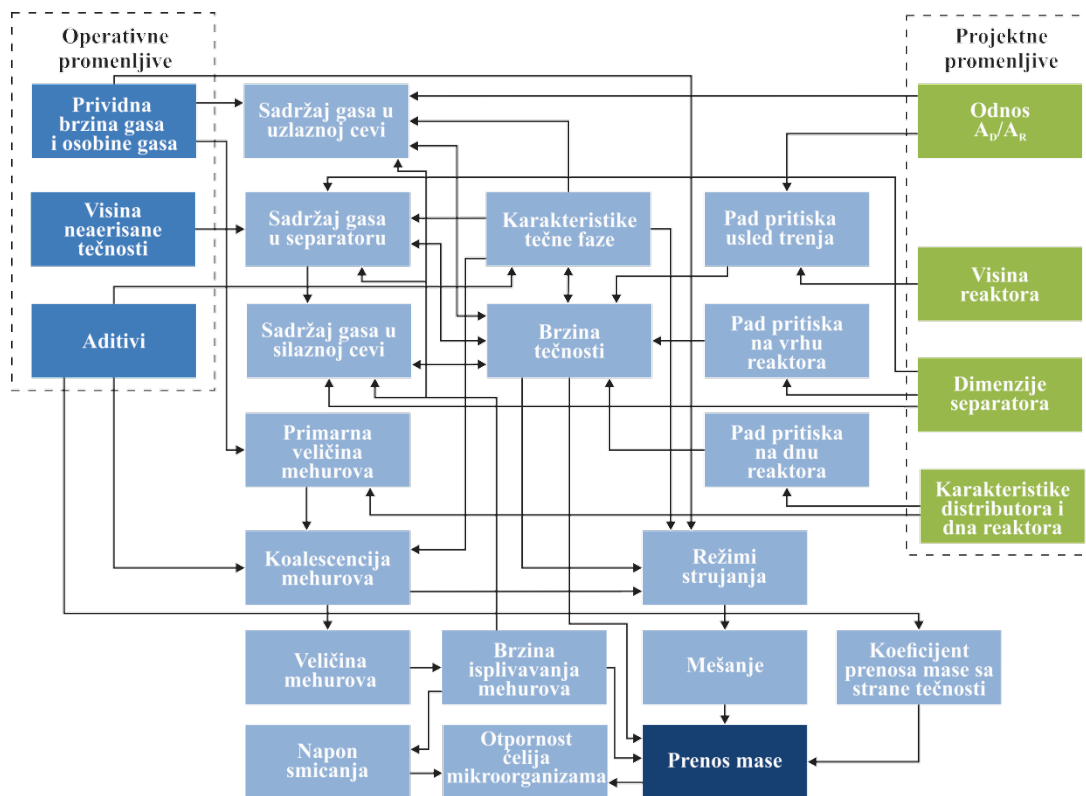
Iako se smatraju poboljšanim tipom kontaktora u odnosu na barbotажne kolone, ALSR su ipak ograničeni u određenim poljima. Naime, kao i barbotажne kolone, nisu pogodni za rad sa veoma viskoznim fluidima. Takođe, svaki ALSR ima definisanu minimalnu zapreminu tečne faze koja se mora održati kako bi se osigurala cirkulacija tečnosti u reaktoru. Pored toga, imaju lošiji prenos mase ne samo u odnosu na barbotажne kolone, već i u odnosu na ALUR usled manje recirkulacije gasa (Siegel i Robinson, 1992).

Pri opisivanju ponašanja ALSR uglavnom se koriste parametri kao što su protok gasa, sadržaj gasa, prividna brzina tečnosti, zapreminski koeficijent prenosa mase i mešanje (Russell i sar., 1994). Ove parametre određuju složene interakcije između potiska, inercije, trenja i hidrostatičkog pritiska (Weiland, 1984). Na slici 2.5 predstavljen je sveobuhvatni ilustrativni prikaz uticaja operativnih i projektnih promenljivih na hidrodinamičke i masenoprenosne karakteristike, formiran na osnovu radova Chisti (1989), Merchuk i Glutz (1999), i Benyahia i sar. (1996). Mogu se uočiti izuzetno složeni međudnosi između parametara koji utiču na efikasnost ALSR. Stoga je uspešno predviđanje ponašanja ALSR veoma komplikovano.

Upravo zbog toga, u literaturi postoji relativno mnogo radova posvećenih *airlift* reaktorima sa spoljašnjom recirkulacijom. Pregled dosadašnjih istraživanja prikazan je u

Airlift reaktori sa spoljašnjom recirkulacijom

tabeli 2.1, dok je u nastavku ovog potpoglavlja data detaljna analiza hidrodinamičkih i masenoprenosnih karakteristika ALSR.

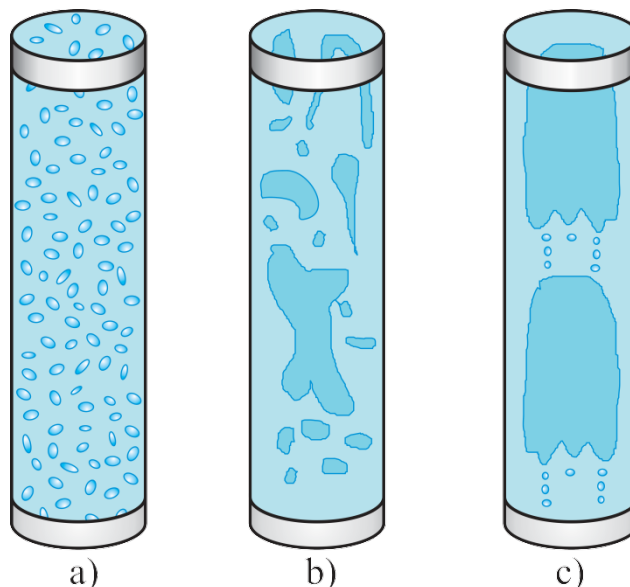


Slika 2.5 Međusobna zavisnost osnovnih hidrodinamičkih i masenoprenosnih parametara *airlift* reaktora (preuzeto iz Jones (2007))

2.2.2 Režimi toka u uzlaznoj zoni ALSR

Hidrodinamičke i masenoprenosne karakteristike *airlift* reaktora sa spoljašnjom recirkulacijom (sadržaj gasa, brzina tečnosti, međufazna površina gas-tečnost i zapreminski koeficijent prenosa mase) u velikoj meri zavise od postojećeg režima strujanja u uzlaznoj zoni. Za razliku od barbotaznih kolona, gde je prisutno nasumično kretanje tečnosti, u *airlift* reaktoru sa spoljašnjom recirkulacijom preovlađuje usmereno kretanje tečne faze koje vodi smanjenju vremena zadržavanja gasne faze, manjem sadržaju gasa, uniformnijoj radialnoj raspodeli sadržaja gasa i smanjenju koalescencije mehurova. S obzirom da se uzlazna zona ALSR ponaša kao vertikalna cev sa istostrujnim tokom gasa i tečnosti, u njoj se u zavisnosti od brzine gasa i tečnosti najčešće mogu javiti sledeći režimi toka:

- i. mehurast ili homogen tok,
- ii. vrtložno-turbulentan ili heterogen tok, i
- iii. klipni tok (slika 2.6).



Slika 2.6 Hidrodinamički režimi toka u uzlaznoj zoni. a) mehurast tok, b) heterogeni (turbulentni) tok i c) klipni tok.

Mehurast režim strujanja javlja se pri niskim protocima gasa. Ovu vrstu toka karakterišu mehurovi uniformnog prečnika sa pravilnim radijalnim rasporedom koji se podižu gotovo pravolinijski duž uzlazne cevi reaktora čime se ostvaruje veća međufazna površina za prenos mase. Brzina gasne faze je takva da izaziva malu turbulenciju ili do nje uopšte i ne dolazi. Stoga se ovaj tok odlikuje neznom interakcijom između mehurova, odnosno zanemarljivom koalescencijom (stapanjem) mehurova. Prema okvirnim podacima za sisteme vazduh-voda mehurast tok kod ALSR preovladava i pri prividnoj brzini gasa od 0,1 m/s, za razliku od barbotazne kolone gde se ta granica kreće negde oko 0,05-0,06 m/s (Vataji, 1986).

Usled porasta brzine gasa dolazi do intenzivnije interakcije između mehurova, koji sve češće koalesciraju, pa nastaje prelazni režim. Prelazni režim karakterišu mehurovi različitih veličina, koji se sa daljim rastom protoka gasa sve češće spajaju što dovodi do pojave vrtložno-turbulentnog režima. Učestalost velikih mehurova, koji se kreću velikim brzinama zajedno sa malim mehurovima, izuzetno je visoka u ovom režimu. Turbulencija je veoma izražena pa mehurovi često menjaju oblik, poprilično odudarajući od idealne sfere (Chisti i Moo-Young, 1987). Sadržaj gasa u turbulentnom režimu sporije raste sa porastom prividne brzine gasa u odnosu na homogen tok i brzina prenosa mase u određenom momentu počinje da stagnira. U ovom režimu pri velikim brzinama gasa nastaju mehurovi oblika sferične kape sa velikim brzinama isplivavanja.

Učestalost i veličina sferičnih kapa raste sa porastom protoka gasa. U uređajima manjih prečnika (do 0,15 m), naročito u viskozim tečnostima, sferične kape stabilizuju se zidovima uređaja, i ova pojava se definiše kao klipni tok. Bliže se određuje strujanjem

Airlift reaktori sa spoljašnjom recirkulacijom

uzastopnih segmenata klipnog toka (eng. *slug unit*) koji se sastoji od velikog mehura u obliku metka (u literaturi poznatog kao Taylor-ov mehur), zone padajućeg filma tečnosti koja okružuje mehur, i zone tečnosti sa klipnim tokom (eng. *liquid slug*) koju sačinjavaju vrtložna zona i zona tečnosti sa dispergovanim gasom (Chisti i Moo-Young, 1987).

Prilikom projektovanja industrijskih ALSR važno je precizno utvrditi granicu prelaza između režima, jer učinak reaktora u velikoj meri zavisi od režima strujanja u kom reaktor radi. Razlog tome su znatne promene hidrodinamičkih i masenoprenosnih osobina reaktora koje nastaju pri prelasku iz jednog u drugi režim strujanja. S obzirom da nije moguće unapred definisati opsege prividnih brzina gasa pri kojima dolazi do promene režima toka, jer pored prividne brzine gasa zavise i od karakteristika distributora, prečnika uzlazne cevi, odnosa površina poprečnog preseka silazne i uzlazne cevi, brzine tečne faze i fizičko-hemijskih karakteristika tečne faze, mnogi autori su istraživali režime strujanja u ALSR, pri tom koristeći različite kriterijume za njihovu karakterizaciju (Verlaan, 1987; Abashar i sar., 1998; Bendjaballah i sar., 1999; Al-Masry, 2004). U literaturi stoji da se prelazi između pojedinih režima mogu utvrditi na više načina: na osnovu promene nagiba krive na grafiku zavisnosti sadržaja gasa od prividne brzine gasa; primenom drift-fluks modela koji su Zuber i Findlay (1965) razvili na osnovu jediničnog fluksa toka a dalje koristili mnogi autori (Bendjaballah i sar., 1999; Carvalho i sar., 2000; Al-Masry, 2004); na osnovu promene nagiba na semi-log grafiku zavisnosti brzine tečnosti od prividne brzine gasa (Verlaan, 1987); kao i konduktometrijski ili vizuelno.

2.2.3 Pregled dosadašnjih saznanja o hidrodinamičkim karakteristikama ALSR

Imajući u vidu veoma značajan i komplikovan uticaj hidrodinamike na brzinu prenosa mase, detaljna karakterizacija hidrodinamičkih osobina je neophodna za uspešno projektovanje i upravljanje ovim uređajima.

2.2.3.1 Sadržaj gasa

Sadržaj gasa (ε_G) je bezdimenzioni parametar koji je višestruko značajan pri projektovanju *airlift* reaktora sa spoljašnjom recirkulacijom, pre svega jer od njega zavisi vreme zadržavanja u reaktoru, dok zajedno sa veličinom mehurova određuje međufaznu površinu po jedinici zapremine, a samim tim i efikasnost prenosa mase iz gasa u tečnost, kao i brzina cirkulacije tečnosti. Definiše se kao zapreminski udeo gasne faze u disperziji gas-tečno. Pregledom istraživanja vezanih za sadržaj gasa u ALSR,

može se zaključiti da na sadržaj gasa utiče nekoliko faktora od kojih su najznačajniji prividna brzina gasa, geometrijske karakteristike kolone, karakteristike distributora gasa i fizičke osobine tečnosti. Takođe, između sadržaja gasa i brzine tečnosti vladaju složeni međuodnosi pa se veoma često jedan od ova dva parametra izražava u funkciji od drugog (Jones, 2007).

Prividna brzina gasa (U_G) ima najveći uticaj na sadržaj gasa od prethodno navedenih faktora. U većini istraživanja uočena je sledeća zavisnost u vidu stepene funkcije:

$$\varepsilon_G \propto U_G^b \quad (2.1)$$

gde se sa porastom protoka gasa povećava i sadržaj gasa. Vrednost eksponenta b u velikoj meri zavisi od režima strujanja. Naime, uticaj prividne brzine gasa više je izražen u mehurastom toku, nego u vrtložno-turbulentnom, pa su i vrednosti eksponenta u izrazu 2.1 više. Razlog tome je što pri malim brzinama gasa porast prividne brzine gasa dovodi do pojave većeg broja mehurova, pri čemu ne dolazi do uvećanja njihovog srednjeg prečnika. Stoga, i sadržaj gasa naglo raste pri malim prividnim brzinama. S druge strane, pri većim brzinama gasa, porast sadržaja gasa sa brzinom gasa vidno je slabiji jer dolazi do koalescencije i formiranja velikih mehurova.

Sva dosadašnja ispitivanja na dvofaznim sistemima pokazala su da osobine tečnosti, kao što su viskoznost, površinski napon i jonska jačina tečnosti, takođe značajno utiču na hidrodinamiku u ALSR.

O uticaju nenjutnovskog karaktera tečne faze objavljeno je dosta publikacija (Vataji, 1986; Popović i Robinson, 1987b; Popović i Robinson, 1993; Al-Masry i Dukkan, 1998; Wu i sar., 2013). Veliko interesovanje posledica je nenjutnovskog karaktera korišćenih fermentacionih medijuma u biotehnološkim procesima čije ponašanje se može najpribližnije opisati rastvorima karboksimetilceluloze (CMC) u vodi (Vataji, 1986). Sadržaj gasa prvobitno raste sa porastom viskoznosti tečne faze da bi kasnije počeo da opada dostizanjem kritične vrednosti viskoznosti. Veći mehurovi koji se formiraju u viskoznijim tečnostima usled koalescencije dovode do opadanja sadržaja gasa. Međutim, sa porastom viskoznosti brzina isplivavanja mehurova opada usled povećanja fluidodinamičkih otpora, pa time dolazi i do porasta sadržaja gasa. Zbog toga su u literaturi uočeni radovi u kojima su u viskoznim tečnostima postignute i više i niže vrednosti ε_G u zavisnosti od preovladavajućeg uticaja. Wu i sar. (2013) detaljno su ispitali uticaj viskoznosti tečnosti na hidrodinamiku ALSR. Autori su koristili različite

koncentracije karboksimetilceluloze kako bi ostvarili viskoznost tečne faze od 1,00 do 51,25 mPas. Uočili su da sa porastom viskoznosti tečne faze sadržaj gasa prvobitno raste a zatim počinje da opada dostizanjem kritične vrednosti viskoznosti od 3,7 mPas.

S druge strane, u nekim biotehnološkim procesima koriste se fermentacione tečnosti u kojima ima materija koje dovode do smanjenja tendencije ka koalescenciji mehurova, kao što su na primer alkoholi. Iz tog razloga, ispitivan je i dodatak malih količina alifatičnih alkohola u vodu, kojim se smanjuje površinski napon tečnosti i suzbija koalescencija mehurova gasa, a samim tim i bitno menjaju hidrodinamička svojstva *airlift* reaktora sa spoljašnjom recirkulacijom: smanjuje se srednji prečnik mehurova gasa a zatim opada i brzina isplivavanja mehurova. Na kraju, sadržaj gasa raste u odnosu na sadržaj gasa pri radu sa vodom, što su potvrdili brojni autori u svojim istraživanjima (Weiland i Onken, 1981; Pošarac, 1988; Al-Masry i Dukkan, 1997; Miyahara i Nagatani, 2009; Gharib i sar., 2013). Po Keitelu (1978) sadržaj gasa raste sa porastom koncentracije alkohola samo do određene koncentracije, koja se u tom slučaju naziva graničnom; dalji porast koncentracije dovodi do zanemarljivog porasta sadržaja gasa.

Takođe treba uzeti u obzir i uticaj distributora gasa na vrednosti sadržaja gasa, jer od karakteristika distributora zavisi primarna raspodela veličine mehurova (Snape i sar., 1995; Bendjaballah i sar., 1999; Lin i sar., 2004). Međutim, u zavisnosti od koalescentnih sposobnosti tečne faze, srednji prečnik mehurova u koloni može se značajnije razlikovati od srednjeg prečnika mehurova formiranih na distributoru. Samim tim, uticaj distributora gasa različitih tipova zavisi od karakteristika tečne faze i značajniji je u sistemima u kojima je sprečena koalescencija mehurova u odnosu na sisteme u kojima dolazi do koalescencije mehurova (Chisti, 1989). Najčešće korišćeni tipovi distributora gasa u biohemijским procesima su statički distributori (jednostruki uvodnici, perforirane ploče i prstenovi, i sinter ploče). Izrada, ugradnja i primena jednostrukih uvodnika i perforiranih ploča i prstenova veoma je jednostavna, dok sinter ploče zahtevaju veće troškove izrade, sklone su začepljenjima te mogu biti izvor kontaminacije, i teže su za korišćenje (Chisti i Moo-Young, 1987).

Uticaj distributora gasa na lokalne hidrodinamičke karakteristike ALSR ispitivali su Lin i sar. (2004). Poređenjem sinter ploče i perforirane ploče uočili su da se pomoću sinter ploče ostvaruje mnogo bolja radijalna raspodela gasa. Cao i sar. (2008) sprovedli su veoma opsežno istraživanje sa četiri različita distributora, koje je pokazalo da pri prividnim brzinama gasa manjim od 0,025 m/s geometrijske karakteristike distributora

veoma utiču na sadržaj gasa u uzlaznoj zoni. Slične zaključke izveo je i Kojić (2016), pri čemu je granica prividne brzine gasa, iznad koje nije uočen uticaj distributora gasa u sistemu vazduh-voda, iznosila 0,1 m/s. U dvofaznim sistemima koji inhibiraju pojavu koalescencije (rastvori alkohola), primenom efikasnijih distributora gasa kao što su sinter ploča i perforirana ploča, postignute su znatno veće vrednosti sadržaja gasa u odnosu na jednostruki uvodnik i iznad pomenute granice prividne brzine gasa.

2.2.3.2 Brzina tečnosti

S obzirom da cirkulacija tečnosti inicira osnovne razlike u ponašanju *airlift* reaktora u odnosu na barbotажne kolone, veoma važan parametar za hidrodinamiku ovih uređaja, pored sadržaja gasa, jeste i brzina tečnosti (Chisti, 1989; Merchuk i Glutz, 1999). Brzina tečnosti zavisi od brojnih parametara, uključujući između ostalih prividnu brzinu gasa, sadržaj gasa, geometrijske karakteristike reaktora i osobine tečne faze. Sa druge strane, utiče na sadržaj gasa u uzlaznoj i silaznoj cevi, režime strujanja, vreme mešanja, srednje vreme zadržavanja gasne faze, međufaznu površinu i na koeficijente prenosa mase i toplote. Stoga, regulisanjem brzine cirkulacije može u znatnoj meri da se utiče na ukupni učinak i efikasnost ALSR (Weiland i Onken, 1981).

Zavisnost brzine tečnosti od prividne brzine gasa takođe se može izraziti zavisnošću tipa $U_L \propto U_G^b$. Eksponent b zavisi od režima strujanja i geometrije reaktora, dok konstantu proporcionalnosti bliže određuju režim strujanja i osobine tečnosti. Shodno tome, Weiland i Onken (1981) su zapazili pri radu sa različitim tečnim fazama (voda, rastvori 2-propanola i saharoze) da vrednosti eksponenta b iznose 0,4 bez obzira na korišćenu tečnu fazu.

Pored prividne brzine gasa, na brzinu tečnosti utiče priroda tečne faze. Mnogi autori su došli do zaključka da brzina tečnosti opada sa porastom viskoznosti (Popović i Robinson, 1984; Vataji, 1986; Popović i Robinson, 1988). Popović i Robinson (1984; 1988) ispitali su rad ALSR koristeći nenjutnovski rastvor CMC ($\mu_a=0,015-0,5$ Pa·s) gde su uočili da sa porastom prividnog viskoziteta opada prividna brzina tečnosti u uzlaznoj cevi. Do zaključka da brzina tečnosti opada sa porastom viskoznosti došli su i drugi istraživači (Vataji, 1986; Li i sar., 1995; Shamlou i sar., 1998). Opadanje brzine direktna je posledica većih gubitaka usled trenja koji nastaju sa povećanjem viskoznosti. Međutim, viskoznost utiče i posredno na brzinu tečnosti tako što snižava pogonsku silu za recirkulaciju utičući na raspodelu veličine mehurova gasa u koloni. S druge strane, u ALUR je pri radu sa rastvorima koji sadrže male količine polimera koji smanjuju trenje, kao što je rastvor ksantana, uočen porast brzine tečnosti u poređenju sa vodom.

Airlift reaktori sa spoljašnjom recirkulacijom

Međutim, pri većim koncentracijama polimera brzina tečnosti ipak opada sa porastom viskoznosti (Fields i Slater, 1983).

U prisustvu alkohola kao inhibitora koalescencije, sadržaj gasa u uzlaznoj cevi raste, samim tim raste i pogonska sila za cirkulaciju pa se mogu očekivati veće brzine tečnosti. Do takvog zaključka došla je većina autora koja se bavila ovom tematikom (Weiland i Onken, 1981; Pošarac, 1988; Kojić, 2016). Međutim, u rastvorima alkohola u velikom broju se formiraju sitni mehurovi koji mogu da izazovu veće otpore proticanju tečnosti usled čega se snižava brzina tečnosti. Stoga su neki autori uočili drugačije ponašanje brzine tečnosti sa dodatkom alkohola. Naime, tokom ispitivanja hidrodinamičkih i masenoprenosnih karakteristika ALSR u rastvorima metanola, etanola i *n*-propanola različitih koncentracija, Miyahara i Nagatani (2009) nisu uočili uticaj dodatka alkohola na brzinu cirkulacije tečnosti u poređenju sa vodom. Slični rezultati dobijeni su u radu Al-Masry i Dukkan (1997). Razlog za ovakvo ponašanje verovatno su geometrijske karakteristike korišćenih reaktora, koje su uslovile da nijedan od dva uticaja ne preovlada.

S obzirom da distributor gasa ima uticaj na sadržaj gasa, koji se ispoljava i na pogonsku silu za recirkulaciju tečnosti, karakteristike distributora gasa utiču i na vrednosti brzine tečne faze. Uticaj tipa distributora na sadržaj gasa u ALSR, ispitivali su Bendjaballah i sar. (1999). Sa vodom kao tečnom fazom, utvrdili su da se korišćenjem distributora sa više otvora ostvaruju veće brzine tečne faze, u poređenju sa jednostrukim uvodnikom. Prema ovim autorima, ostvarene razlike u vrednostima brzine tečne faze između ova dva uvodnika istog su reda veličine za opseg prividnih brzina ispitivanih u njihovom radu. U radu Kojića (2016), primenom perforirane i sinter ploče postignute su, zavisno od osobina tečne faze, od 12 do 20% veće vrednosti brzine tečne faze, u odnosu na jednostruki uvodnik.

2.2.4 Pregled dosadašnjih saznanja o masenoprenosnim karakteristikama ALSR

U brojnim procesima korišćenim u industrijskim postrojenjima (hidrogenacija, oksigenizacija, destilacija, hlorinacija, aerobna fermentacija i dr.) brzina prenosa mase između tečne i gasne faze određuje efikasnost tih procesa. Na osnovu teorije filma, brzina prenosa mase gasa (kiseonika ili ugljendioksida) iz gasne u tečnu fazu po jedinici zapremine reaktora računa se na osnovu sledećeg izraza:

$$\frac{dC_L}{dt} = k_L a (C_L^* - C_L) \quad (2.2)$$

gde su k_L koeficijent prenosa mase sa strane tečne faze, a ukupna međufazna površina gas-tečno, a C_L i C_L^* koncentracija rastvorenog gasa u tečnosti odnosno maksimalno moguća (tj. ravnotežna) koncentracija rastvorenog gasa u tečnoj fazi. Ovaj podatak veoma je bitan kod kontaktora gas-tečno, naročito kod bioreaktora gde je potrebno obezbediti da brzina prenosa mase ne zaostaje za brzinom ukupne potrošnje kiseonika od strane ćelija mikroorganizama, jer u suprotnom može doći do njihovog izumiranja.

Pošto je određivanje k_L izuzetno komplikovano, radi jednostavnijeg određivanja prenosa mase iz gasne u tečnu fazu uobičajeno je da se umesto k_L i a računa njihov proizvod $k_L a$ koji se naziva zapreminski koeficijent prenosa mase.

2.2.4.1 Zapreminski koeficijent prenosa mase

S obzirom da direktno utiče na efikasnost *airlift* reaktora sa spoljašnjom recirkulacijom, $k_L a$ spada u najvažnije parametre ovih uređaja. Iz tog razloga, brojni autori su se posvetili ispitivanju $k_L a$ u ALSR. U odnosu na barbotажne kolone i ALUR, *airlift* reaktori sa spoljašnjom recirkulacijom tečnosti ostvaruju manje koeficijente prenosa mase (Chisti i Moo-Young, 1987). Kao što sadržaj gasa pored prividne brzine gasa zavisi i od prividne brzine tečnosti, tako što opada sa njenim porastom, isto važi i za zapreminski koeficijent prenosa mase (Bello i sar., 1985a; b). ALSR ostvaruju poprilično velike brzine tečnosti pa je prenos mase kod njih slabiji, ne samo u poređenju sa barbotажnim kolonama već i u poređenju sa ALUR.

Pregledom dosadašnjih istraživanja može se uočiti da se vrednosti zapreminskog koeficijenta prenosa mase u velikoj meri razlikuju. Ipak, većina autora zapazila je da zapreminski koeficijent prenosa mase raste sa porastom prividne brzine u vidu stepene zavisnosti, kao u slučaju sadržaja gasa (izraz 2.1) i brzine tečne faze.

U viskoznim rastvorima karboksimetilceluloze postižu se manje vrednosti zapreminskog koeficijenta prenosa mase, ne samo usled smanjenja a , već i usled nižeg k_L zbog manje difuzivnosti (Kilonzo i Margaritis, 2004). Uticaj prividnog viskoziteta na $k_L a$ dosta je snažniji od njegovog uticaja na ε_G (Al-Masry i Dukkan, 1998). Naime, sa porastom koncentracije viskoznog rastvora (tj. prividnog viskoziteta) udeo velikih mehurova oblika sferične kape raste čime se smanjuje a . Kao rezultat, vrednosti $k_L a$ znatno su manje u viskoznim rastvorima, u poređenju sa vodom (Vataji, 1986; Kawase i

Airlift reaktori sa spoljašnjom recirkulacijom

Hashiguchi, 1996; Al-Masry i Dukkan, 1998). Zbog toga, u industrijskim uslovima treba izbegavati pojavu sferičnih kapa kako bi se osvario efikasniji prenos mase.

Uticao dodatka alkohola, kao površinski aktivnih materija, na zapreminski koeficijent prenosa mase je dvojak. S jedne strane, u rasvorima alkohola suzbijena je koalescencija mehurova pa su prisutni sitniji mehurovi, usled čega se postižu veće vrednosti specifične međufazne površine. S druge strane, dodatak alkohola povećava otpor prenosu kiseonika u tečnu fazu, čime se snižava koeficijent prenosa mase sa strane tečne faze (Koide i sar., 1985). Stoga, da li će doći do povećanja ili smanjenja $k_L a$ zavisi od jačine uticaja dodatka alkohola na k_L i a . Većina autora je prilikom dodatka nižih alkohola (do *n*-butanola) zapazila povećanje $k_L a$ u poređenju sa vodom (Pošarac, 1988; Miyahara i Nagatani, 2009; Kojić, 2016) usled povećanja a . Za razliku od njih, u rastvoru *n*-oktanola, u kom dolazi do smanjenja k_L , Al-Masry i Dukkan (1997) su uočili niže vrednosti $k_L a$.

Prividna brzina gasa igra veliku ulogu prilikom određivanja intenziteta uticaja karakteristika distributora na zapreminski koeficijent prenosa mase. Istraživanja Miyahara i sar. (2011) o uticaju tipa distributora gasa na prenos mase u ALSR pokazala su da distributor gasa ima značajan uticaj na $k_L a$ samo pri manjim protocima gasa kada je veličina mehurova određena veličinom mehurova formiranih na samom distributoru. Pri većim protocima gasa, usled intenzivnije koalescencije mehurova gasa uticaj distributora gasa dosta je slabiji. Kao što je izloženo tokom opisivanja hidrodinamičkih karakteristika ALSR, uticaj distributora gasa je izraženiji u tečnostima koje inhibiraju koalescenciju, te je pored prividne brzine gasa neophodno uzeti u obzir i karakteristike tečne faze radi procene uticaja distributora gasa na zapreminski koeficijent prenosa mase.

Poboljšanje brzine prenosa mase, a samim tim i bolja efikasnost ALSR, ostvaruje se povećanjem ukupne međufazne površine i/ili povećanjem koeficijenta prenosa mase. Naime, smanjenjem srednje veličine mehurova gasa, uniformnijim i višim radijalnim profilima sadržaja gasa dolazi do porasta a čime se ostvaruje bolji kontakt između faza (Luo i sar., 2013). Pored toga, intenzivna turbulencija deluje dvojako na $k_L a$. S jedne strane, podstiče prenos mase tako što povećava k_L , destabilizuje velike mehurove i omogućava učestalu regeneraciju površine mehurova (Zhang i sar., 2005a). S druge strane, sa porastom brzine tečne faze dolazi do smanjenja vremena boravka gasne faze te se smanjuje sadržaj gasa, a samim tim i a .

Tabela 2.1 Pregled dosadašnjih istraživanja u ALSR

Referenca	Geometrijske karakteristike	Tečna faza	Ispitivane veličine
Abashar (2002)	$D_R=0,225$ m; $D_D=0,225$ m; $V=725$ dm ³ ; $H_{R,D}=6,75$ m	voda	ε_{GR} , U_{LR}
Akita i sar. (1988)	$D_R=0,148$ m; $D_D=0,148$ m; $V=496$ dm ³ ; $H_{R,D}\approx 8$ m	voda, 5 i 8 kg/m ³ CMC, 0,05% <i>n</i> -heptanol	ε_{GR} , frikcionni faktor
Al-Masry i Dukkan (1997)	$D_R=0,225$ m; $D_D=0,225$ m; $V=700$ dm ³ ; $H_L=6,2$ m	voda, 30–100 ppm polipropilen glikol i <i>n</i> -oktanol	ε_{GR} , ε_{GD} , W_{LD} , k_{La}
Al-Masry i Dukkan (1998)	$D_R=0,225$ m; $D_D=0,225$ m; $V=700$ dm ³ ; $H_L=6,2$ m	0,01–0,2% ksantan, CMC	ε_{GR} , ε_{GD} , W_{LD} , k_{La}
Al-Masry (2001)	$D_R=0,15$ m; $D_D=0,1$ m; $H_L=2,5$ m; $V=150$ dm ³	0,064–1,01 mas.% ksantan i CMC	ε_{GR} , ε_G , γ
Bello i sar. (1980)	$D_R=0,152$ m; $H_L=1,8$ m; $0,11\leq A_D/A_R\leq 0,69$	voda, 0,15 M NaCl	W_{LR} , ε_{GR} , k_{La}
Bello i sar. (1985a)	$D_R=0,152$ m; $H_L=1,8$ m; $0,11\leq A_D/A_R\leq 0,69$; $H_{R,D}=1,55$ m	voda, 0,15 M NaCl	ε_{GR} , ε_{GD} , k_{La}
Bello i sar. (1985b)	$D_R=0,152$ m; $H_L=1,8$ m; $0,11\leq A_D/A_R\leq 0,69$; $H_{R,D}=1,55$ m	voda, 0,15 M NaCl	k_{La}
Bendjaballah i sar. (1999)	$D_R=0,1$ m; $D_D=0,057$ m; $H_R=2,7$ m	voda	ε_{GR} , W_{LR} , režimi toka
Bentifraouine i sar. (1997)	$D_R=0,194$ m; $D_D=0,093$ m; $1\leq H_L\leq 1,6$ m	voda	W_{LR} , ε_{GR}
Benyahia i sar. (1996)	$D_R=0,1$ m; $D_D=0,1$ m; $H_{R,D}=1,73$ m;	voda, 0,15 mol/L NaCl, 0,5 mas.% CMC	k_{La}
Benyahia i Jones (1997)	$D_R=0,1$ m; $D_D=0,1$ m; $H_{R,D}=1,73$ m; $V=107,84$ dm ³	voda	k_{La} , ε_{GR}
Cao i sar. (2008)	$D_R=0,47$ m; $D_D=0,08$ m; $H_{R,D}=2,5$ m	voda	W_{LD} , ε_{GR} , Pe
Carvalho i sar. (2000)	$D_R=0,23$ m; $D_D=0,15$ m; $H_R=3,5$ m	voda, 0,1 vol.% <i>n</i> -butanol	ε_{GR} , W_{LD}
Choi (2001)	$D_R=0,149$ m; $H_R=1,782$ m; $0,049\leq D_D\leq 0,108$ m otvoreni tip separacione zone	voda	ε_{GR} , ε_{GD} , W_{LR} , t_{mix} , k_{La}

Nastavak tabele 2.1

Referenca	Geometrijske karakteristike	Tečna faza	Ispitivane veličine
Choi (2002)	$D_R=0,149$ m; $H_R=1,782$ m; $0,049 \leq D_D \leq 0,108$ m zatvoreni tip separacione zone	voda	ε_{GR} , ε_{GD} , W_{LR} , t_{mix} , t_c
Dhaouadi i sar. (1997)	$D_R=0,15$ m; $D_D=0,081$ m; $H=6$ m	voda	$k_L a$, koeficijent aksijalne disperzije
Freitas i sar. (1999)	$D_R=0,158$ m; $D_D=0,05$ m; $H=2,07$ m; $V=60$ dm ³	voda, voda+kalcijum alginatne kuglice	ε_{GR} , W_{LR}
Gavrilescu i Tudose (1997)	$D_R=0,03$ m; $0,01 \leq D_D \leq 0,03$ m; $H=1,16$ m	voda	t_{mix} , W_{LR} , t_c , Bo
Gharib i sar. (2013)	$D_R=0,1$ m; $D_D=0,07$ m; $H_R=1,7$ m; $H_L=1,215$ m	voda, 0,25–1 vol.% metanol; etanol; <i>n</i> -propanol i <i>n</i> -butanol	ε_{GR} , ε_{GD} , a , k_L , k_{LA} , Sh
Ghirardini i sar. (1992)	$0,025 \leq D_R \leq 0,1$ m; $A_D/A_R=1$; $H_{R,D}=2$ m	voda	W_L , ε_G , a
Hsu i Dudukovic (1980)	2 cm $\leq D \leq 4,5$ cm; $38 \leq H/D \leq 90$;	$800 \leq \rho_L \leq 1500$ kg/m ³ , $0,8 \leq \mu_L \leq 56$ cP, $0,029 \leq \sigma \leq 0,073$ N/m,	ε_G , W_L
Jones i Heindel (2010)	$D_R=0,1$ m; $D_D=0,025$ m; $H_{R,D}=2,4$ m	voda	ε_{GR} , W_{LR}
Kawase i Hashiguchi (1996)	$D_R=0,155$ m; $0,07 \leq D_D \leq 0,11$ m; $0,6 \leq H_D \leq 0,8$ m	voda, rastvori glicerina; dektroze; ksantana i CMC	$k_L a$
Kemblowski i sar. (1993)	$D_{R,D}=0,1$ i $0,2$ m; $A_D/A_R=1$; $H=1,95$ i $7,18$ m	voda, rastvori glikola; šećera; CMC	ε_{GR} , U_{LR}
Kiambi i sar. (2011)	$D_R=0,094$ m; $D_D=0,050$ m; $H_L=1,67$ m; $V=16,5$ dm ³	voda	radijalni profil ε_{GR} , d_{32} , W_{LR}
Kojić i sar. (2015)	$D_R=0,054$ m; $D_D=0,025$ m; $H_R=2$ m; $V=11,2$ dm ³	voda, 0,15% etanol, 0,011% <i>n</i> -butanol, 0,0051% <i>n</i> -heksanol	ε_{GR}
Kojić (2016)	$D_R=0,054$ m; $D_D=0,025$ m; $H_R=2$ m; $V=11,2$ dm ³	voda, 0,46% etanol, 0,011% <i>n</i> -butanol, 0,0051% <i>n</i> -heksanol	$k_L a$, ε_{GR} , ε_{GD} , W_{LD}
Li i sar. (1995)	$D_R=0,09$ m; $D_D=0,152$ m; $D_S=0,186$ m; $H=3,9$ m	1–4% CMC	ε_{GR} , ε_{GD} , t_c , W_{LR} , $k_L a$
Lin i sar. (2004)	$D_R=0,23$ m; $D_D=0,19$ m; $H_R=2$ m; $V=11,2$ dm ³	voda	radijalni profil ε_{GR} , d_{32} , brzina isplivanja mehurova

(nastavak)

Nastavak tabele 2.1

Referenca	Geometrijske karakteristike	Tečna faza	Ispitivane veličine
Liu i sar. (2008)	$D_R=0,1$ m; $D_D=0,1$ m; $H_R=3,2$ m; $H_D=2,8$ m	voda+praškasti katalizator FCC	ε_{GR} , W_{LR} , koeficijent aksijalne disperzije
Merchuk (1986)	$H=2,5$ m; dimenzije poprečnog preseka $0,15 \times 0,015$ m	voda, 7,9 mas.% Na_2SO_4 , 23,7 mas.% glicerol	ε_G , W_L
Milivojević (2011)	$26 \text{ mm} \leq D_R \leq 44 \text{ mm}$; $26 \text{ mm} \leq D_D \leq 44 \text{ mm}$; $0,349 \leq A_D/A_R \leq 2,86$; $0,85 \leq V \leq 6 \text{ dm}^3$	voda+kalcijum alginatne čestice	ε_{GR} , t_{mix} , t_c , W_{LD}
Miyahara i Nagatani (2009)	$D_R=0,14$ m; $D_D=0,14$ m; $H_{R,D}=2,67$ m	voda, 0,01–1 mas.% metanol i etanol, 0,002–0,5 mas.% <i>n</i> -propanol	ε_{GR} , d_{32} , W_{LR} , a , k_L , $k_L a$
Miyahara i sar. (2011)	$D_R=0,14$ m; $D_D=0,14$ m; $H_{R,D}=2,67$ m	voda, 0,01–1 mas.% metanol i etanol, 0,002–0,5 mas.% <i>n</i> -propanol	$k_L a$
Popović i Robinson (1987a)	$D_R=0,15$ m; $D_D=0,05$ i $0,1$ m; $H=1,88$ m	vodeni rastvor Na_2SO_3	ε_{GR} , d_{32} , W_{LR} , a
Popović i Robinson (1987b)	$D_R=0,15$ m; $D_D=0,05$ i $0,1$ m; $H=1,88$ m	0,5–1,5 mas.% CMC	W_{LR} , ε_{GR} , ε_{GD} , a
Popović i Robinson (1988)	$D_R=0,15$ m; $D_D=0,05$; $0,075$ i $0,1$ m; $H=1,88$ m	0,5–1,5 mas.% CMC, 51,9 mas.% saharoze	W_{LR} , d_{32} , a , ε_{GR}
Popovic i Robinson (1989)	$D_R=0,15$ m; $D_D=0,05$; $0,075$ i $0,1$ m; $H=1,88$ m	voda, 0,5–1,5 mas.% CMC, 51,9 mas.% saharoze	ε_{GR} , $k_L a$, W_{LR}
Pošarac (1988)	$D_R=0,1$ m; $D_D=0,1$ m; $H_{R,D}=2,8$ m; $V=80 \text{ dm}^3$	voda, 0,5–5 mas.% metanol, 0,5 mas.% etanol; <i>n</i> -propanol i <i>n</i> -butanol	ε_{GR} , W_{LD} , $k_L a$
Rujiruttanakul i Pavasant (2011)	$D_R=0,104$ m; $D_D=0,054$ m; $H_{R,D}=2$ m	voda	ε_{GR} , ε_{GD} , W_{LD} , $k_L a$
Sarkar i sar. (2008)	$D_R=0,2199$ m; $H_R=1,82$ m	voda	ε_{GR} , W_{LD} , profil pritiska
Shamlou i sar. (1998)	$D_R=0,095$ m; $D_D=0,06$ m; $V=35 \text{ dm}^3$	voda, 0,05–0,6 mas.% CMC	ε_{GR} , U_{LR} , γ
Sivasubramanian i sar. (2008)	$D_{R,D}=0,084$ m; $H_{R,D}=2,6$ m	30–50 vol.% glicerol, 0,1–0,3 mas.% CMC	$k_L a$

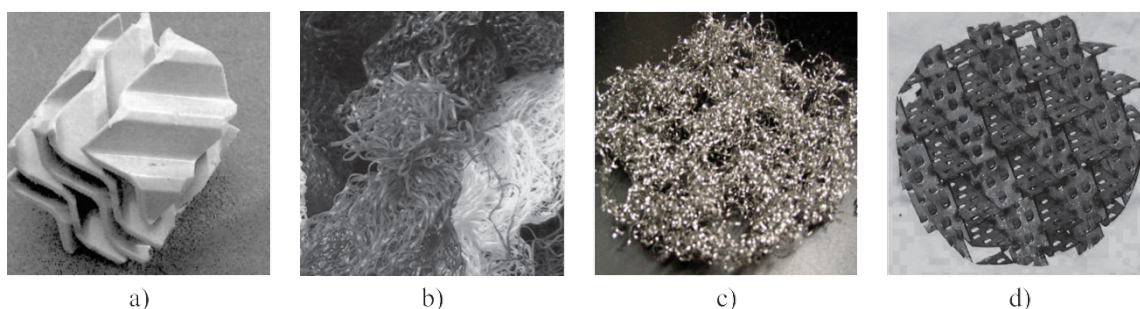
Nastavak tabele 2.1

Referenca	Geometrijske karakteristike	Tečna faza	Ispitivane veličine
Snape i sar. (1995)	$D_R=0,158$ m; $D_D=0,05$ m; $H=2,62$ m; $V=65$ dm ³	voda, 0,5–8 mas.% saharoza, 0,01–0,2 kmol/m ³ NaCl; KCl; CaCl ₂ ; Na ₂ SO ₄ i MgSO ₄	ε_{GR} , W_{LD}
Utiger i sar. (1999)	$D_R=0,094$ m; $D_D=0,05$ m; $H=1,79$ m	voda	radijalni profil W_{LD} , ε_{GR} , d_{32}
Vataji (1986)	$D_R=0,1$ m; $D_D=0,1$ m; $H_{R,D}=2,5$ m; $H_L=2,65$ m	voda, 1–3 mas.% CMC	ε_{GR} , W_{LD} , $k_L a$, St
Verlaan (1987)	$D_R=0,2$; $D_D=0,1$; $A_D/A_R=0,25$; $H_{R,D}=3,23$	voda+KCl, voda	ε_G , Bo , W_L , t_{mix} , t_c , K_f
Vial i sar. (2002)	$D_R=0,15$ m; $D_D=0,08$ m; $H=6$ m; $H_L=2,65$ m	voda	ε_{GR} , W_{LD} , d_{32} , radijalni profili ε_{GR} , d_{32} , W_{LD}
Vial i sar. (2005)	$D_R=0,1$ i $0,15$ m; $D_D=0,05$ i $0,08$ m; $H=2,75$ i 6 m; $V=42$ i 156 dm ³	voda	ε_{GR} , W_{LD} , koeficijent aksijalne disperzije
Wang i sar. (2003)	$D_R=15$ mm; $D_D=9$ mm; $H_L=65$ mm	voda+supendovane gel čestice glukozne oksidaze	ε_{GR} , W_{LR} , $k_L a$, $k_L a_L$
Weiland i Onken (1981)	$D_R=0,1$ m; $D_D=0,05$ m; $H_R=8,5$ m	voda, rastvori 2-propanola; saharoze; CMC i NaCl	ε_G , W_L , ΔP , $k_L a$, Bo , t_{mix}
Wu i sar. (2013)	$D_{R,D}=0,09$ m; $D_S=0,28$ m; $H=1,8$ m; $H_L=1,5$ m	rastvori CMC	radijalni profil d_{32} , ε_{GR} , a , brzina isplivavanja mehurova
Yazdian i sar. (2009)	$0,03$ m $\leq D_R \leq 0,09$ m; $D_D=0,03$ m; $H_R=2,2$ m; $3 \leq V \leq 22$ dm ³ ;	fermentacioni medijum	ε_G , W_{LD} , t_{mix} , t_c , Bo , $k_L a$
Zhang i sar. (2005b)	$D_R=0,1$ m; $D_D=0,1$ m; $H_R=3,2$ m; $H_D=2,75$ m	voda	W_{LD}

2.3 Modifikovani *airlift* reaktori

Usled sve učestalijih zahteva za poboljšanjem efikasnosti uređaja u hemijskoj i biohemijskoj industriji, veliki broj istraživačkih radova bavi se pronalaskom rešenja koja bi omogućila veće brzine prenosa mase u *airlift* reaktorima (Chisti i sar., 1990). Kao što je rečeno, uvećanje specifične međufazne površine i/ili koeficijenta prenosa mase omogućuje poboljšanje brzine prenosa mase.

U poslednje vreme, veoma su česte modifikacije unutrašnjosti ALUR i ALSR s ciljem da se poboljšaju hidrodinamičke i masenoprenosne karakteristike ovih uređaja. U literaturi se mogu naći podaci o različitim umecima, korišćenim kako bi se postigao odgovarajući otpor proticanju tečnosti i bolja disperzija gasne faze, i time poboljšale karakteristike samog reaktora. Možemo ih svrstati u nepokretne kao što su pregrade (Lin i sar., 1976; Vorapongsathorn i sar., 2001), perforirane ploče (Krichnavaruk i Pavasant, 2002; Luo i sar., 2013), statički mešači (Chisti i sar., 1990; Goto i Gaspillo, 1992; Gavrilesco i sar., 1997), punjenja (Meng i sar., 2002; Nikakhtari i Hill, 2005a; Hamoodur-Rehman i sar., 2012) ili specijalno konstruisani umeci (Zhang i sar., 2005a; Mohanty i sar., 2007; Zhang i sar., 2012; Räsänen i sar., 2016), i pokretne umetke kao što su mehanički impeleri (Gibbs i Seviour, 1998; Chisti i Jauregui-Haza, 2002; de Jesus i sar., 2014). U tabelama 2.2 i 2.3 dat je pregled dosadašnjih istraživanja uticaja ugradnje umetaka u ALSR, odnosno ALUR. Neki od korišćenih umetaka prikazani su na slici 2.7.



Slika 2.7 Različiti tipovi umetaka. a) statički mešač SMV-12, b) punjenje od tkanog najlona, c) mrežasto punjenje od nerđajućeg čelika i d) specijalno konstruisane perforirane ploče

Lin i sar. (1976) ispitali su učinak ALSR sa umetnutim kosim pregradama pod uglom od 30° uz zid uzlazne cevi u toku proizvodnje jednoćelijskih proteina. Osnovna namena ovakve konfiguracije je da dođe do razbijanja mehurova gasa u kontaktu sa kosim pregradama. Iako je ugradnjom kosih pregrada produženo vreme mešanja i vreme

cirkulacije (30-80%), značajno je poboljšán prenos mase a samim tim ostvaren je veći prinos proizvoda.

Razbijanje mehurova u *airlift* reaktorima može se ostvariti i primenom statičkih mešača (tj. promotora turbulencije). Iz tog razloga, Chisti i sar. (1990) ispitali su uticaj ugradnje dva statička mešača (slika 2.7a) u uzlaznu cev na masenoprenosne osobine ALSR. Uočili su da primena statičkih mešača dovodi do razbijanja velikih mehurova čime je ostvareno značajno poboljšanje zapreminskog koeficijenta prenosa mase. Pored rastvora NaCl, koristili su viskozne fluide (rastvor CMC) u kojima je razbijanje mehurova izraženije nego u neviskoznim, prvenstveno jer se u viskoznim fluidima formiraju veoma veliki mehurovi na koje deluju statički mešači. Gavrilescu i sar. (1997) su primetili da, iako se ugradnjom statičkih mešača sadržaj gasa u uzlaznoj cevi ALSR znatno uvećao, prividna brzina tečne faze se umanjila. Uprkos smanjenju brzine tečnosti, statički mešači su doveli do porasta prenosa mase što su pokazali Goto i Gaspillo (1992) u ALSR, Gluz i Merchuk (1996) i Chavarría-Hernández i sar. (2007) u ALUR.

Različite vrste punjenja koriste se kao katalizatori ili nosači biomase u *airlift* reaktorima. Punjenje, postavljeno u uzlaznu zonu reaktora, može u znatnoj meri da izmeni tok strujanja. Naime, primenom punjenja tok postaje vijugaviji, mehurovi prelaze duži put i ostvaruje se intenzivan kontakt između mehurova gasa i punjenja (Meng i sar., 2002). Istraživanja Meng i sar. (2002), sprovedena u ALSR sa punjenjem od tkanog najlona (slika 2.7b) montiranog u uzlaznoj zoni, pokazala su da se optimalni hidrodinamički uslovi postižu pri velikoj poroznosti punjenja uz maksimalnu visinu sloja. Time je obezbeđen visok sadržaj imobilisane biomase, visok sadržaj gasa koji omogućuje bolji prenos mase, kao i znatno veći deo poprečnog preseka uzlazne cevi kroz koji slobodno protiče disperzija kako bi se sprečila pojava čepova i smanjili gubici usled trenja. Nikakhtari i Hill (2005b) su ugradnjom mrežastog punjenja od nerđajućeg čelika (slika 2.7c) velike poroznosti u uzlaznu cev ALSR povećali sadržaj gasa zahvaljujući smanjenju veličine mehurova usled njihovog razbijanja i nižoj brzini tečne faze usled većeg otpora proticanju tečnosti. Na taj način značajno su uvećali zapreminski koeficijent prenosa mase, koji je bio i do 2,5 puta veći u odnosu na ALSR bez punjenja.

Umetanjem perforiranih ploča u unutrašnjost *airlift* reaktora takođe se može izmeniti disperzija gasne faze. Efekat ugradnje perforiranih ploča na stvaranje i razbijanje mehurova u ALUR ispitan je u radu Krichnavaruk i Pavasant (2002). Veoma iscrpna analiza sprovedena je variranjem ukupnog broja kao i konstrukcionih detalja perforiranih ploča u nekoliko konfiguracija reaktora. Autori su uočili da iako su ploče

razbijale velike mehurove, novonastali mali mehurovi bi nedugo po udaljavanju od ploče koalescirali te dostizali istu veličinu kao i pre kontakta sa pločom. Ugradnjom ploča smanjena je brzina tečne faze u uzlaznoj cevi, dok su sadržaj gasa i specifična međufazna površina uvećani, bez obzira na prisutnu koalescenciju. Premda je korišćenjem ploča koeficijent prenosa mase opao, ukupni zapreminski koeficijent prenosa mase bio je do dva puta veći u poređenju sa konvencionalnim ALUR bez perforiranih ploča.

Neki autori su montirali inovativne, specijalno konstruisane umetke s ciljem da poboljšaju hidrodinamiku i prenos mase. Na primer, Zhang i sar. (2005a) su u uzlaznu cev ALSR ugradili više manjih perforiranih ploča naizmjenično postavljenih pod uglom od 45° u odnosu na vertikalnu osu. Umetci, prikazani na slici 2.7d, su pored primarnog zadatka da razbijaju mehurove, predstavljali otpor strujanju tečnosti usled koga dolazi do opadanja brzine tečnosti a samim tim i porasta sadržaja gasa. Eksperimentalni rezultati su takođe pokazali da je korišćenjem umetaka došlo do preraspodele toka te da su radijalni profili sadržaja gasa bili ravniji u odnosu na konfiguraciju ALSR bez njih. Pored ovih specijalno konstruisanih umetaka, Mohanty i sar. (2006; 2007) koristili su tri prstena i četiri mrežasta diska. Njihovim naizmjeničnim postavljanjem u uzlaznu cev ALSR omogućili su neprestano smenjivanje procesa formiranja i razbijanja mehurova. Na taj način uočen je 45% viši sadržaj gasa u odnosu na konfiguraciju bez umetaka, pa su ostvarene veće vrednosti zapreminskog koeficijenta prenosa mase.

Prethodno pomenuta istraživanja bavila su se uticajem ugradnje različitih tipova nepokretnih umetaka na karakteristike reaktora. S druge strane, ugradnja mehanički pokretanih impelera, koji su inače široko rasprostranjeni u kontaktorima sa mehaničkim mešanjem, ispitana je u *airlift* reaktorima sa unutrašnjom recirkulacijom (Pollard i sar., 1998; Chisti i Jauregui-Haza, 2002; de Jesus i sar., 2015). Integracija *airlift* reaktora i mehaničkih impelera izvedena je sa ciljem da se prebrode ograničenja oba tipa kontaktora kao što su mala brzina prenosa mase odnosno slabo mešanje. U navedenim radovima, uočeno je da su mehanički pokretani impeleri poboljšali mešanje i povećali brzinu prenosa mase i brzinu tečnosti u odnosu na *airlift* reaktor bez mehaničkog mešanja. Međutim, ozbiljna mana ovakve konfiguracije je što su pomenuta poboljšanja ostvarena na uštrb velike potrošnje energije (Chisti i Jauregui-Haza, 2002).

Tabela 2.2 Pregled dosadašnjih istraživanja uticaja ugradnje umetaka na hidrodinamičke i masenoprenosne karakteristike ALSR

Referenca	Vrsta umetka	Geometrijske karakteristike	Tečna faza	Ispitivane veličine
Chisti i sar. (1990)	statički mešač (tip SMV-12)	$D_R=0,050$ m; $D_D=0,075$ m; $A_D/A_R=2,23$	0,2–0,6% CMC, vodeni rastvor NaCl	k_{La}
Gavrilescu i sar. (1997)	statički mešač (tip Sulzer)	$A_D/A_R=0,1225$; $V=0,17$ m ³	0,5–4% rastvor skroba	U_{LR} , ϵ_{GR}
Goto i Gaspillo (1992)	statički mešač	$D_R=0,027$ m; $D_D=0,061$ m; $H_R=0,585$ m; $H_D=0,39$ m	voda, voda+Amberlyst 15	ΔP , W_{LR} , $U_{G,min}$, k_{La}
Hamood-ur-Rehman i sar. (2012)	dve rolne fiberglas punjenja	$D_R=0,248$ m; $D_D=0,102$ m; $H=1,996$ m	voda	t_{mix} , U_{LR}
Hamood-ur-Rehman i sar. (2013)	dve rolne fiberglas punjenja	$D_R=0,248$ m; $D_D=0,102$ m; $H=1,996$ m; $V=97$ dm ³	voda	ϵ_{GR}
Lin i sar. (1976)	kose pregrade	$D_R=0,15$ m; $D_D=0,05$ m; $H=3$ m	fermentacioni medijum	k_{La} , t_{mix} , t_c
Meng i sar. (2002)	punjenje od najlona	$D_R=0,089$ m; $D_D=0,047$ m; $H_R=1,81$ m	voda	ϵ_{GR} , W_{LR} , d_{32}
Mohanty i sar. (2006)	prstenovi i mrežasti diskovi	$D_R=0,2199$ m; $H=1,82$ m	voda	ϵ_{GR} , W_{LD}
Mohanty i sar. (2007)	prstenovi i mrežasti diskovi	$D_R=0,2199$ m; $H=1,82$ m	voda	a , k_{La}
Nikakhtari i Hill (2005a)	mrežasto punjenje od najlona	$D_R=0,089$ m; $D_D=0,047$ m; $H_R=1,81$ m; $V=12$ dm ³	voda	k_{La} , ϵ_{GR} , W_{LR}
Nikakhtari i Hill (2005b)	mrežasto punjenje od nerđajućeg čelika	$D_R=0,089$ m; $D_D=0,047$ m; $H_R=1,81$ m	voda	k_{La} , ϵ_{GR} , W_{LR}
Zhang i sar. (2005a)	specijalno konstruisane perforirane ploče	$D_R=0,230$ m; $D_D=0,190$ m; $H=4,8$ m	voda	ϵ_{GR} , W_{LR} , d_{32} , brzina isplivavanja mehurova

Tabela 2.3 Pregled dosadašnjih istraživanja uticaja ugradnje umetaka na hidrodinamičke i masenoprenosne karakteristike ALUR

Referenca	Vrsta umetka	Geometrijske karakteristike	Tečna faza	Ispitivane veličine
Chavarría-Hernández i sar. (2007)	statički mešač	$A_C=19,63 \text{ cm}^2$; $A_A=47,12 \text{ cm}^2$	fermentacioni medijum	Re , $k_L a_L$
Chisti i Jauregui-Haza (2002)	impeleri pokretani mehaničkim putem	$D_C=0,5 \text{ m}$; $H_C=2,06 \text{ m}$; $A_C/A_A=1,27$; $V=1,1 \text{ m}^3$	voda, 2–4% suspenzija Solca Flocc, 0,15M NaCl	ε_G , W_{LA} , t_{mix}
de Jesus i sar. (2015)	impeleri pokretani mehaničkim putem	$D_A=0,12 \text{ m}$; $H_L=0,33 \text{ m}$; $D_C=0,09 \text{ m}$	1,94% CMC, 1,8% ksantan	ε_G , $k_L a_L$, t_{mix} , d_{32} , a
Gluz i Merchuk (1996)	helikoidalni statički mešač	$V=60 \text{ dm}^3$; $D_A=0,2 \text{ m}$; $D_C=0,125 \text{ i } 0,16 \text{ m}$	voda, 0,1–0,6% CMC	W_{LA} , t_c
Krichnavaruk i Pavasant (2002)	perforirane ploče	$D_A=11 \text{ cm}$; $D_C=7,4 \text{ cm}$; $H=2,4 \text{ m}$	voda	ε_G , W_{LA} , d_{32} , $k_L a$, a
Luo i sar. (2013)	perforirane ploče *	uvođenje gasa u anularni prostor; $D_A=284 \text{ mm}$; $D_C=70 \text{ mm}$	voda	ε_{GC} , W_{LA} , $k_L a$
Pi i sar. (2014)	specijalno konstruisan umetak	$D_A=18$; $A_C/A_A=0,15-2,87$; $H_L=22 \text{ cm}$; $H_C/H_L=0,45-0,91$	voda	$k_L a$, W_{LA} , ε_{GC}
Räsänen i sar. (2016)	helikoidalni promotor-distributor †	$D_A=0,29 \text{ m}$; $H_L=1,75 \text{ m}$; $H_C=1,6 \text{ m}$; $D_C=0,194 \text{ m}$; $V=0,116 \text{ m}^3$	voda	ε_G , ε_{GC} , ε_{GA} , $k_L a$
Tekić i sar. (2014)	samo-rotirajući impeleri	$D_A=106 \text{ mm}$; $H_C=1,33 \text{ m}$; $D_C=56 \text{ mm}$; $V=12,35 \text{ dm}^3$	voda	ε_G , ε_{GC} , ε_{GA} , W_{LA} , t_c , t_{mix}
Vorapongsathorn i sar. (2001)	perforirane ploče	$D_A=13,7 \text{ cm}$; $H_C=1 \text{ m}$; $D_C=9,3 \text{ cm}$; $V=16 \text{ dm}^3$	voda	ε_G , ε_{GC} , ε_{GA} , $k_L a$
Zhang i sar. (2012)	specijalno konstruisan umetak	$D_A=16 \text{ cm}$; $H_C=1,1 \text{ m}$; $D_C=11 \text{ cm}$; $H_L=1,26 \text{ m}$	voda	ε_{GC} , ε_G , W_{LA}
Zhao i sar. (1994)	perforirane ploče	$D_A=14 \text{ cm}$; $H_C=16 \text{ cm}$; $D_C=9 \text{ cm}$; $H_L=0,25 \text{ m}$	voda, 1–3,5% CMC, 40–97% šećer	ε_G , $k_L a$

* ugrađeni u anularni prostor

† ugrađeni u centralni deo i/ili anularni prostor

Može se zaključiti da je u svim do sada sprovedenim istraživanjima, koja se bave ugradnjom umetaka u *airlift* reaktore radi postizanja bolje disperzije gasne faze, ostvareno znatno poboljšanje njihovih karakteristika usled većeg sadržaja gasa i boljeg prenosa mase. Međutim, imajući u vidu neizbežan porast otpora strujanju tečnosti u pomenutim konfiguracijama sa umecima, kao i prednosti i mane mehanički pokretanih impelera, Tekić i sar. (2014) su predložili samo-rotirajući impelere kao novi tip umetaka koje su montirali u centralnu cev ALUR. Postavili su ukupno deset impelera, koji su pokretani isključivo cirkulacijom tečnosti prouzrokovanom uvođenjem gasa u reaktor. Zahvaljujući dejstvu impelera, mehurovi gasa su bili razbijani pa je uočen manji srednji prečnik mehurova. Stoga, u ovoj konfiguraciji reaktora je ostvareno povećanje sadržaja gasa u centralnoj cevi i vremena mešanja, kao i smanjenje brzine tečnosti i sadržaja gasa u anularnom prostoru. Važno je napomenuti da se ukupni sadržaj gasa nije bitnije izmenio usled suprotnog dejstva ugradnje impelera na sadržaj gasa u centralnoj cevi i sadržaj gasa u anularnom prostoru. Ovakav ishod može se pripisati uslovima u ovom radu, pre svega znatno većem poprečnom preseku anularnog prostora u odnosu na centralnu cev. Bez obzira na to, ovaj rad je istakao značajan uticaj ugradnje samo-rotirajućih impelera na hidrodinamičke i masenoprenosne karakteristike *airlift* reaktora. Može se očekivati da će uticaj impelera biti izraženiji u konfiguracijama sa manjim odnosom površina poprečnog preseka silazne i uzlazne zone, kao što su *airlift* reaktori sa spoljašnjom recirkulacijom.

2.4 Modelovanje *airlift* reaktora

Modelovanje služi da opiše zbivanja unutar posmatranog sistema koristeći opšteprihvaćena saznanja ne samo u cilju potpunijeg razumevanja, već i radi uspešnog predviđanja ponašanja datog sistema. Usled složenih međudnosa između hidrodinamičkih veličina, prenosa mase, mešanja, projektnih i pogonskih veličina, modelovanje *airlift* reaktora je izuzetno otežano (Merchuk i Glutz, 1999). Iz tog razloga većina istraživača se orijentisala ka pronalaženju odgovarajućih empirijskih korelacija i njihovoj daljoj primeni. U novije vreme, zahvaljujući pojavi moćnih računara i odgovarajućih softverskih paketa, razvijeni su i drugi pristupi koji se takođe mogu primeniti prilikom modelovanja *airlift* reaktora sa spoljašnjom recirkulacijom.

2.4.1 Empirijske korelacije

Empirijski pristup modelovanju podrazumeva pronalaženje veze između ulaznih i izlaznih veličina analizom postojećih eksperimentalnih podataka. Nažalost, iskustvene korelacije nije moguće uopštiti, tj. njihova primena je veoma često ograničena na uske opsege geometrijskih i operativnih parametara za koje su razvijene. Bez obzira na to, empirijske korelacije su i dalje prvi izbor pri modelovanju *airlift* reaktora, pre svega zbog njihove jednostavne primene. O tome svedoče i brojni radovi u kojima se predlažu empirijske korelacije za predviđanje hidrodinamičkih i masenoprenosnih osobina *airlift* reaktora, čiji se detaljan pregled može naći u radovima Chisti (1989), Jones (2007), Kębłowski i sar. (1993), Kadic i Heindel (2014), Kawase i Hashiguchi (1996) i Merchuk i Glutz (1999). U tabelama 2.4 i 2.5 prikazane su neke od empirijskih i poluempirijskih korelacije koje su dostupne u literaturi (detalji sa geometrijskim karakteristikama ALSR dati su u tabeli 2.1). Može se uočiti širok opseg ne samo korišćenih promenljivih već i predloženih zavisnosti u datim korelacijama.

Kao što je i rečeno u potpoglavljima 2.2.3 i 2.2.4., hidrodinamičke veličine i prenos mase u najvećoj meri zavise od prividne brzine gasa. Ta zavisnost je izrazito nelinearna pa je u većini korelacija za predviđanje ε_{GR} , W_{LD} ili k_{La} korišćen stepeni model sledećeg oblika:

$$y = aU_G^b \quad (2.3)$$

gde y označava ε_{GR} , W_{LD} ili k_{La} . Međutim, pošto vrednosti koeficijenata a i b zavise od geometrijskih karakteristika reaktora, osobina tečne faze i režima strujanja, u veoma malom broju radova (Merchuk, 1986; Benyahia i sar., 1996; Mohanty i sar., 2007) osobine ALSR su opisane najprostijim oblikom izraza 2.3. Naime, pregledom tabele 2.4 može se uočiti da u većini korelacija umesto koeficijenta a figuriše kombinacija koeficijenata i dodatnih članova, kojim se uzimaju u obzir i ostale promenljive koje utiču na učinak ALSR, kao što su geometrijske karakteristike ili fizičko-hemijske osobine tečne faze. Većina istraživača je najčešće pored U_G kao promenljive uključivala odnos A_D/A_R i prividnu viskoznost. Neke od korelacija razvijene su na osnovu Hughmarkove (1967) dimenzione analize, istovremeno uključujući više fizičko-hemijskih osobina tečne faze, kao što su gustina, površinski napon i kinematska viskoznost (Hsu i Dudukovic, 1980; Vataji, 1986; Pošarac, 1988; Gharib i sar., 2013). S druge strane, u ostalim radovima predložene su jednostavnije korelacije sa manjim brojem promenljivih.

Tabela 2.4 Pregled predloženih korelacija za predviđanje hidrodinamičkih karakteristika u ALSR

Referenca	Predložena korelacija	
Al-Masry i Dukkan (1998)	$\varepsilon_{GR} = 0,9856U_G^{0,8747}\mu_a^{0,0577}$	za ksantan
	$\varepsilon_{GR} = 0,3245U_G^{0,9032}\mu_a^{-0,0925}$	za CMC
Bello i sar. (1980)	$\varepsilon_{GR} = 0,00344 \left(1 + \frac{A_D}{A_R}\right)^{-1} \left(\frac{P_G}{V_D}\right)^{2/3}$	
Bello i sar. (1984)	$U_{LR} = 1,55U_G^{0,33} \left(\frac{A_D}{A_R}\right)^{0,74}$	
Bello i sar. (1985a)	$\varepsilon_{GR} = 0,16 \left(\frac{U_G}{U_L}\right)^{0,57} \left(1 + \frac{A_D}{A_R}\right)$	
Bentifraouine i sar. (1997)	$\varepsilon_{GR} = 2U_G^{0,88} (1 - 0,97U_{LR}^{0,49})$	
Benyahia i sar. (1996)	$\varepsilon_{GR} = 5,89 \cdot 10^{-4} \left(\frac{P_G}{V_L}\right)^{1,063}$	ALSR malih dimenzija
	$\varepsilon_{GR} = 3,077 \cdot 10^{-3} \left(\frac{P_G}{V_L}\right)^{0,671}$	ALSR velikih dimenzija
Choi (2001)	$\varepsilon_{GR} = 0,431U_G^{0,580} \left(\frac{A_D}{A_R}\right)^{-0,04} \left(\frac{L_C}{L_h}\right)^{-0,042}$	
Gharib i sar. (2013)	$\varepsilon_{GR} = 0,0329U_G^{1,172} C_A^{0,220}$	za metanol
	$\varepsilon_{GR} = 0,0358U_G^{1,095} C_A^{0,227}$	za etanol
	$\varepsilon_{GR} = 0,0591U_G^{1,013} C_A^{0,258}$	za <i>n</i> -propanol
	$\varepsilon_{GR} = 0,0448U_G^{1,043} C_A^{0,187}$	za <i>n</i> -butanol
Ghirardini i sar. (1992)	$\varepsilon_G = 0,55U_G^{0,78} \left(\frac{V_{Ls}}{V_L}\right)^{0,2} D_R^{0,42}$	
Hsu i Dudukovic (1980)	$\frac{1-\varepsilon_{GR}}{\varepsilon_{GR}} = 4,6Z^{0,9} e^{0,47D_D}$	
	$Z = \left(\frac{V_L}{V_G}\right) Fr_{GL}^{0,36} Re_{GL}^{0,006} We_{GL}^{-0,57}$	
Kemblowski i sar. (1993)	$\varepsilon_{GR} = 0,203 \frac{Fr^{0,31}}{Mo^{0,012}} \left(\frac{U_G A_R}{U_{LR} A_D}\right)^{0,74}$	
Kojić i sar. (2015)	$\varepsilon_{GR} = 2,35U_G^{0,66} \sigma^{-0,47} d_o^{-0,045} \left(\frac{A_D}{A_R}\right)^{-0,61}$	
Kojić (2016)	$\varepsilon_{GR} = 0,56U_G^{0,61} \left(1 + \left(-\frac{d\sigma}{dC_A}\right)\right)^{-0,01} d_o^{-0,02} K_f^{0,11}$	
	$W_{LD} = 6,33U_G^{0,32} \left(1 + \left(-\frac{d\sigma}{dC_A}\right)\right)^{-0,01} d_o^{-0,03} K_f^{-0,56}$	
Merchuk (1986)	$\varepsilon_{GR} = 0,047U_G^{0,59}$	
Mohanty i sar. (2006)	$\varepsilon_{GR} = 0,187Fr_G^{0,184} Re^{0,101} \left(\frac{H}{D_R}\right)^{0,095}$	
Popovic i Robinson (1989)	$\varepsilon_{GR} = 0,465U_G^{0,65} \left(1 + \frac{A_D}{A_R}\right)^{-1,06} \mu_a^{-0,103}$	
Popović i Robinson (1988)	$U_{LR} = 0,23U_G^{0,32} \left(\frac{A_D}{A_R}\right)^{0,97} \mu_a^{-0,39}$	
Pošarac i Petrović (1991)	$\varepsilon_{GR} = 0,809g^{-0,131} \rho_G^{0,062} \rho_L^{0,069} \mu_G^{0,107} \mu_L^{-0,053} \sigma^{-0,185} \cdot \frac{U_G^{0,936}}{(U_G+U_L)^{0,474}}$	
Pošarac (1988)	$\varepsilon_{GR} = 0,701g^{-0,131} \rho_G^{0,062} \rho_L^{0,069} \mu_G^{0,107} \mu_L^{-0,053} \sigma^{-0,185} \cdot \frac{U_G^{0,982}}{(U_G+U_L)^{0,607}} (1 + C_N)^{0,063}$	
Rujiruttanakul i Pavasant (2011)	$\varepsilon_{GR} = 0,49U_G^{0,67} L^{-0,15} H_R^{-0,22}$	
Vataji (1986)	$\varepsilon_{GR} = 0,128 \frac{U_G}{U_L} Re_L^{0,062} We_L^{0,164}$	
	$U_L = 2,858U_G^{0,482} \left(\frac{A_{OB}}{A_D}\right)^{0,416} \mu_a^{0,0105}$	
Wu i sar. (2013)	$\varepsilon_{GR} = 0,018U_G^{0,682} \mu_a^{-0,083}$	

Tabela 2.5 Pregled predloženih korelacija za predviđanje masenoprenosnih karakteristika u ALSR

Referenca	Predložena korelacija
Al-Masry i Dukkan (1998)	$k_L a = 0,0032 U_G^{0,7271} \mu_a^{-0,5282}$ za ksantan $k_L a = 0,0023 U_G^{0,8797} \mu_a^{-0,6966}$ za CMC
Bello i sar. (1980)	$\varepsilon_{GR} = 0,00507 \left(1 + \frac{A_D}{A_R}\right)^{-1,2} \left(\frac{P_G}{V_D}\right)^{0,8}$
Bello i sar. (1985a)	$k_L a \frac{H_D}{U_{LR}} = 2,28 \left(\frac{U_G}{U_{LR}}\right)^{0,90} \left(1 + \frac{A_D}{A_R}\right)^{-1}$
Bello i sar. (1985b)	$k_L a = 0,76 U_G^{0,8} \left(1 + \frac{A_D}{A_R}\right)^{-2}$; $k_L a = 5,5 \cdot 10^{-4} \left(\frac{P_G}{V}\right)^{0,8} \left(1 + \frac{A_D}{A_R}\right)^{-1,2}$
Benyahia i sar. (1996)	$k_L a = 2,03 U_G^{0,87}$ za vodu; $k_L a = 1,22 U_G^{0,88}$ za CMC
Choi (2001)	$k_L a_L = 0,231 U_G^{0,821} \left(\frac{A_D}{A_R}\right)^{-0,080} \left(\frac{L_C}{L_H}\right)^{-0,127}$
Gharib i sar. (2013)	$Sh = 0,76 Re^{0,21} Sc^{0,7} Bo^{0,64}$
Kawase i Hashiguchi (1996)	$k_L a \frac{D_R^2}{D_L} = 0,142 Sc^{1/2} Bo^{3/5} Re^{7/8} Fr^{3/40} \left(1 + \frac{A_D}{A_R}\right)^{-97/80}$
Miyahara i sar. (1999)	$k_L a = 1,69 \cdot 10^{-3} \left(\frac{U_G}{d_{32}}\right)^{1,11}$
Miyahara i sar. (2011)	$\frac{(k_L a)_A}{(k_L a)_{voda}} = 1 + 65 (C_A d_H^{-1,12} C_N^{2,4})^{0,32}$; $(k_L a)_{voda} = 0,00105 \left(\frac{U_G}{d_{32}}\right)^{1,11}$
Mohanty i sar. (2007)	$k_L a = 0,65 U_G^{0,825}$
Popovic i Robinson (1989)	$k_L a = 0,5 \cdot 10^{-2} U_G^{0,52} D_L^{0,5} \rho_L^{0,3} \left(1 + \frac{A_D}{A_R}\right)^{-0,85} \mu_a^{-0,89} \sigma_L^{-0,75}$ $k_L a = 0,214 U_G^{0,52} \left(1 + \frac{A_D}{A_R}\right)^{-0,85} \mu_a^{-0,89}$
Pošarac (1988)	$k_L a \frac{D_R^2}{D_L} = 0,961 \varepsilon_{GR}^{1,1} \left(\frac{v_L}{D_L}\right)^{0,5} \left(\frac{g D_R \rho_L}{\sigma}\right)^{0,062} \left(\frac{g D_R^3}{v_L^2}\right)^{0,31}$
Sivasubramanian i sar. (2008)	$k_L a = 0,204 U_G^{0,782} \mu_a^{-0,0595}$ za vodu $k_L a = 0,0587 U_G^{0,499} \mu_a^{-0,079}$ za CMC
Vataji (1986)	$k_L a \frac{H_D}{U_L} = 0,135 \left(\frac{U_G}{U_L}\right)^{0,751} Re_L^{0,05} We_L^{-0,056}$

Pojedini autori su za predviđanje hidrodinamičkih i masenoprenosnih osobina viskoznihi tečnosti uključili samo prividni viskozitet kao dodatni član u izrazu 2.3 (Al-Masry i Dukkan, 1998; Sivasubramanian i sar., 2008). Kod nenjutnovskih tečnosti, zavisnost između brzine smicanja i napona smicanja se može opisati stepenim modelom: stoga, prividna viskoznost (μ_a) se može izračunati na osnovu sledećeg izraza:

$$\mu_a = K \gamma^{n-1} \quad (2.4)$$

gde su K i n faktor konzistencije odnosno indeks toka. Međutim, veliki problem predstavlja procena srednje brzine smicanja u ALSR. Nishikawa i sar. (1977) izveli su linearnu vezu između brzine smicanja i prividne brzine gasa ($\gamma = 5000 U_G$). Iako je ova korelacija prvobitno izvedena za barbotажne kolone, naširoko je korišćena u literaturi za procenu brzine smicanja ne samo kod barbotажnih kolona, već i kod *airlift* reaktora (Vataji, 1986; Popovic i Robinson, 1989; Popović i Robinson, 1993; Akita i sar., 1994; Gavrilesco i sar., 1997; Chavarría-Hernández i sar., 2007). Međutim, s obzirom da je izvedena za barbotажne kolone, pojedini autori kritikuju korelaciju Nishikawa i sar.

(1977) smatrajući da se ona ne može primeniti za procenu brzine smicanja kod *airlift* reaktora, i predlažu druge korelacije (Al-Masry i Chetty, 1996; Cerri i sar., 2008).

Kada su u pitanju istraživački radovi o uticaju dodatka alkohola na efikasnost ALSR, predložene korelacije uključuju koncentraciju alkohola, broj ugljenikovih atoma u lancu alkohola, površinski napon ili gradijent površinskog napona. U radu Kojića (2016), u kom su korišćene granične koncentracije alkohola po Keitelu (1978), data je korelacija kojom su osobine razblaženih rastvora alifatičnih alkohola opisane preko gradijenta površinskog napona umesto površinskog napona. Korelacije koje uključuju gradijent površinskog napona kao jednu od promenljivih prvobitno su predložene za predviđanje hidrodinamičkih i masenoprenosnih osobina ALUR (Albijanić i sar., 2007; Šijački i sar., 2011; Šijački i sar., 2013). Međutim, za opisivanje uticaja alkohola raznih koncentracija nije adekvatno koristiti samo gradijent površinskog napona pošto se on ne menja sa koncentracijom alkohola (Kojić i sar., 2015).

Bello i sar. (1985a; b) su, ispitujući uticaj veličine ALSR u svojim radovima, predložili korelaciju koja pored prividne brzine gasa, između ostalog, sadrži i dodatan član $(1+A_D/A_R)$, takođe u vidu stepene zavisnosti. S druge strane, pojedini autori su za uticaj veličine reaktora kao dodatni član koristili geometrijske veličine, kao što su D_R i H , ili neki od odnosa A_D/A_R ili H/D_R . Miyahara i sar. (1999) su uticaj karakteristika distributora gasa uzeli u obzir korigovanjem člana sa prividnom brzinom tako da umesto U_G u njihovoj korelaciji figuriše odnos U_G/d_{32} .

Imajući u vidu da hidrodinamički režimi strujanja imaju veliki uticaj na hidrodinamičke osobine i prenos mase, u nekim od pomenutih radova korelisanje je izvršeno u granicama uočenih hidrodinamičkih režima, čime su dobijeni znatno veći koeficijenti determinacije.

2.4.2 Veštačke neuronske mreže

Empirijske korelacije za predviđanje ključnih parametara kod *airlift* reaktora sa spoljašnjom recirkulacijom, uprkos njihovoj raznovrsnosti, često su manje efikasne jer je njihova primena ograničena samo na specifične slučajeve za koje su i razvijene (Alvarez i sar., 2000). Za prevazilaženje ovog problema, odnosno uopštavanje modela predviđanja eksperimentalnih rezultata ALSR, poslednjih godina uspešno se primenjuje koncept veštačkih neuronskih mreža (Al-Masry, 2006). Veštačke neuronske mreže (VNM) veoma su efikasne pre svega zahvaljujući izuzetnoj sposobnosti da spoznaju složene odnose između ulaznih veličina, bez prethodnih informacija o prirodi samog

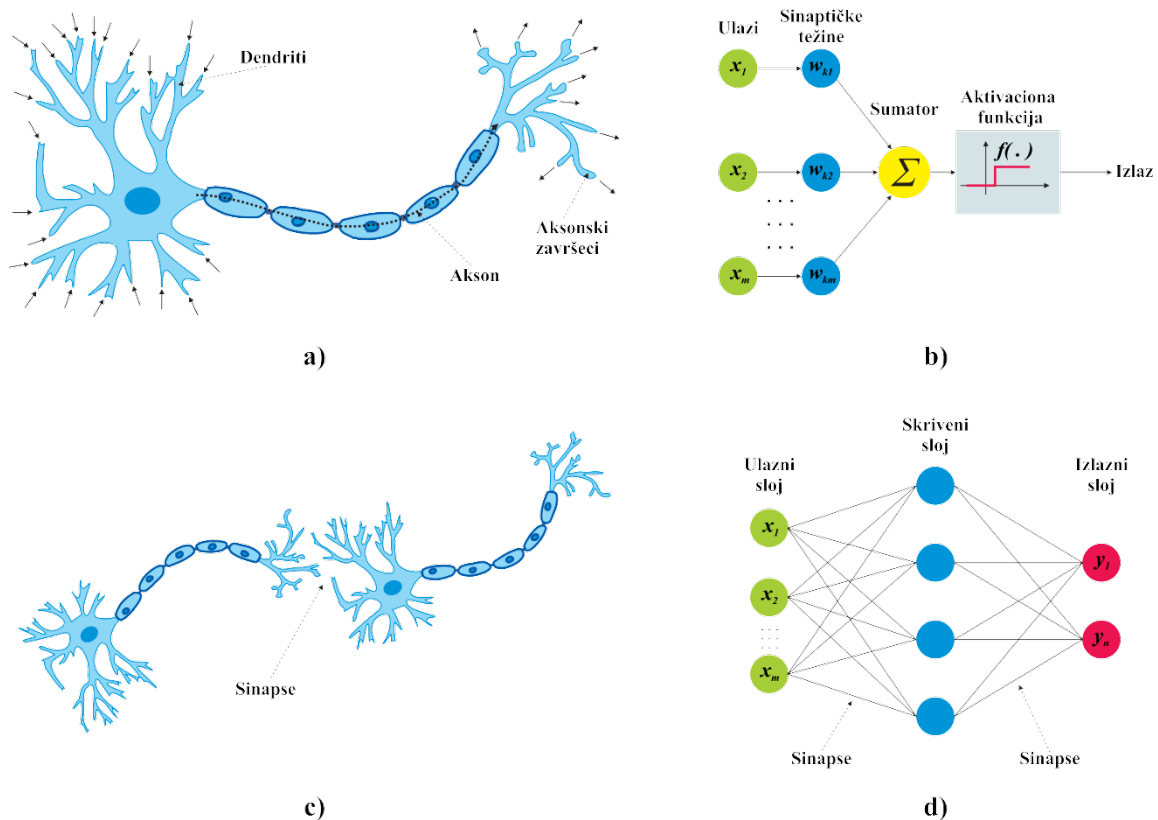
problema i, stoga, bolje predvide značajne parametre u poređenju sa tradicionalnim pristupima (Baawain i sar., 2007).

Veštačke neuronske mreže zasnovane su na jednom od nekoliko načina funkcionisanja ljudskog mozga. Naime, one u stvari predstavljaju veliki paralelno distribuirani procesor koji ima urođenu sposobnost čuvanja i korišćenja iskustvenog znanja. Sličnost sa ljudskim mozgom se ogleda u tome što mreža stiče znanje kroz proces učenja, dok se stečeno znanje čuva u vezama između neurona, tj. jačinama sinaptičkih veza (Haykin, 2009).

Kao i kod bioloških neuronskih mreža, osnovna jedinica VNM je neuron (element procesiranja) koji obrađuje informacije dobijene na ulazu i dalje prosleđuje na izlaz. Na slikama 2.8a i 2.8b ilustrovana je analogija između prostiranja informacija kod biološkog odnosno veštačkog neurona. Telo biološkog neurona zamenjeno je sa sumatorom i aktivacionom funkcijom, dendriti predstavljaju ulaze, njihov spoj sa neuronom naziva se sinapsa, koju karakteriše jačina sinaptičke veze, dok je akson izlaz iz neurona. Izlaz iz veštačkog neurona dobija se tako što se proizvodi ulaznih signala i jačina sinaptičkih veza sabere, a zatim se na taj zbir primeni aktivaciona (prenosna) funkcija čija je uloga da limitira opseg signala. Najčešće korišćene aktivacione funkcije su sigmoidna, linearna, hiperbolična i funkcija praga osetljivosti. Izbor odgovarajuće aktivacione funkcije zavisi od specifikacije problema koji mreža pokušava da reši (Hagan i sar., 2014). S obzirom da jedan neuron nije dovoljan, uobičajeno je da više paralelno grupisanih neurona obrađuje ulazne signale formirajući sloj mreže. Povezivanjem ulaznog sloja, jednog ili više skrivenih slojeva, i izlaznog sloja kao na slici 2.8d, formira se veštačka neuronska mreža. Prema načinu povezivanja neurona mreže se dele na nerekurzivne, tj. nepovratne (eng. *feedforward*), kod kojih se informacije prenose samo sa nižih ka višim slojevima i rekurzivne, tj. povratne (eng. *feedback*), gde se informacije prenose u oba smera.

Veštačka neuronska mreža učeći na primerima pronalazi optimalne jačine sinaptičkih veza koje kasnije koristi da sa velikom tačnošću predviđa, odnosno aproksimira, određeni problem. Stoga, da bi se sa VNM ostvario željeni učinak neophodno je što tačnije podesiti jačine sinaptičkih veza primenom odgovarajućeg algoritma učenja. Do sada je razvijen veliki broj algoritama za obučavanje koji se međusobno razlikuju po načinu na koji koriguju jačine sinaptičkih veza. Mogu se klasifikovati u tri osnovne kategorije: nadgledane, nenadgledane algoritme i algoritme sa

podsticanjem. Koji algoritam će biti korišćen zavisi prvenstveno od konkretnog problema koji mreža pokušava da reši.



Slika 2.8 Simbolički prikaz: a) biološkog neurona, b) veštačkog neurona, c) biološke neuronske mreže i d) veštačke neuronske mreže

Algoritam povratnog prostiranja (eng. *backpropagation*), sa čijim razvojem dolazi do ekspanzije VNM, je najčešće korišćeni algoritam za obučavanje neuronskih mreža. Obučavanje mreže algoritmom povratnog prostiranja obuhvata tri osnovne faze: proces prostiranja unapred, proces prostiranja unazad usled izračunate greške i korekciju jačine sinaptičkih veza (Fausett, 1994). Ciklusi obučavanja, koji se nazivaju epohe (iteracije), iznova se ponavljaju sve dok se ne ispuni neki od zadatih kriterijuma za zaustavljanje. Po uspešno obavljenom obučavanju, neuronska mreža u daljim proračunima koristi samo proces prostiranja unapred kako bi izvršila predviđanje na nepoznatim podacima.

Korak pomoću kog mreža koriguje jačine sinaptičkih veza sa ciljem da pronade optimalne vrednosti, tj. ostvari minimalnu grešku između dobijenih i željenih rezultata, predstavlja stepen brzine učenja (Jokić i sar., 2012). Pri izboru stepena učenja treba biti obazriv jer veoma male vrednosti znatno usporavaju obučavanje i mogu dovesti do otkrića lokalnog umesto globalnog minimuma. S druge strane, mreže sa velikim stepenom učenja su brže ali mogu lako zapasti u oscilujuć (nestabilan) režim u kom ne

uspevaju da otkriju globalni minimum. Stoga se pored stepena učenja uvodi i koeficijent momenta kojim se na jednostavan način može ubrzati obučavanje i pri tome izbeći nestabilnost. Veštačke neuronske mreže karakteriše njihova arhitektura tj. topologija (raspored neurona unutar slojeva i način povezivanja neurona), metod određivanja jačine sinaptičkih veza (algoritam učenja) i vrsta aktivacione funkcije (Fausett, 1994). Imajući u vidu da broj skrivenih slojeva mreže kao i broj neurona u skrivenom sloju u velikoj meri utiče na učinak VNM, odabir najpogodnije (optimalne) arhitekture mreže predstavlja najveći izazov pri radu sa njima (Maltarollo i sar., 2013).

Iako veštačke neuronske mreže spadaju u kategoriju značajnijih inženjerskih alata današnjice i nude brojne prednosti, treba imati u vidu da ne predstavljaju rešenje za svaki problem, te ih treba pažljivo koristiti (Livingstone i sar., 1997; Hagan i sar., 2014). Upravo zahvaljujući veoma širokom opsegu pri izboru karakteristika, veštačke neuronske mreže imaju odlike univerzalnih metoda za predviđanje, što se ogleda u njihovoj primeni u najrazličitije svrhe, kao što su aproksimacija podataka, prepoznavanje lica i govora, kontrola i upravljanje, optimizacija, obrada signala, postavljanje dijagnoza u medicini, predviđanje tržišnih trendova, spektralna analiza i mnoge druge (Hussain, 1999). Brojni radovi, između ostalog, ukazuju da su VNM primenjivane i za modelovanje kontaktora gas-tečno, odnosno za predviđanje ključnih parametara kod *airlift* reaktora sa spoljašnjom recirkulacijom (Al-Masry, 2006; Mohajerani i sar., 2012; Kojić, 2016).

Neuronske mreže ne moraju se posmatrati kao matematički model „crne kutije“ (eng. *black-box*) s obzirom da ne daju informacije o uticajima pojedinih ulaznih veličina na izlazna svojstva (Olden i sar., 2004). Razvijeno je nekoliko metoda koje se uspešno primenjuju za procenu uticaja ulaznih veličina na izlaze iz neuronske mreže, a u literaturi su najčešće primenjivane metoda analize osetljivosti, metoda jačine sinaptičkih veza (Olden i Jackson, 2002) i Garsonova metoda (Garson, 1991).

3. ZADATAK I CILJ

Osnovni cilj istraživanja ove doktorske disertacije je da se utvrdi uticaj ugradnje samo-rotirajućih impelera u uzlaznu cev na hidrodinamičke i masenoprenosne karakteristike *airlift* reaktora sa spoljašnjom recirkulacijom. Rezultati će biti tumačeni poređenjem dobijenih vrednosti za sadržaj gasa u uzlaznoj cevi, brzinu tečnosti u silaznoj cevi i zapreminski koeficijent prenosa mase u dve konfiguracije reaktora, konvencionalnom *airlift* reaktoru sa spoljašnjom recirkulacijom i *airlift* reaktoru sa spoljašnjom recirkulacijom sa samo-rotirajućim impelerima.

U okviru osnovnog cilja ove doktorske disertacije biće realizovani i sledeći pojedinačni ciljevi:

- i. Karakterizacija samo-rotirajućih impelera u vidu postignutih brzina obrtanja kao i pritiska gasa na ulazu u reaktor,
- ii. ispitivanje uticaja ugradnje samo-rotirajućih impelera na režime strujanja u uzlaznoj cevi *airlift* reaktora sa spoljašnjom recirkulacijom,
- iii. ispitivanje uticaja prividne brzine gasa na relativne promene hidrodinamičkih i masenoprenosnih karakteristika postignute ugradnjom samo-rotirajućih impelera,
- iv. određivanje efikasnosti samo-rotirajućih impelera pri radu sa različitim tečnostima, koji će omogućiti da se ispita uticaj površinskog napona, kao i reoloških osobina, tj. njutnovskog odnosno nenjutnovskog karaktera tečne faze, koji se često sreće u hemijskoj industriji a posebno u biotehnologiji,
- v. ispitivanje uticaja tipa distributora gasa na relativne promene hidrodinamičkih i masenoprenosnih osobina postignute ugradnjom samo-rotirajućih impelera i

- vi. razvijanje empirijskih korelacija, kao i modela veštačkih neuronskih mreža, koji će omogućiti predviđanje osnovnih hidrodinamičkih i masenoprenosnih parametara značajnih za projektovanje i upravljanje *airlift* reaktorima sa spoljašnjom recirkulacijom.

Celokupna istraživanja u okviru ove disertacije imaju za cilj potpunije razumevanje fenomena koji se odvijaju pri radu sa novim tipom umetaka kao što su samo-rotirajući impeleri. Rezultati dobijeni istraživanjem u *airlift* reaktoru koji će biti upotrebljen u ovom eksperimentalnom radu imaće širi značaj ne samo zbog ugradnje samo-rotirajućih impelera već i zbog odabira tečnih faza različitih karakteristika, kao i dva tipa distributora gasa. Na taj način će se povezati neka dosadašnja istraživanja i izvesti zaključci koji se mogu primeniti na rešavanje određenih bitnih problema u radu sa *airlift* reaktorima sa spoljašnjom recirkulacijom.

4. EKSPERIMENTALNI DEO

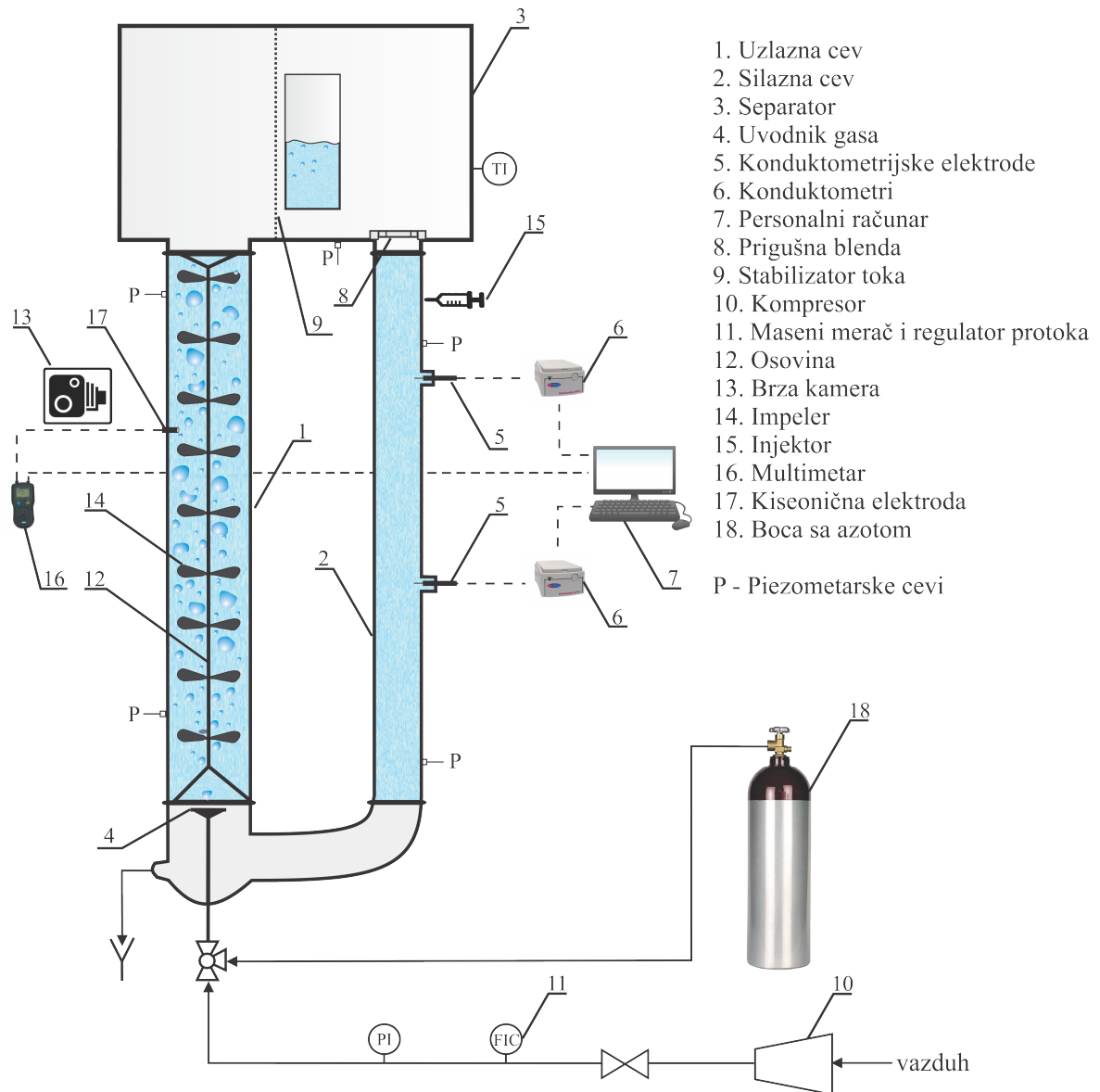
4.1 Opis eksperimentalnog postrojenja

Eksperimentalna ispitivanja u okviru ovog rada izvedena su u dve konfiguracije *airlift* reaktora sa spoljašnjom recirkulacijom:

- i. konvencionalni *airlift* reaktor sa spoljašnjom recirkulacijom (ALSR) i
- ii. *airlift* reaktor sa spoljašnjom recirkulacijom sa samo-rotirajućim impelerima (ALSRI) koji je prikazan na slici 4.1.

Aparatura se sastoji od uzlazne i silazne cevi od pleksiglasa, dna kolone i separatora izrađenih od nerđajućeg čelika, osovine sa samo-rotirajućim impelerima kao i pratećih elemenata u vidu mernih instrumenata, brze kamere, personalnog računara, kompresora i boce sa azotom. Visina tečnosti u separatoru omogućila je gotovo potpuno razdvajanje gasa i tečnosti tako da nije dolazilo do značajnijeg uvlačenja mehurova gasa u silaznu cev. Kao distributori gasne faze korišćeni su jednostruki uvodnik ili sinter ploča, prikazani na slici 4.3. Geometrijske karakteristike aparature date su u tabeli 4.1.

U centar uzlazne cevi ALSRI umetnuta je osovina sa devet impelera. Impeleri su pokretani isključivo uvođenjem gasa u kolonu i time indukovanom cirkulacijom tečnosti. Korišćeni su impeleri sa aksijalnim tokom, izrađeni od ABS plastike, prečnika 73 mm i sa nagibom lopatica od 40° (slika 4.2). S ciljem da se smanji trenje između osovine i impelera, u školjku impelera umetnut je teflonski prsten. Rastojanje između impelera je izabrano na osnovu prethodnih istraživanja u ALUR (Tekić i sar., 2014) kako bi se postigao najbolji učinak: razbijanje mehurova uz minimalan otpor strujanju tečnosti.



Slika 4.1 Skica eksperimentalne aparature

Da bi se ostvarili različiti protoci tečnosti pri istim protocima gasa menjan je otpor proticanju tečnosti postavljanjem prigušnih blendi na vrhu silazne cevi ALSR. Korišćene su prigušne blende sa površinom slobodnog preseka, tj. otvorom blende od 70, 50, 30 i 10% označene kao OB-70, OB-50, OB-30, odnosno OB-10.

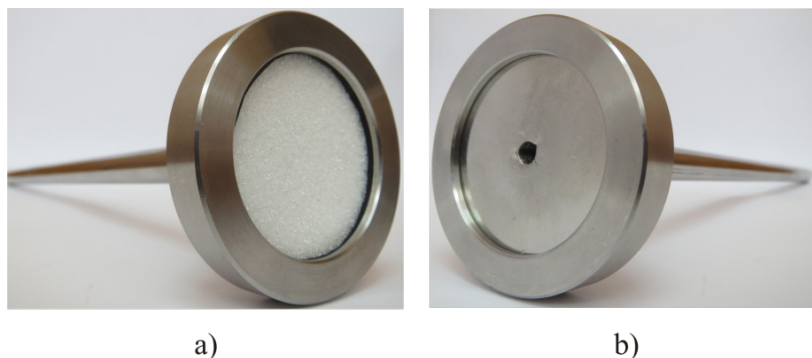


Slika 4.2 Impeler sa aksijalnim tokom

Tabela 4.1 Geometrijske karakteristike aparature

Uzlazna cev	
Unutrašnji prečnik (mm)	93
Spoljašnji prečnik (mm)	100
Visina (mm)	2000
Silazna cev	
Unutrašnji prečnik (mm)	54
Spoljašnji prečnik (mm)	60
Visina (mm)	2000
Impeleri	
Prečnik impelera (mm)	73
Broj lopatica	7
Rastojanje između impelera (mm)	184
Rastojanje između uvodnika i prvog impelera (mm)	225
Separator	
Dužina (mm)	520
Širina (mm)	200
Visina (mm)	445
Distributori gasa	
Sinter ploča – srednji prečnik pora (μm)	115
Jednostruki uvodnik – prečnik otvora (mm)	4
Prigušne blende	
Otvori blende (%)	70, 50, 30 i 10
Ostale karakteristike	
Rastojanje između centara uzlazne i silazne cevi (mm)	350
Rastojanje uvodnika od dna kolone (mm)	170
Visina stuba tečnosti u separatoru (mm)	145
Visina stuba tečnosti u reaktoru (cm)	236
Ukupna zapremina tečnosti ALSR (dm^3)	36,6
Zapremina koju zauzima konstrukcija impelera (dm^3)	0,3

U svim eksperimentima kao gasovita faza korišćen je vazduh iz centralnog kompresora, čiji je protok meren elektronskim masenim meračem i regulatorom protoka tipa EL-FLOW[®] F-201AV (Bronkhorst, Holandija), klase tačnosti 0,5%. Pri ispitivanju masenoprenosnih osobina korišćen je i azot 3,5 B40/150 (Messer Tehnogas, Srbija).

**Slika 4.3** Distributori gasa: a) sinter ploča i b) jednostruki uvodnik

Pritisak gasa meren je Burdonovim manometrom, opsega do 2,5 bar, klase tačnosti 1,6%. U zavisnosti od primenjenog protoka, manometar je u toku rada pokazivao natpritisak od 0,175 do 0,9 bar pri čemu je maksimalna relativna greška merenja iznosila 14,5%.

Vrednosti protoka gasa kretale su se u opsegu od $4 \div 65$ L_N/min čime su prividne brzine gasa iznosile $0,96 \div 15,52$ cm/s. Prividna brzina gasa računata je u odnosu na poprečni presek uzlazne cevi i pritisak na vrhu disperzije na osnovu sledećeg izraza (Chisti i Moo-Young, 1987):

$$U_G = \frac{Q_m RT}{A_R H_L \rho_L g} \ln \left(1 + \frac{H_L \rho_L g}{P_h} \right) \quad (4.1)$$

Određivanje prividne brzine gasa pomoću izraza 4.1 omogućava poređenje različitih tipova barbotaznih kolona. Na ovaj način se, takođe, izbegavaju prividni uticaji visine tečnosti i pritiska na vrhu disperzije na sadržaj gasa i koeficijent prenosa mase. Maksimalna relativna greška određivanja prividne brzine gasa bila je 1,8%.

Hidrostatički pritisci u reaktorima mereni su pomoću piezometarskih cevi postavljenih na vrhu i dnu uzlazne cevi, kao i pri dnu separatora. Rastojanje između dva merna mesta u uzlaznoj cevi iznosilo je 175 cm. Očitavanje nivoa u piezometarskim cevima vršeno je 5 do 20 min po početku eksperimenta, u zavisnosti od korišćene tečnosti, radi ustaljivanja visine stuba tečnosti. Postavljanjem staklene kapilare dužine 50 mm i prečnika 0,7 mm na ulaze u piezometarske cevi onemogućene su pulzacije nivoa tečnosti u cevima. Na ovaj način apsolutna greška merenja nije prelazila 2 mm.

U obe konfiguracije reaktora električna provodljivost tečnosti praćena je pomoću dve minijaturne konduktometrijske elektrode ET915 (eDAQ, Australija) smeštene pri vrhu i pri dnu silazne cevi na visini $H=1,7$ i $H=0,9$ m. Elektrode su povezane sa računarom preko USB pretvarača signala isoPOD™ EPU357 (eDAQ, Australija) kojim je beležena zavisnost električne provodljivosti u toku vremena.

Promena koncentracije rastvorenog kiseonika u tečnoj fazi sa vremenom merena je kiseoničnom optičkom elektrodom IntelliCAL™ LDO101 (Hach Lange, Nemačka), sa tačnošću od $\pm 0,2$ g/m³. Elektroda je smeštena u uzlaznu cev na odstojanju od 150 cm od uvodnika. Primenom optičke elektrode izbegnuti su nedostaci koji se javljaju u radu sa polarografskim elektrodama. Na primer, optička elektroda ne sadrži membranu koja ograničava brzinu odziva elektrode usled difuzije kiseonika kroz nju. Takođe, zahvaljujući odsustvu membrane rukovanje i održavanje elektroda je znatno olakšano.

Izmereni podaci su prenošeni na računar pomoću multimetra istog proizvođača tipa HQ40d.

Rad kolone u odnosu na tečnu fazu bio je šaržnog tipa. Sva merenja su izvođena na temperaturi od $20 \pm 1^\circ\text{C}$ koja je praćena živinim termometrom TLOS sa tačnošću od $\pm 0,1^\circ\text{C}$.

4.2 Fizičke karakteristike ispitivanih tečnosti

Pri ispitivanju hidrodinamičkih i masenoprenosnih karakteristika ALSR i ALSRI u ovom radu korišćene su česmenska voda, 0,011 mas.% *n*-butanol, 46 mas.% rastvor konzumnog šećera kao i različite koncentracije vodenih rastvora karboksimetilceluloze (CMC). Fizičke karakteristike ispitivanih tečnosti određivane na 20°C prikazane su u tabeli 4.2. Površinski napon određivan je tenziometrom Sigma 703D (KSC Instruments, Finska) primenom metode otkidanja prstena (Du Nouy). Gustina ispitivanih tečnosti je merena tenziometrom u sklopu procedure merenja površinskog napona. Reološka merenja njutnovskih (šećer) i nenjutnovskih (CMC) viskoznih tečnosti izvedena su na rotacionom viskozimetru HAAKE Rheostress RS600 (Thermo Electron Corporation, Nemačka) sa kupa-ploča mernim sistemom C60/1Ti na $20 \pm 0,1^\circ\text{C}$. S obzirom da se vodeni rastvori CMC-a ponašaju kao pseudoplastične tečnosti, merenjem napona smicanja (τ) za različite brzine smicanja određivan je faktor konzistencije (K) i indeks toka (n) na osnovu opšte poznatog stepenog modela:

$$\tau = K\dot{\gamma}^n \quad (4.2)$$

U prilogu 1 prikazani su rezultati fitovanja na osnovu izmerenih vrednosti za viskozne tečnosti. Fizičke osobine date u tabeli 4.2 predstavljaju srednje vrednosti dva merenja pri čemu su vrednosti viskoziteta za vodu i *n*-butanol preuzete iz literature.

Tabela 4.2 Fizičke karakteristike korišćenih tečnosti na 20°C

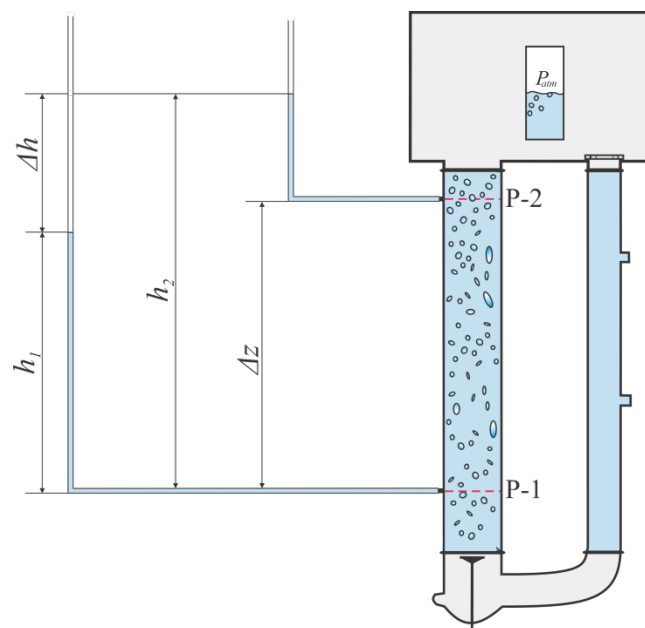
Tečna faza	Koncentracija (mas.%)	ρ [kg/m ³]	σ [mN/m]	K [Pa·s ^{<i>n</i>}]	n [-]
voda	–	999	73,7	0,0010	1,0
<i>n</i> -butanol	0,011	998	71,8	0,0010	1,0
CMC-1	0,1	1001	73,2	0,0104	0,845
CMC-2	0,2	1000	73,5	0,0402	0,751
CMC-3	0,3	1002	73,1	0,1004	0,684
CMC-4	0,4	1002	73,4	0,2342	0,620
šećer	31,5	1154	65,4	0,0035	1,0
šećer	46	1231	63,3	0,0108	1,0

4.3 Metode merenja

U okviru ovog rada izvršena su eksperimentalna merenja sadržaja gasa u uzlaznoj cevi, brzine tečnosti u silaznoj cevi i zapreminskog koeficijenta prenosa mase u obe konfiguracije *airlift* reaktora sa spoljašnjom recirkulacijom. Pored ovih ispitivanja, urađena su i dodatna merenja ukupnog sadržaja gasa u obe konfiguracije kao i sadržaja gasa i brzine tečnosti u silaznoj cevi ALSR-a sa ugrađenim blendama. Pregled različitih eksperimentalnih metoda za određivanje hidrodinamičkih i masenoprenosnih karakteristika *airlift* reaktora dat je u revijalnom radu Boyer i sar. (2002) te su stoga u nastavku detaljno opisane samo metode primenjene u ovom radu. Eksperimentalna ispitivanja su takođe obuhvatila i određivanje brzine rotiranja impelera u ALSRI pri različitim protocima gasa. Sva merenja su izvršena najmanje dvaput i prikazane su srednje vrednosti.

4.3.1 Određivanje sadržaja gasa u uzlaznoj cevi

U dvema konfiguracijama *airlift* reaktora korišćenim u ovom radu primenjene su različite metode za merenje sadržaja gasa u uzlaznoj cevi. U konvencionalnom *airlift* reaktoru sa spoljašnjom recirkulacijom (ALSR) sa i bez ugrađenih blendi sadržaj gasa u uzlaznoj cevi određivan je manometrijskom metodom merenjem hidrostatičkih pritisaka duž uzlazne cevi (slika 4.4).



Slika 4.4 Određivanje sadržaja gasa merenjem hidrostatičkih pritisaka duž uzlazne cevi ALSR

Ovom metodom se postavljanjem Bernulijeve jednačine za dva preseka na mestima gde su priključene piezometarske cevi (P-1 i P-2), uz zanemarivanje gubitaka usled trenja i promene brzine između uočenih preseka, dobija izraz:

$$P_1 - P_2 = \Delta P_{12} = \rho_{GL} g \Delta z \quad (4.3)$$

Ukoliko se zanemari udeo gasne faze ($\rho_G \ll \rho_L$) gustina dvofazne disperzije je:

$$\rho_{GL} = \rho_L (1 - \varepsilon_{GR}) \quad (4.4)$$

pa kombinovanjem prethodna dva izraza dobijamo:

$$\Delta P_{12} = \rho_L (1 - \varepsilon_{GR}) g \Delta z \quad (4.5)$$

Imajući u vidu da je:

$$P_1 = P_{atm} + \rho_L g h_1 \quad (4.6)$$

$$P_2 = P_{atm} + \rho_L g (h_1 + \Delta h - \Delta z) \quad (4.7)$$

razlika hidrostatičkih pritisaka se može iskazati i na sledeći način:

$$P_1 - P_2 = \Delta P_{12} = \rho_L g (\Delta z - \Delta h) \quad (4.8)$$

Kombinovanjem krajnjih izraza za računanje razlike hidrostatičkih pritisaka (4.5 i 4.8), dobija se jednostavan izraz za računanje sadržaja gasa u uzlaznoj cevi *airlift* reaktora sa spoljašnjom recirkulacijom:

$$\varepsilon_{GR} = \frac{\Delta h}{\Delta z} \quad (4.9)$$

Relativna greška merenja sadržaja gasa u uzlaznoj cevi ovom metodom iznosila je maksimalno 2%.

S obzirom da samo-rotirajući impeleri, prisutni u uzlaznoj cevi ALSRI, predstavljaju mesne otpore koji se ne mogu zanemariti, metoda merenja hidrostatičkih pritisaka nije adekvatna za određivanje sadržaja gasa u uzlaznoj cevi ove konfiguracije reaktora. Iz tog razloga, kao i nemogućnosti primene drugih metoda za merenje, usvojen je alternativni postupak za određivanje vrednosti sadržaja gasa u uzlaznoj cevi ALSRI. Izvršen je niz eksperimenata u konfiguraciji bez impelera na osnovu kojih su konstruisani nomogrami koji služe za određivanje sadržaja gasa u konfiguraciji sa impelerima. Radi konstruisanja nomograma, određivan je sadržaj gasa u uzlaznoj cevi manometarskom metodom (ε_{GR}) i metodom merenja povećanja zapremine disperzije ($\varepsilon_{GR,v}$), kao i brzina tečnosti u silaznoj cevi (W_{LD}).

Sadržaj gasa u uzlaznoj cevi određen je metodom merenja povećanja zapremine disperzije, korišćenjem odnosa zapremine gasa (V_G) i aerisane zapremine uzlazne cevi (V_R) na osnovu sledećeg izraza:

$$\varepsilon_{GR,v} = \frac{V_G}{V_R} = \frac{V_{GL}-V_L}{V_R} = \frac{A_s(h_{s1}-h_{s0})}{V_R} \quad (4.10)$$

gde su h_{s0} i h_{s1} nivoi tečnosti u piezometarskoj cevi pre odnosno nakon uvođenja gasa, dok je A_s površina poprečnog preseka separatora. Relativna greška određivanja sadržaja gasa ovom metodom nije prelazila 11%. Ova metoda podrazumeva merenje promene visine nivoa tečnosti u separatoru, koja je praćena pomoću piezometarske cevi postavljene pri dnu separatora. I u ovom slučaju staklena kapilara je postavljena na ulaz piezometarske cevi kako bi se sprečile pulzacije nivoa tečnosti i omogućilo preciznije očitavanje nivoa. Iako je primenjen stabilizator toka formirali su se talasi na površini tečnosti duž separatora što je dodatno komplikovalo merenje. Nejednak nivo tečnosti duž separatora je značajno uticao na rezultate merenja, te su dobijene vrednosti ukupnog sadržaja gasa bile niže od stvarnih, što je primećeno i u radu Akita i sar. (1994).

Ipak, prilikom izvođenja eksperimenata u ALSR uočena je pravolinijska zavisnost između sadržaja gasa merenog metodom povećanja zapremine dvofaznog sistema ($\varepsilon_{GR,v}$) i sadržaja gasa u uzlaznoj cevi merenog metodom hidrostatičkih pritisaka (ε_{GR}). Važno je napomenuti da se ta zavisnost menja sa promenom otpora toku tečnosti, kao što je slučaj u prisustvu samo-rotirajućih impelera. Iz tog razloga, zavisnosti između $\varepsilon_{GR,v}$ i ε_{GR} su utvrđene pri različitim brzinama tečnosti koje su ostvarene ugradnjom prigušnih blendi u ALSR. Prilog 2 ilustruje dobijenu zavisnost $\varepsilon_{GR,v}$ od ε_{GR} za sistem vazduh-voda i jednostruki uvodnik.

Pored zavisnosti ε_{GR} od $\varepsilon_{GR,v}$, za svaku tečnu fazu i tip distributora gasa određena je veza između sadržaja gasa i brzine tečnosti korišćenjem uprošćenog izraza bilansa količine kretanja u reaktoru (Verlaan, 1987):

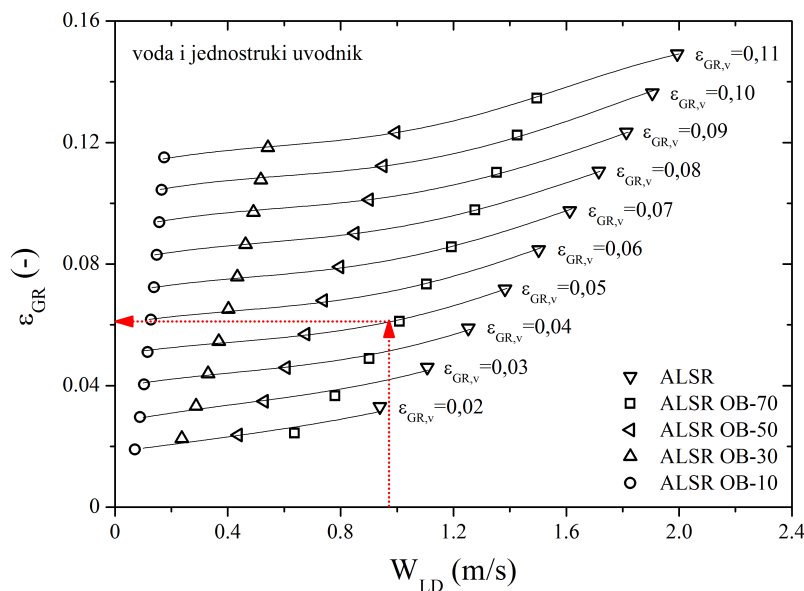
$$W_{LD}^2 = \frac{2gH}{K_f} \varepsilon_{GR} \quad (4.11)$$

gde su K_f ukupni frikcionni koeficijent, g gravitaciono ubrzanje i H visina reaktora. U prilogu 3 prikazana je zavisnost W_{LD} od ε_{GR} dobijena eksperimentalnim putem i računski na osnovu relacije 4.11 za vodu i jednostruki uvodnik.

Zahvaljujući međusobnoj zavisnosti $\varepsilon_{GR,v}$, ε_{GR} i W_{LD} konstruisan je nomogram zavisnosti ε_{GR} od W_{LD} za različite vrednosti $\varepsilon_{GR,v}$. Na slici 4.5 prikazan je nomogram

dobijen primenom prethodno opisanog postupka za sistem vazduh-voda i jednostruki uvodnik.

Sa konstruisanog nomograma se na osnovu vrednosti sadržaja gasa u uzlaznoj cevi u ALSRI, izmerenog metodom merenja povećanja zapremine, i izmerene brzine tečnosti mogu očitati vrednosti sadržaja gasa u uzlaznoj cevi ALSRI.



Slika 4.5 Nomogram za određivanje sadržaja gasa za sistem vazduh-voda i jednostruki uvodnik u ALSRI

4.3.2 Određivanje brzine tečnosti u silaznoj cevi

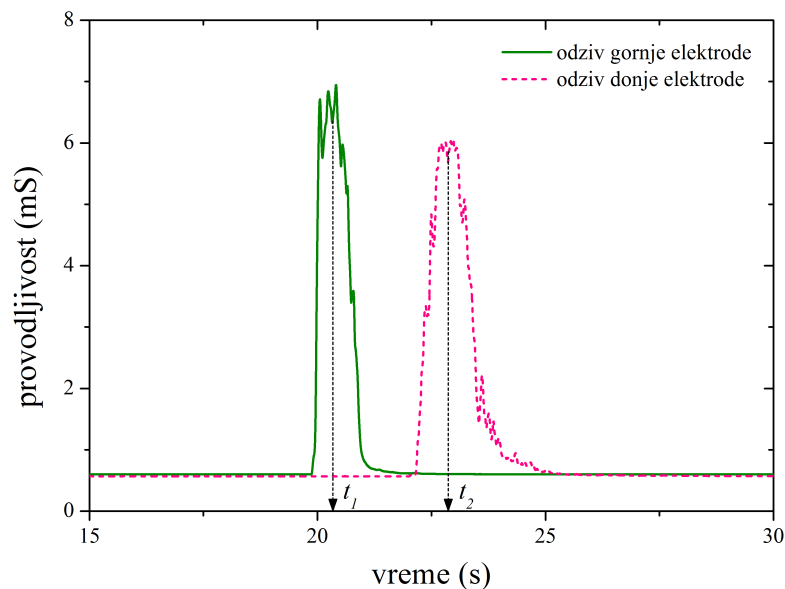
Brzina tečnosti u silaznoj cevi (W_{LD}) je u obe konfiguracije reaktora određivana metodom obeleživača toka, odnosno konduktometrijski, ubrizgavanjem 30 ml 4 mol/l rastvora NaCl. Električna provodljivost tečnosti merena je svake 0,02 s pomoću dve minijature konduktometrijske elektrode i odgovarajućeg pretvarača signala opisanih u potpoglavlju 4.1. Mesto ubrizgavanja obeležene supstance nalazilo se na vrhu silazne cevi, 15 cm iznad gornje elektrode (slika 4.1). Pomenuta količina obeležene supstance odabrana je na osnovu prethodnih istraživanja prevashodno da obezbedi što veći broj ubrizgavanja obeležene supstance bez ometanja hidrodinamičkih karakteristika sistema a da se istovremeno postigne zadovoljavajuća kriva odziva (Keitel i Onken, 1981). Kod njutnovskih tečnosti, odabrana količina obeležene supstance dozvoljavala je 6 ubrizgavanja u jednom setu merenja, to jest jednoj šarži, bez remećenja hidrodinamike, dok su u nenjutnovskim rastvorima samo dva merenja izvršena kako bi se izbegle eventualne promene reoloških osobina. Nakon završenog merenja u toku jedne šarže, reaktor je pražnjen, ispiran dok se ne uklone zaostale količine elektrolita i korišćene tečne faze, i zatim ponovo punjen odgovarajućom tečnom fazom.

Na slici 4.6 dat je primer odziva promene provodljivosti sa vremenom dobijen nakon igličastog ulaznog signala, prelaskom obeležene supstance preko konduktometrijskih sonde. Radi jasnoće grafika, prikazane su samo krive odziva tokom trajanja prve cirkulacije tj. prvi pikovi na gornjoj i donjoj elektrodi.

Nakon očitavanja vremena potrebnog da rastvor NaCl pređe rastojanje od prvog do drugog senzora ($t_2 - t_1$), brzina tečnosti u silaznoj cevi određena je na osnovu sledećeg izraza:

$$W_{LD} = \frac{L_{12}}{t_2 - t_1} \quad (4.12)$$

Maksimalna relativna greška u iznosu od 10% zapažena je pri najvećim protocima gasa.



Slika 4.6 Krive odziva konduktometrijskih elektroda prilikom određivanja brzine tečnosti u silaznoj cevi

4.3.3 Određivanje zapreminskog koeficijenta prenosa mase

Za određivanje zapreminskog koeficijenta prenosa mase u obe konfiguracije reaktora korišćena je dinamička (nestacionarna) metoda, koja se zasniva na praćenju koncentracije rastvorenog kiseonika na jednoj poziciji u reaktoru, nakon stepenastog ulaznog signala (Merchuk i sar., 1990; Garcia-Ochoa i Gomez, 2009). U te svrhe korišćena je kiseonična optička elektroda sa multimetrom čije su karakteristike date u potpoglavlju 4.1. Na samom početku merenja uvođenjem azota pomoću distributara kiseonik iz tečne faze je skoro u potpunosti uklonjen (koncentracija kiseonika bila je ispod $0,3 \text{ g/m}^3$). Nakon toga, dovod vazduha u reaktor je ponovo uspostavljen i promena

koncentracije rastvorenog kiseonika sa vremenom merena je optičkom elektrodom. Između uvođenja azota i vazduha potrebno je sačekati kako bi mali mehurova azota mogli u potpunosti da napuste tečnost jer bi njihovo prisustvo znatno uticalo na rezultate. Merenje koncentracije rastvorenog kiseonika je trajalo dovoljno dugo (od 3 do 200 min u zavisnosti od eksperimentalnih uslova), tj. dok nije postignuta ravnotežna koncentracija kiseonika. Bilans mase kiseonika u tečnoj fazi, uz pretpostavku o idealnoj izmešanosti tečne faze, se može predstaviti sledećom diferencijalnom jednačinom:

$$\frac{dC_L}{dt} = k_L a_L (C^* - C_L) \quad (4.13)$$

gde su C_L i C^* trenutna odnosno ravnotežna koncentracija rastvorenog kiseonika. S druge strane, dinamika kiseonične elektrode se može opisati diferencijalnom jednačinom prvog reda:

$$\frac{dC_E}{dt} = K_E (C_L - C_E) \quad (4.14)$$

gde je K_E vremenska konstanta elektrode a C_E koncentracija rastvorenog kiseonika izmerena elektrodom. Vremensko kašnjenje elektrode je uzeto u obzir pošto je uočen sporiji odziv kiseonične elektrode pri radu sa viskozim tečnostima. Rešavanjem diferencijalnih jednačina datih izrazima 4.13 i 4.14 dobija se sledeće rešenje:

$$\frac{C^* - C_E}{C^* - C_{L0}} = \frac{1}{K_E - k_L a_L} (K_E e^{-k_L a_L t} - k_L a_L e^{-K_E t}) \quad (4.15)$$

Daljom transformacijom izraz 4.15 se može prikazati kao:

$$C_E = C^* - (C^* - C_{L0}) \frac{K_E e^{-k_L a_L t} - k_L a_L e^{-K_E t}}{K_E - k_L a_L} \quad (4.16)$$

Vremenska konstanta elektrode je određena posebnim postupkom, postavljanjem elektrode prvo u posudu sa ispitivanom tečnošću zasićenom azotom kako bi izmerena koncentracija iznosila 0 g/m^3 . Po postizanju date koncentracije, brzim premeštanjem elektrode u posudu sa ispitivanom tečnošću zasićenom kiseonikom, koja je intenzivno mešana, praćen je odziv promene koncentracije rastvorenog kiseonika sa vremenom. U prilogu 4 prikazani su karakteristični odzivi elektrode dobijeni u vodi i rastvoru šećera. Vremenska konstanta elektrode računata je fitovanjem eksperimentalnih podataka sledećim izrazom:

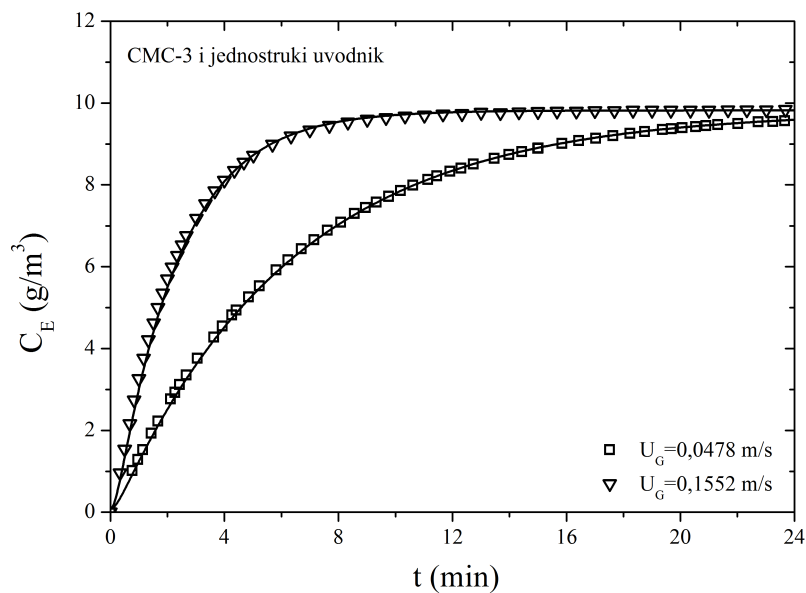
$$C_E = C^* - C^* e^{-K_E t} \quad (4.17)$$

koji predstavlja rešenje diferencijalne jednačine koja opisuje dinamiku kiseonične elektrode (izraz 4.14) kada je koncentracija kiseonika u tečnoj fazi jednaka ravnotežnoj koncentraciji ($C_L=C^*$). U tabeli 4.3 date su vrednosti vremenske konstante elektrode izmerene prethodno opisanim postupkom.

Tabela 4.3 Vrednosti vremenske konstante kiseonične elektrode K_E

Tečna faza	K_E (s ⁻¹)	R^2
voda	0,13	0,99
<i>n</i> -butanol	0,17	0,98
CMC-1	0,11	0,99
CMC-2	0,12	0,99
CMC-3	0,08	0,99
CMC-4	0,07	0,98
šećer	0,05	0,99

Na osnovu odgovora na stepenastu promenu koncentracije kiseonika koji se apsorbuje iz vazduha računat je k_{LaL} fitovanjem eksperimentalnih podataka pomoću izraza 4.16. Na osnovu preporuke Merchuk i sar. (1990), koncentracije kiseonika niže od $0,1C^*$ nisu uzimane u obzir kako bi se izbegao uticaj puštanja kolone u rad. Svi proračuni su obavljani nelinearnom metodom najmanjih kvadrata primenom Levenberg-Marquardt algoritma u Matlab R2015b programu. Slika 4.7 prikazuje promenu koncentracije rastvorenog kiseonika sa vremenom dobijenu eksperimentalnim putem i na osnovu modela za rastvor CMC-3 primenom jednostrukog uvodnika u ALSR.



Slika 4.7 Karakteristične krive promene koncentracije rastvorenog kiseonika sa vremenom u ALSR. Legenda: simboli–eksperimentalne vrednosti; linije–izračunate vrednosti na osnovu modela (izraz 4.16)

U svim slučajevima, ostvareno je izuzetno slaganje izmerenih i izračunatih vrednosti, sa koeficijentom determinacije većim od 0,99. Imajući u vidu da se dobijene vrednosti zapreminskog koeficijenta prenosa mase odnose na zapreminu tečnosti ($k_L a_L$) a da se u literaturi uglavnom koriste zapreminski koeficijenti prenosa mase računati na zapreminu disperzije ($k_L a$) korišćena je njihova međusobna zavisnost data izrazom:

$$k_L a_L = \frac{k_L a}{1 - \varepsilon_{GR}} \quad (4.18)$$

Kombinovanjem izraza 4.16 i 4.18 određivan je $k_L a$ u obe konfiguracije reaktora. Uključujući greške merenja sadržaja gasa u uzlaznoj cevi i koncentracije rastvorenog kiseonika, relativna greška određivanja $k_L a$ bila je ispod 9%.

4.3.4 Određivanje brzine smicanja

Brzina smicanja (γ) računata je na osnovu metode koju su predložili Cerri i sar. (2008) koja kao karakterističnu veličinu koristi $k_L a$. Prema ovoj metodi, brzina smicanja određuje se na osnovu reoloških osobina tečnosti i zapreminskog koeficijenta prenosa mase. S obzirom da $k_L a$ zavisi od radnih uslova i geometrijskih karakteristika reaktora, ovom metodom se brzina smicanja može proceniti u obe konfiguracije ponaosob.

Niz eksperimenata izvršen je u vodi i njutnovskim rastvorima šećera (31,5 i 46 mas.%) nakon čega su dobijene vrednosti za $k_L a$ korelisane pomoću prividne brzine gasa (U_G) i dinamičke viskoznosti (μ) na osnovu sledećeg izraza:

$$k_L a = \beta U_G^\varphi \mu^\theta \quad (4.19)$$

Za nenjutnovske tečnosti, u kojima se umesto μ koristi prividna viskoznost (μ_a), analogno izrazu 4.19 dobija se:

$$k_L a = \beta U_G^\varphi (K\gamma^{n-1})^\theta \quad (4.20)$$

S druge strane, $k_L a$ se u sistemima sa nenjutnovskim tečnostima može korelisati pomoću U_G i faktora konzistencije (K) na osnovu sledećeg izraza:

$$k_L a = b U_G^c K^d \quad (4.21)$$

Kombinovanjem izraza 4.20 i 4.21 srednja brzina smicanja može se izraziti u funkciji prividne brzine gasa i reoloških parametara K i n na sledeći način:

$$\gamma = \left(\frac{1}{K}\right)^{\frac{1}{(n-1)}} \left(\frac{b U_G^c K^d}{\beta U_G^\varphi}\right)^{\frac{1}{\theta(n-1)}} \quad (4.22)$$

4.3.5 Određivanje brzine obrtanja impelera

Obrtanje impelera je snimano brzom kamerom Canon Ixus 500 HS, brzinom smenjivanja sličica od 240 fps (eng. *frames per second* – u prevodu sličica u sekundi) i rezolucijom od 320x240 piksela. Po jedno pero na svakom impeleru obojeno je žutom bojom radi lakšeg praćenja obrtanja impelera. Video snimak u trajanju od 10 s je zatim obrađen pomoću Matlab R2015b programa da bi se iz njega izvukao numerisan niz od 2400 sličica. Dobijene sekvence sličica su potom analizirane i brzina obrtanja impelera (o/min) je računata pomoću ukupnog broja punih rotacija obeleženog pera impelera na osnovu sledećeg izraza:

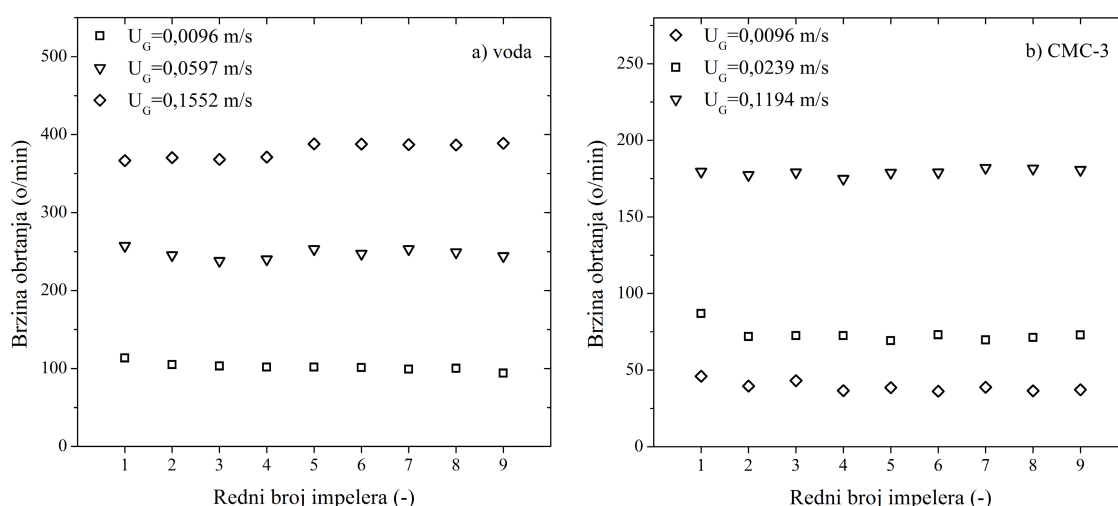
$$\text{brzina obrtanja} = \frac{N_r}{N_{f2} - N_{f1}} 60 \cdot 240 \quad (4.23)$$

gde su N_{f1} i N_{f2} redni brojevi sličica na kojima započinje prva odnosno završava se poslednja uočena rotacija, i N_r ukupan broj obrtaja impelera. Korišćenjem brze kamere sa zapisom od 240 fps relativna greška između dva merenja nije prelazila 4%.

5. REZULTATI I DISKUSIJA

5.1 Brzina obrtanja samo-rotirajućih impelera

Pri vizuelnom praćenju rotiranja impelera zapaženo je da su svi impeleri počeli da se okreću odmah po uvođenju gasa u svim korišćenim sistemima. Na slici 5.1 prikazane su postignute brzine obrtanja impelera u zavisnosti od njihove pozicije u uzlaznoj cevi za vodu i rastvor CMC-3. Kako bi se olakšalo njihovo pozicioniranje, samo-rotirajući impeleri su redom numerisani od dna uzlazne cevi ka vrhu, brojevima od 1 do 9. Može se uočiti da je pri ispitivanim prividnim brzinama gasa brzina obrtanja impelera približno ista bez obzira na njihovu poziciju u uzlaznoj cevi ALSRI.

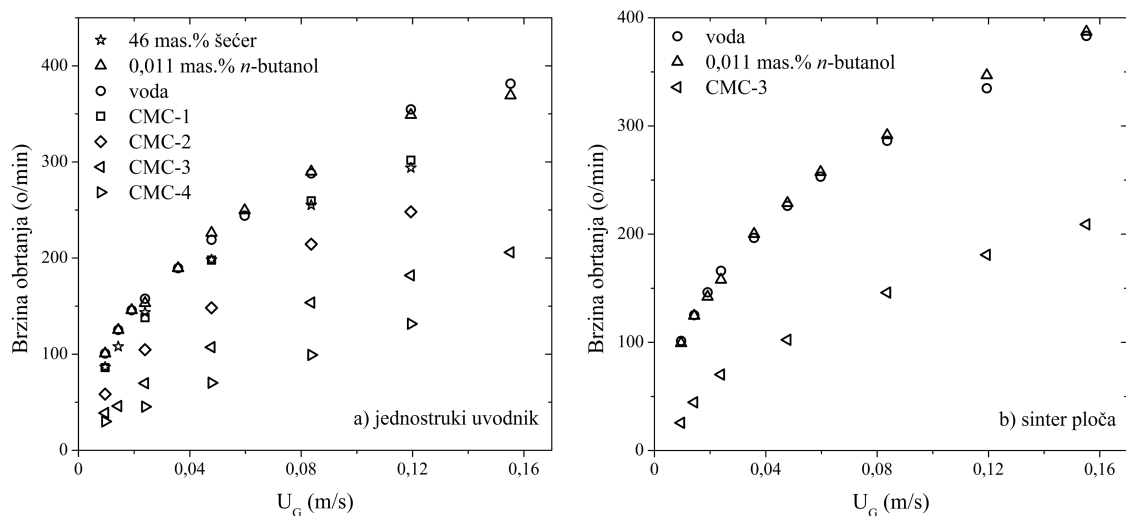


Slika 5.1 Zavisnost brzine obrtanja samo-rotirajućih impelera od njihove pozicije u uzlaznoj cevi ALSRI sa jednostrukim uvodnikom za a) vodu i b) CMC-3

Blago odstupanje, u iznosu od 11% i 20% za vodu odnosno rastvor CMC-3, zapaženo je pri manjim prividnim brzinama gasa kod impelera sa rednim brojem 1. Najverovatnije je veći broj obrtaja prvog impelera direktna posledica neposredne blizine

uvodnika gasa. Ipak, ako se izuzme ovo blago odstupanje pri manjim protocima gasa, može se zaključiti da je brzina obrtanja impelera nezavisna od pozicije impelera. Stoga je u nastavku ovog rada prilikom određivanja brzine obrtanja u ostalim sistemima posmatran samo jedan impeler.

Na slici 5.2 prikazane su vrednosti brzine obrtanja sedmog impelera u zavisnosti od prividne brzine gasa. Sa slike se može uočiti da brzina obrtanja impelera raste sa porastom U_G . Za razliku od rezultata dobijenih u ALUR (Tekić i sar., 2014), gde je pri niskim vrednostima U_G uočen nagli porast brzine obrtanja impelera dok je pri U_G većim od 0,05 m/s zabeležena konstantna brzina obrtanja, u ALSRI je primetan stalni porast brzine obrtanja koji je pri većim vrednostima U_G umereniji. U ALUR, formiranje hidrauličkog otpora proticanju tečnosti u vidu sitnijih mehurova nagomilanih na ulazu u anularni prostor dovodi do približno konstantne brzine cirkulacije tečnosti uprkos porastu U_G . Ovaj nedostatak izbegnut je u ALSRI korišćenom u ovom radu koji je omogućio gotovo potpuno razdvajanje gasa i tečnosti, te nije bilo dodatnih gubitaka energije usled prisustva mehurova gasa u silaznoj cevi.

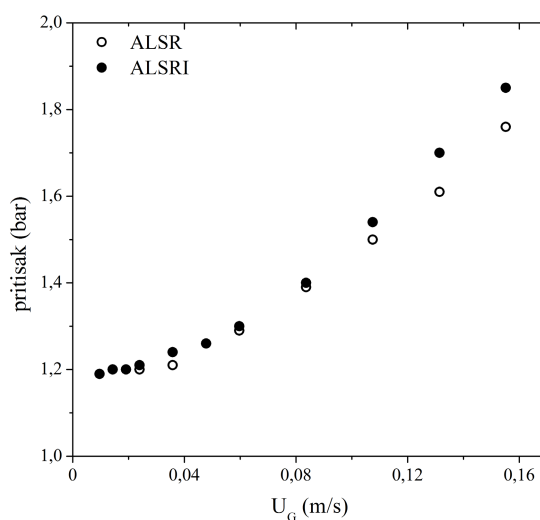


Slika 5.2 Uticaj osobina tečne faze i tipa distributora na brzinu obrtanja samo-rotirajućih impelera. a) jednostruki uvodnik i b) sinter ploča.

Takođe je ispitan uticaj osobina tečne faze i tipa distributora gasa na brzinu obrtanja impelera. Sa slike 5.2 uočava se da reološke osobine tečnosti imaju značajan uticaj na obrtanje impelera. U vodi i 0,011 mas.% *n*-butanolu ostvarene su približno iste vrednosti brzine obrtanja, u opsegu od 101 do 381 o/min. S druge strane, u viskoznim tečnostima postignute su manje brzine obrtanja impelera (30-302 o/min). Impeleri su se okretali sporije jer se energija u viskoznim tečnostima troši na savlađivanje sila trenja. Smanjenje je izraženije što je veća viskoznost, pa je u rastvoru CMC-4 zapažena do 3,5

puta manja brzina obrtanja, u odnosu na neviskozne tečnosti. Bez obzira na to, u svim ispitivanim sistemima postignute vrednosti brzine obrtanja impelera omogućile su razbijanje mehurova gasa i njihovu uniformniju radijalnu raspodelu u uzlaznoj cevi. Samo-rotirajući impeleri su sa sinter pločom korišćeni samo u vodi, 0,011 mas.% *n*-butanolu i rastvoru CMC-3, te se zaključci o uticaju tipa distributora odnose samo na ove tečne faze. Na osnovu slike 5.2 može se zaključiti da distributor gasa nema uticaj na brzinu obrtanja u vodi i *n*-butanolu, dok u rastvoru CMC-3 tip distributora utiče na broj obrtaja impelera samo pri $U_G=0,0096$ m/s. Naime, usled pojave mehurastog režima toka sa sinter pločom ostvarena je 34% manja brzina obrtanja u poređenju sa jednostrukim uvodnikom.

S obzirom da samo-rotirajući impeleri predstavljaju dodatan otpor proticanju tečnosti, neophodno je utvrditi da li se njihovom ugradnjom značajnije povećavaju energetska zahtevi u ALSRI. Slika 5.3 prikazuje uticaj impelera na pritisak gasa na ulazu u kolonu za sistem vazduh-voda i jednostruki uvodnik. Kao što se može videti, pritisak gasa na ulazu ne menja se sa ugradnjom impelera pri protocima gasa manjim od 0.09 m/s, što znači da konfiguracija sa impelerima ne troši dodatnu energiju, u odnosu na konfiguraciju bez impelera. Pri $U_G > 0,09$ m/s, u ALSRI dolazi do blagog porasta pritiska od oko 5%. Poređenjem ovih rezultata sa rezultatima koje su postigli Tekić i sar. (2014) u ALUR, u kojem je ostvaren porast od oko 17%, može se zaključiti da je porast pritiska u ALSRI znatno manji u odnosu na ALUR, čime su pretpostavke o efikasnijoj primeni samo-rotirajućih impelera u *airlift* reaktoru sa spoljašnjom recirkulacijom opravdane. Slično ponašanje zabeleženo je i u ostalim dvofaznim sistemima, pri čemu su u rastvorima CMC izmerene do 10% veće vrednosti pritiska u obe konfiguracije reaktora.



Slika 5.3 Uticaj ugradnje samo-rotirajućih impelera na pritisak gasa na ulazu u reaktor za sistem vazduh-voda i jednostruki uvodnik

5.2 Hidrodinamički režimi toka

5.2.1 Hidrodinamički režimi toka u ALSR

Vizuelno, ali i na osnovu promene nagiba krive na grafiku zavisnosti sadržaja gasa od prividne brzine gasa, u uzlaznoj cevi ALSR su zapaženi sledeći hidrodinamički režimi: mehurasti, prelazni, vrtložno-turbulentni i nestabilni klipni tok. Opseg ispitivanih brzina gasa, tip distributora i osobine tečne faze u značajnoj meri diktiraju koji će od navedenih režima biti prisutan.

Kada je korišćen jednostruki uvodnik bilo je primetno odsustvo mehurastog toka. Njegov izostanak može se opravdati činjenicom da je jednostruki uvodnik najmanje efikasna vrsta uvodnika. U neviskozim tečnostima, prelazni tok strujanja prelazi u vrtložno-turbulentni tok pri prividnim brzinama gasa u opsegu 0,0215-0,0343 m/s. Dodatak alkohola odložio je pojavu vrtložno-turbulentnog režima, što je i očekivano za sisteme koji suzbijaju koalescenciju mehurova.

U viskozim rastvorima CMC intenzitet turbulencije opada pa su formirani mehurovi stabilniji u pogledu njihove težnje ka dezintegraciji. Što je veća koncentracija, tj. viskoznost korišćenog rastvora CMC, stabilnost formiranih mehurova je veća. Usled relativno male viskoznosti rastvora CMC korišćenih u ovom radu, ipak je zapažena pojava koalescencije mehurova gasa. U rastvorima CMC-1 i CMC-2 pri brzinama gasa ispod 0,04 m/s uočen je prelazni režim, dok se pri većim brzinama gasa formira vrtložno-turbulentni režim. S druge strane, u rastvorima CMC-3 i CMC-4 koalescencija mehurova je znatno učestalija u odnosu na njihovo razbijanje, te zbog toga u uzlaznoj cevi ALSR nastaju veliki mehurovi gasa oblika sferične kape čak i pri veoma niskim protocima gasa. Stoga je u ovim rastvorima sa jednostrukim uvodnikom primećen nestabilan klipni tok pri malim U_G . Ovaj tok karakterišu klipovi gasa koji ispoljavaju određen vid nestabilnosti (Bajón Fernández i sar., 2015). Pored sferičnih kapa, u uzlaznoj cevi ALSR zapaženi su i veoma mali mehurovi gasa koji nastaju prilikom otkidanja zadnjeg dela (repa) mehura tokom procesa koalescencije, tj. stapanja dva mehura (Philip i sar., 1990). Sa porastom U_G javlja se vrtložno-turbulentni tok, dok je pri većim U_G (>0,1194 m/s) uočeni tok strujanja na granici između klipnog i vrtložno-turbulentnog.

Za razliku od nenjutnovskih tečnosti, u njutnovskim tečnostima povećane viskoznosti, kao što je rastvor šećera, formiraju se i veoma sitni mehurovi. Pri manjim U_G uočen je prelazni režim koji prelazi u vrtložno-turbulentni pri brzinama gasa od oko

0,035 m/s. Karakteristika ovog sistema je izrazito bela boja rastvora izazvana barbotiranjem gasa. Pri protocima gasa većim od 0,1194 m/s dolazi do intenzivnijeg formiranja pene koja znatno otežava merenje hidrodinamičkih veličina. Zbog toga su eksperimenti sa šećerom izvođeni pri manjim protocima gasa.

Uočeno je da sinter ploča znatno utiče na hidrodinamičke režime, pogotovo u neviskoznom tečnostima i u rastvorima CMC-3 i CMC-4, u kojima se javlja mehurasti tok pri veoma malim brzinama gasa. Veća viskoznost rastvora CMC-3 i CMC-4 omogućila je formiranje mehurastog toka strujanja pri najmanjoj brzini gasa odnosno brzinama gasa ispod 0,024 m/s. Pri $U_G \sim 0,04$ m/s prelazni režim u potpunosti prelazi u vrtložno-turbulentni režim strujanja. Za vodu i *n*-butanol uočene granične vrednosti prividnih brzina gasa između mehurastog i prelaznog toka iznose 0,0215 odnosno 0,032 m/s, dok između prelaznog i vrtložno-turbulentnog iznose 0,0756 odnosno 0,091 m/s. Kao i u slučaju jednostrukog uvodnika, dodatak alkohola odložio je pojavu vrtložno-turbulentnog režima usled inhibirajućeg dejstva alkohola na koalescenciju mehurova. S druge strane, poređenjem ovih graničnih vrednosti sa vrednostima uočenim sa jednostrukim uvodnikom može se zaključiti da je pored pojave mehurastog toka, korišćenjem sinter ploče odložena pojava vrtložno-turbulentnog režima.

Poređenjem dobijenih rezultata sa rezultatima prethodnih istraživanja režima, mogu se uočiti izvesna neslaganja u pogledu granica režima. Na primer, za sistem vazduh-voda Verlaan (1987) i Joshi i sar. (1990) su uočili da je granica prelaska iz mehurastog u turbulentni tok bila pri prividnoj brzini gasa od 0,05 m/s. Slično su primetili Abashar i sar. (1998) koji su odredili početak i kraj prelaznog režima pri prividnoj brzini gasa u iznosu od 0,02 odnosno 0,043 m/s. S druge strane, Vial i sar. (2002) odredili su početak prelaznog toka pri brzini gasa od 0,05 m/s, a kraj pri 0,1 m/s. Primećene razlike posledica su zavisnosti režima toka od geometrijskih karakteristika reaktora, distributora gasa, osobina tečne faze i radnih uslova u reaktoru.

5.2.2 Hidrodinamički režimi toka u ALSRI

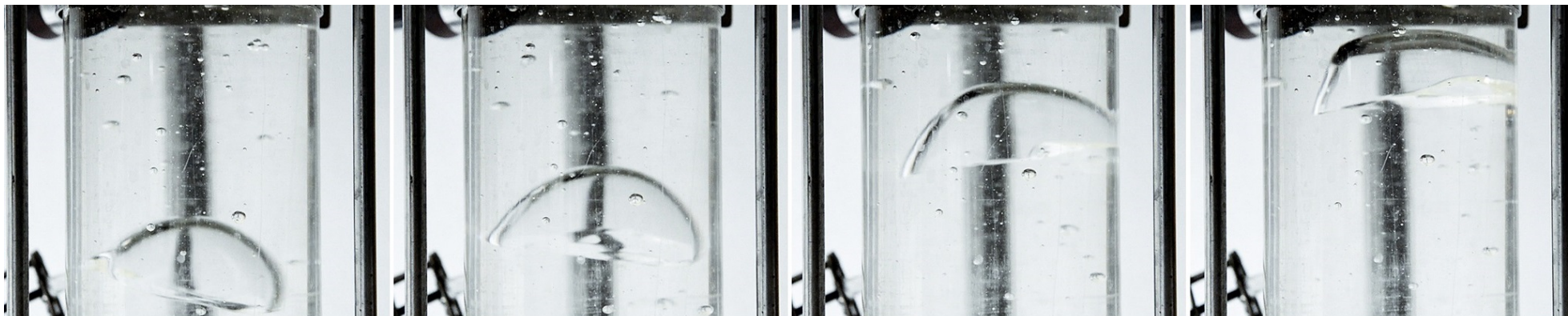
Ugradnja samo-rotirajućih impelera u velikoj meri utiče na ponašanje mehurova u svim korišćenim tečnim fazama. Jedna od značajnijih posledica njihovog korišćenja je pojava mehurastog toka za sistem *n*-butanol i jednostruki uvodnik pri malim protocima gasa. Ovakvo ponašanje verovatno je rezultat kako uticaja ugradnje impelera tako i osobina korišćene tečne faze. Naime, prvobitno pod uticajem impelera dolazi do

razbijanja mehurova i formiranja sitnijih mehurova koji su veoma stabilni pošto je njihova koalescencija sprečena usled inhibirajuće prirode rastvora *n*-butanola.

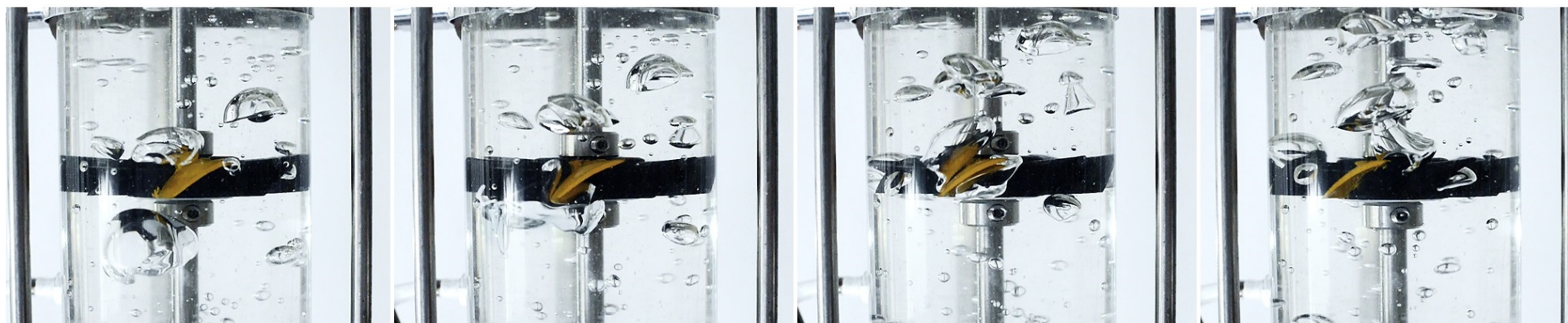
Značajan uticaj ugradnje impelera na režime strujanja takođe je potvrđen odlaganjem granice prelaza između režima u slučaju oba distributora. Osim toga, vizuelno je uočena uniformnija radijalna raspodela mehurova gasa u konfiguraciji sa impelerima. Uticaj ugradnje impelera na hidrodinamičke režime naročito je izražen u viskoznijim rastvorima CMC-3 i CMC-4 sa jednostrukim uvodnikom u kojima je usled dezintegracije sferičnih kapa prisutan prelazni umesto nestabilnog klipnog režima.

Fotografska metoda primenjena je za opisivanje mehanizma razbijanja sferičnih kapa pomoću samo-rotirajućih impelera za sistem CMC-3 i jednostruki uvodnik. Osnovu ove metode predstavlja snimanje video zapisa koji se dalje obrađuje kako bi se iz njega izvukao niz fotografija. Fotografije su dobijene snimanjem unutrašnjosti uzlazne cevi u obe konfiguracije, ALSR (slika 5.4a) i ALSRI (slika 5.4b), na mestu gde je pozicioniran sedmi impeler, tj. na udaljenosti $H=1,4$ m od distributora gasa. Niz fotografija dobijenih u ALSRI prikazuje mehur neposredno pre kontakta sa impelerom, njegovu interakciju sa impelerom do koje dolazi nekoliko trenutaka kasnije, i nedugo zatim formiranje manjih mehurova. Dobijene slike potvrdile su da se pri istoj prividnoj brzini gasa mehurovi ponašaju drugačije u ALSRI, u poređenju sa ALSR. Na osnovu ovog niza fotografija može se uočiti da prilikom kontakta mehurova gasa, u ovom slučaju sferičnih kapa, sa lopaticama impelera dolazi do efikasnog razbijanja, tj. dezintegracije mehurova. Nakon toga, novoformirani sitniji mehurovi nastavljaju da se kreću nagore i kako raste njihova udaljenost od impelera neki od njih stupaju u kontakt te koalesciraju. Bez obzira na ovo, ubrzo ponovo dolazi do dezintegracije mehurova gasa koja usled blizine narednog impelera preovlađuje nad koalescencijom. Ovakvo ponašanje, u kom se naizmenično smenjuju fenomeni koalescencije i razbijanja mehurova, izuzetno pogoduje prenosu mase (Maretto i Krishna, 1999). Takođe, poređenjem mehura pre nego što stupi u kontakt sa impelerom u ALSRI, sa sferičnom kapom prisutnom u ALSR, može se uočiti da mehur u ALSRI ima manji prečnik i manju brzinu isplivavanja. Ovim se dodatno potvrđuje uticaj samo-rotirajućih impelera na hidrodinamiku *airlift* reaktora sa spoljašnjom recirkulacijom pošto su manje dimenzije mehura koji se približava sedmom impeleru posledica dejstva prethodnih impelera.

a)



b)

 $t=0$ ms $t=33,9$ ms $t=67,8$ ms $t=101,7$ ms

Slika 5.4 Niz slika koje opisuju ponašanje mehurova u uzlaznoj cevi na poziciji sedmog impelera za sistem CMC-3 i jednostruki uvodnik pri $U_G=0,0096$ m/s. a) ALSR i b) ALSRI.

5.3 Sadržaj gasa u uzlaznoj cevi ALSR sa i bez impelera

5.3.1 Sadržaj gasa u uzlaznoj cevi ALSR

Uticaj prividne brzine gasa na sadržaj gasa u uzlaznoj cevi ALSR, u zavisnosti od korišćene tečne faze i tipa distributora, može se videti na slikama 5.5 i 5.6. Uočljiv je stalni porast sadržaja gasa sa porastom prividne brzine gasa. Takođe, može se primetiti da je, usled većeg nagiba krive sadržaj gasa-prividna brzina gasa, uticaj prividne brzine gasa veći pri manjim protocima (mehurast i prelazni režim) nego pri većim protocima gasa (vrtložno-turbulentan režim) za oba uvodnika.

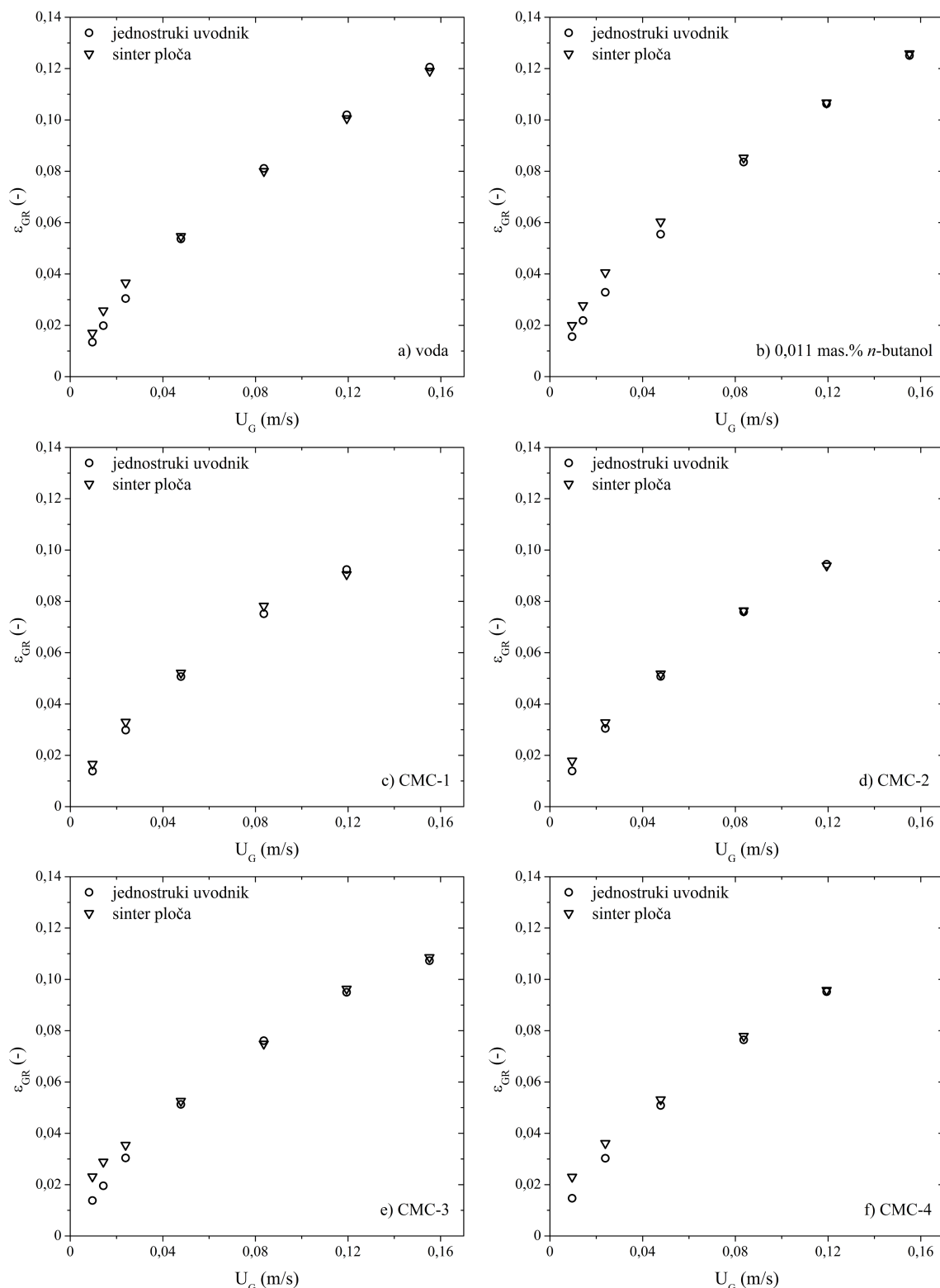
Tip distributora gasa ima uticaj na primarnu disperziju gasa, odnosno početnu veličinu mehurova gasa, i samim tim utiče i na hidrodinamiku ALSR. Slika 5.5 prikazuje uticaj vrste distributora na sadržaj gasa u uzlaznoj cevi. Uočljiv je uticaj distributora samo pri nižim vrednostima prividne brzine gasa, pri kojima je zapažen veći ε_{GR} za sinter ploču. Tako je korišćenjem sinter ploče kao uvodnika ostvaren porast sadržaja gasa od oko 27% u sistemima sa vodom i 0,011 mas.% *n*-butanolom u odnosu na jednostruki uvodnik. Slično poboljšanje u iznosu od oko 19% i 28% ostvareno je i u sistemima sa manje viskoznim rastvorima, kao što su CMC-1 odnosno CMC-2. S druge strane, znatno veći porast ε_{GR} u uzlaznoj cevi postignut je u viskoznijim rastvorima CMC-3 (67%) i CMC-4 (57%) korišćenjem sinter ploče. Pošto je viskoznost pomenutih rastvora relativno mala, primenom sinter ploče u njima nije zapažena koalescencija pri malim brzinama gasa. Mehurovi koji se formiraju na otvoru distributora veoma su stabilni i zbog toga je prisutan mehurast tok. Usled većeg otpora kretanju u viskoznim rastvorima CMC-3 i CMC-4, brzina isplivavanja mehurova gasa znatno je manja pa je njihovo vreme boravka u uzlaznoj cevi veće. Upravo iz tog razloga sa sinter pločom je najveći porast sadržaja gasa postignut u rastvorima CMC-3 i CMC-4.

Pri većim protocima gasa, u kojima dominiraju inercione sile, izmerene su skoro iste vrednosti sadržaja gasa, bez obzira na tip distributora gasa, što ukazuje da je uticaj distributora na sadržaj gasa zanemarljiv. Slične zaključke izveli su i drugi autori (Miyahara i sar., 1999; Cao i sar., 2008).

Zavisnost sadržaja gasa od vrste tečne faze prikazana je na slici 5.6. Može se uočiti slabiji uticaj dodatka alkohola na sadržaj gasa za obe vrste korišćenih uvodnika. Pri većim prividnim brzinama gasa izmeren je porast ε_{GR} od oko 4% za jednostruki uvodnik, i oko 6% za sinter ploču, u odnosu na vodu. Pri većim prividnim brzinama

Sadržaj gasa u uzlaznoj cevi ALSR sa i bez impelera

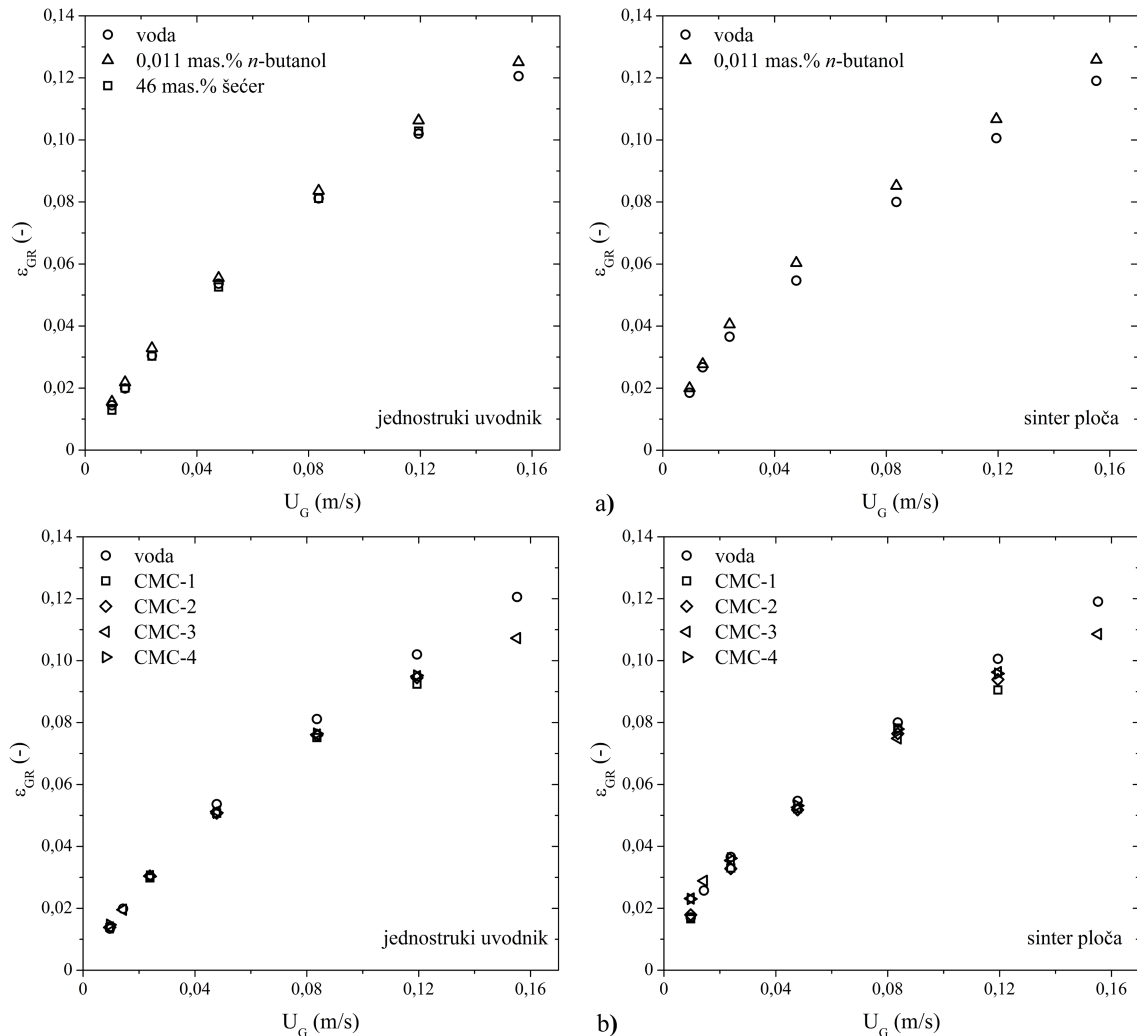
gasu, tj. u prelaznom i turbulentnom režimu strujanja težnja mehurova za koalescencijom je veća, te je i inhibirajući uticaj alkohola izraženiji.



Slika 5.5 Uticaj tipa distributora gasa na sadržaj gasa u ALSR. a) voda, b) 0,011 mas.% *n*-butanol, c) CMC-1, d) CMC-2, e) CMC-3 i f) CMC-4.

Usled intenzivnije koalescencije mehurova u pseudoplastičnim rastvorima CMC pri $U_G > 0,0478$ m/s ostvarene su do 11% manje vrednosti ε_{GR} u poređenju sa vodom.

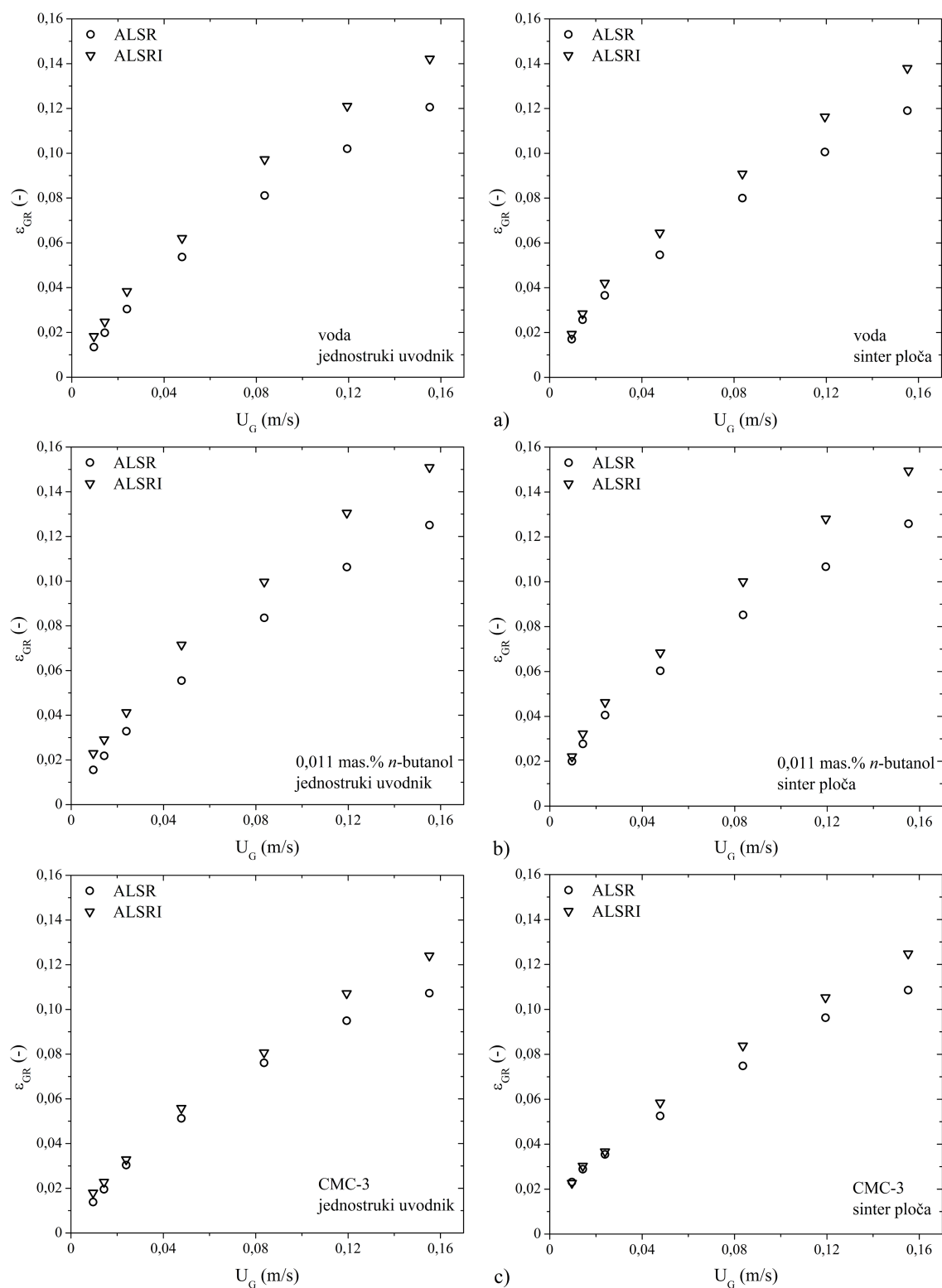
Može se uočiti da je umanjeње približno isto za sve rastvore CMC. Međutim, pri malim prividnim brzinama gasa smanjenje ε_{GR} nije uočeno usled dvojakog uticaja viskoznosti. Naime, pored negativnog uticaja na ε_{GR} usled koalescencije, viskoznost deluje pozitivno na ε_{GR} tako što povećava otpor kretanju mehurova, čime se snižava njihova brzina isplivavanja i povećava vreme boravka. Sa slike 5.6b može se videti da se pri malim U_G u sistemima sa jednostrukim uvodnikom u izvesnoj meri potiru suprotni efekti viskoznosti pa se postižu približno iste vrednosti ε_{GR} kao sa vodom. S druge strane, kao što je već rečeno, korišćenjem sinter ploče formiraju se sitniji mehurovi koji su veoma stabilni pri malim U_G jer se još uvek ne pojavljuju fenomeni koalescencije. Povrh toga, u rastvorima CMC-3 i CMC-4 veći su otpori proticanju mehurova pa su i njihova vremena boravka u uzlaznoj cevi ALSR veća. Stoga su korišćenjem sinter ploče u rastvorima CMC-3 i CMC-4 pri malim U_G ostvarene do 36% veće vrednosti ε_{GR} u poređenju sa vodom.



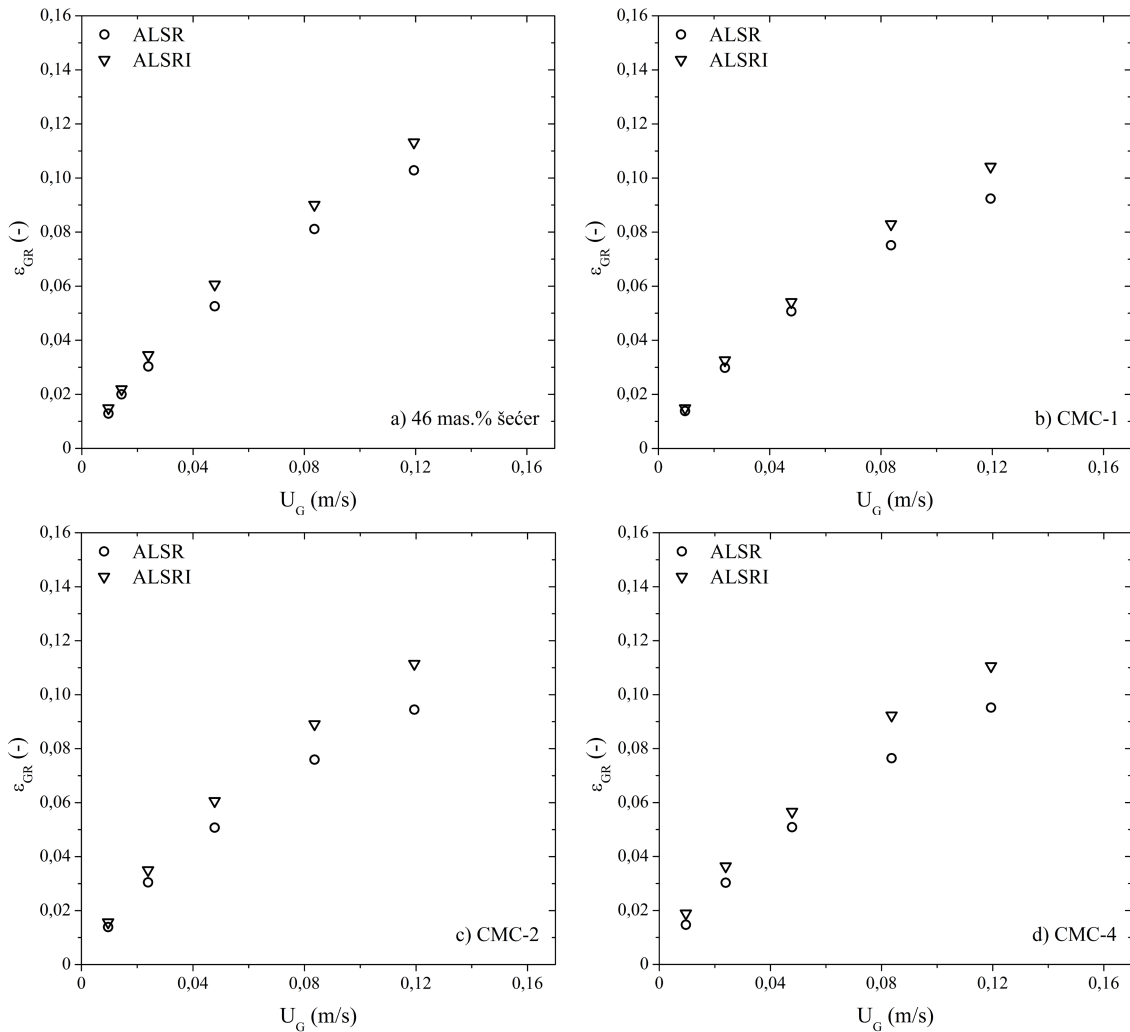
Slika 5.6 Uticaj karakteristika tečne faze na sadržaj gasa u ALSR.
a) njutnovske tečnosti i b) nenjutnovske tečnosti.

5.3.2 Uticaj ugradnje samo-rotirajućih impelera na sadržaj gasa u uzlaznoj cevi

Uticaj ugradnje samo-rotirajućih impelera na sadržaj gasa u uzlaznoj cevi *airlift* reaktora sa spoljašnjom recirkulacijom prikazan je na slikama 5.7 i 5.8. Može se uočiti da je ugradnjom impelera ostvareno poboljšanje ε_{GR} u svim ispitivanim sistemima.



Slika 5.7 Uticaj ugradnje samo-rotirajućih impelera na sadržaj gasa.
a) voda, b) 0,011 mas.% *n*-butanol i c) CMC-3.



Slika 5.8 Uticaj ugradnje samo-rotirajućih impelera na sadržaj gasa (distributor: jednostruki uvodnik). a) 46 mas.% šećer, b) CMC-1, c) CMC-2 i d) CMC-4.

Efikasnost samo-rotirajućih impelera praćena je preko poboljšanja sadržaja gasa (HI). Poboljšanje sadržaja gasa definisano je kao relativno povećanje ε_{GR} ostvareno ugradnjom impelera:

$$HI = \frac{(\varepsilon_{GR})_{ALSRI} - (\varepsilon_{GR})_{ALSR}}{(\varepsilon_{GR})_{ALSR}} \cdot 100\% \quad (5.1)$$

Uticaj karakteristika tečne faze i prividne brzine gasa na poboljšanje sadržaja gasa (HI) korišćenjem samo-rotirajućih impelera prikazan je na slikama 5.9 i 5.10. Kao što je i prethodno rečeno, prisustvo impelera dovelo je do poboljšanja ε_{GR} za sve ispitivane tečne faze i vrste distributora gasa. Uočeno poboljšanje usled ugradnje impelera posledica je razbijanja mehurova od strane impelera kao i produženja vremena boravka mehurova u uzlaznoj cevi. Uzrok produženog boravka mehurova u uzlaznoj cevi je najverovatnije dvojak: s jedne strane usled prisutnog otpora brzina tečnosti se smanjuje pa je vreme zadržavanja duže, a s druge strane impelera usmeravaju tečnost čineći njen tok izvijuganijim (Hamood-ur-Rehman i sar., 2013).

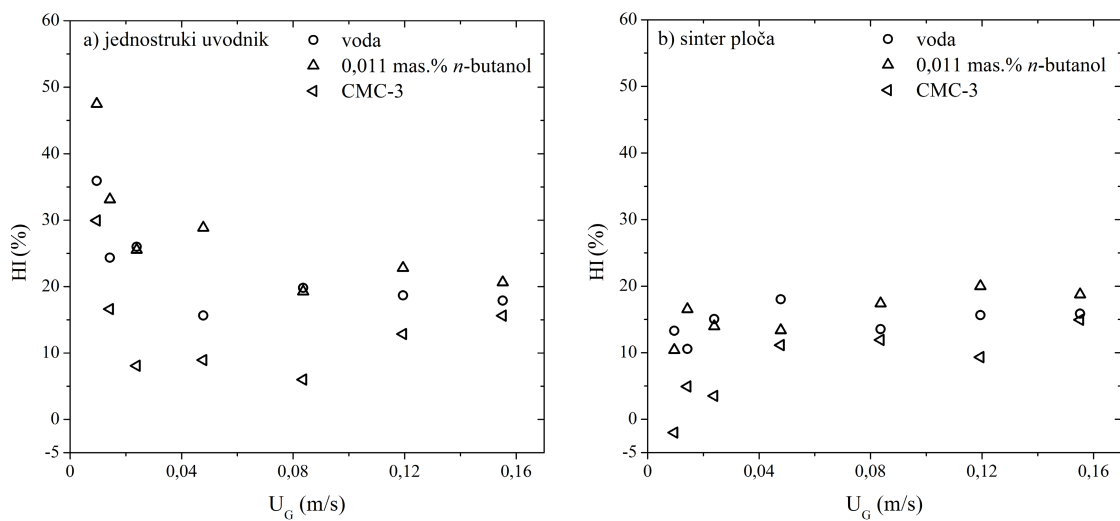
Sa priloženih slika može se zaključiti da vrednosti HI u velikoj meri zavise kako od upotrebljene tečne faze tako i od vrste distributora. Slika 5.9a prikazuje da su najveće razlike između sadržaja gasa sa i bez impelera postignute pri najmanjoj prividnoj brzini gasa kada je upotrebljen jednostruki uvodnik. Razbijanje mehurova gasa, što je i osnovna namena impelera, veoma je učestalo u sistemima sa jednostrukim uvodnikom. Sa jednostrukim uvodnikom formiraju se mehurovi većih dimenzija koji su izloženi dejstvu impelera. S obzirom da se u rastvoru n -butanola, kao inhibitora koalescencije, stabilizuju sitni mehurovi dobijeni dezintegracijom velikih mehurova gasa nakon dejstva impelera, najveći HI u iznosu od 47% postignut je pri najnižoj U_G upravo u n -butanolu. Iako se u viskoznim rastvorima CMC-3 i CMC-4 javljaju veliki mehurovi oblika sferične kape, zbog čega se očekuje značajnije poboljšanje sadržaja gasa, dejstvom impelera izmerene vrednosti HI ipak su nešto manje u odnosu na neviskozne tečnosti. Dejstvo samo-rotirajućih impelera na ε_{GR} slabije je u viskoznim rastvorima delom zbog manje brzine okretanja impelera čime je usporena dezintegracija mehurova. Pored toga, manje vrednosti HI su postignute i usled pojave koalescencije novonastalih mehurova nedugo po udaljavanju od impelera. Uprkos ovim nedostacima, ugradnjom samo-rotirajućih impelera u rastvoru CMC-3 i CMC-4 ostvareno je poboljšanje sadržaja gasa od 30 odnosno 28% pri najnižoj U_G . S druge strane, u manje viskoznim nenjutnovskim rastvorima (CMC-1 i CMC-2) i rastvoru šećera izmerene vrednosti HI su u opsegu 7-15%.

Sa povećanjem protoka gasa, do granične vrednosti od 0,0478 m/s, HI naglo opada u sistemima sa jednostrukim uvodnikom, u kojima su kao tečna faza korišćeni voda, n -butanol, CMC-3 i CMC-4. Sa daljim povećanjem protoka gasa, odnosno u uslovima u kojima inercione sile preovlađuju nad površinskim, vrednosti HI prestaju da opadaju te su za određenu tečnu fazu približno konstantne i ne zavise od U_G . Razlog tome verovatno je povećana turbulencija u sistemima sa ugrađenim impelerima, koja je još intenzivnija pri većim protocima gasa. Time se dezintegracija mehurova postiže ne samo direktnim dejstvom lopatica impelera, već i posrednim pošto povećana turbulencija takođe dovodi do dezintegracije mehurova gasa. Za razliku od pomenutih tečnih faza, u rastvorima šećera, CMC-1 i CMC-2 nije moguće doneti zaključak o uticaju U_G pošto sa porastom U_G izmerene vrednosti HI osciluju oko 12%, 9% odnosno 17%.

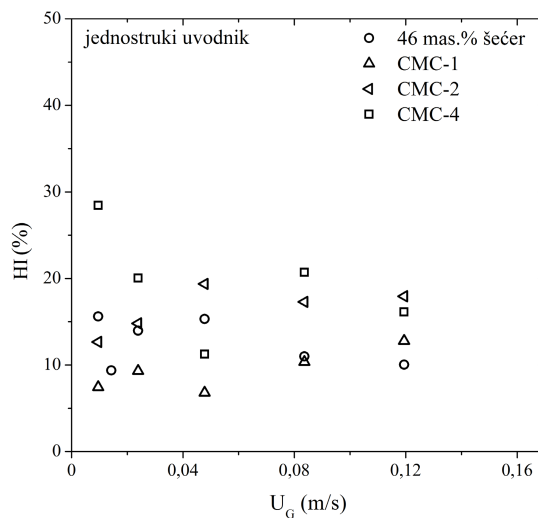
Suprotno jednostrukom uvodniku, u sistemima sa sinter pločom, uticaj ugradnje impelera na razbijanje mehurova znatno je slabiji pri nižim brzinama gasa (slika 5.9b). Veoma sitni mehurovi gasa formiraju se na sinter ploči usled čega je njihovo razbijanje pomoću impelera izlišno. Iz tog razloga, efikasnost impelera je znatno slabija. Takođe,

može se uočiti da u sistemima sa sinter pločom i rastvorom CMC-3 ne dolazi do poboljšanja ε_{GR} pri manjim U_G . Ovakvo ponašanje je očekivano s obzirom da su u rastvoru CMC-3 formirani sitni i veoma stabilni mehurovi koji su prolazili impelere nepromenjeni.

Kao što je to slučaj u konfiguraciji bez impelera, u kojoj je uticaj vrste distributora zanemarljiv pri većim protocima gasa, odnosno u opsegu 0,0478-0,1552 m/s, usled dominacije inercionih nad površinskim silama, sličan zaključak može se izvesti i za konfiguraciju sa impelerima. U proseku ostvareno je poboljšanje ε_{GR} od 19 i 22% u vodi odnosno *n*-butanolu, i od 13% u rastvoru CMC-3, za oba distributora.



Slika 5.9 Uticaj samo-rotirajućih impelera na HI u vodi, 0,011 mas.% *n*-butanolu i rastvoru CMC-3. a) jednostruki uvodnik i b) sinter ploča.



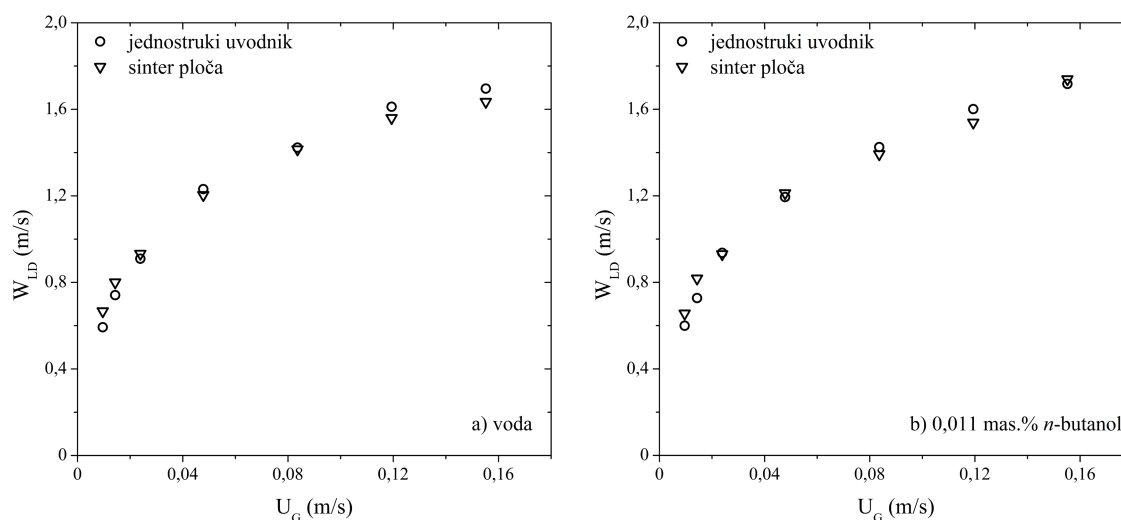
Slika 5.10 Uticaj samo-rotirajućih impelera na HI u 46 mas.% rastvoru šećera, CMC-1, CMC-2 i CMC-4 (distributor: jednostruki uvodnik)

5.4 Brzina tečnosti u silaznoj cevi ALSR sa i bez impelera

5.4.1 Brzina tečnosti u silaznoj cevi ALSR

Na slikama 5.11, 5.12 i 5.13, na kojima je prikazana zavisnost brzine tečnosti od vrste tečne faze i tipa distributora gasa u konfiguraciji bez impelera, može se videti stalni porast brzine tečnosti sa porastom prividne brzine gasa, bez obzira na korišćenu vrstu tečne faze i tip distributora. Trend rasta zavisi od zapaženih hidrodinamičkih režima. Uočljiv je brži porast brzine tečnosti pri manjim protocima gasa, tj. u mehurastom odnosno prelaznom režimu strujanja. Pri većim protocima gasa, koji odgovaraju vrtložno-turbulentom režimu strujanja, u svim ispitivanim sistemima zapažen je manji nagib krive zavisnosti W_{LD} od U_G , odnosno brzina tečnosti je sporije rasla sa porastom prividne brzine gasa.

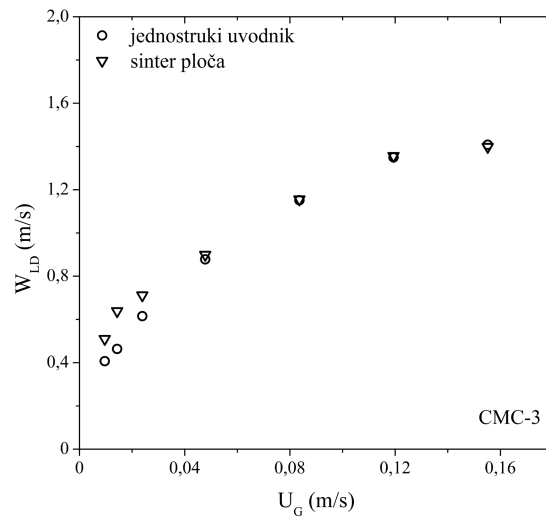
Kao što se može videti sa slika 5.11 i 5.12, vrsta distributora gasa utiče na W_{LD} samo pri malim protocima gasa. Za opseg prividnih brzina gasa od 0,0096 do 0,02 m/s, u sistemima sa sinter pločom kada su kao tečna faza korišćeni voda i rastvor *n*-butanola izmerene vrednosti W_{LD} su u proseku oko 10% veće u odnosu na jednostruki uvodnik.



Slika 5.11 Uticaj tipa distributora gasa na brzinu tečnosti u silaznoj cevi ALSR u neviskoznom tečnostima. a) voda i b) 0,011 mas.% *n*-butanol.

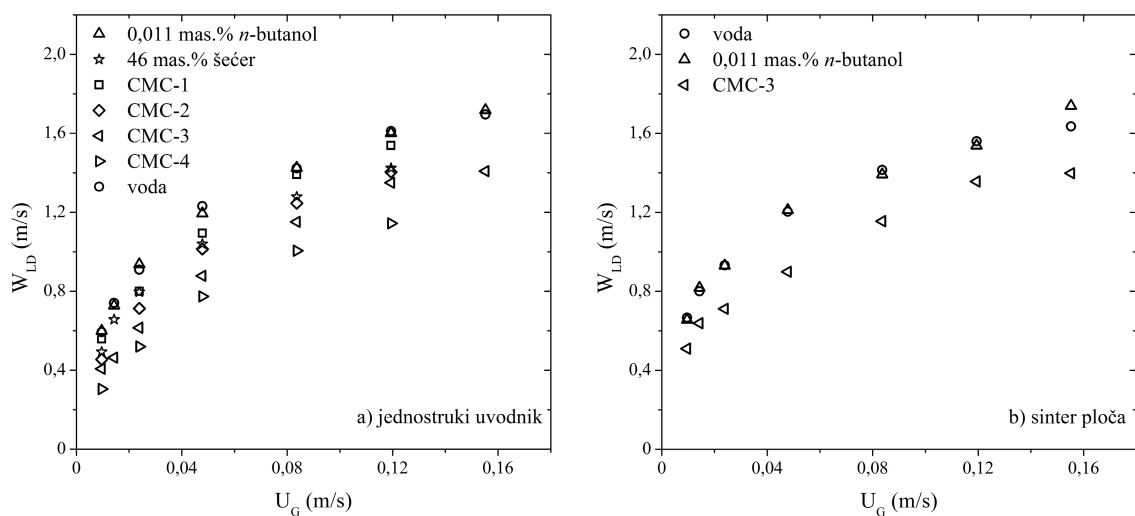
S druge strane, poređenje brzine tečnosti u viskoznom rastvoru CMC-3 pri prividnim brzinama gasa ispod 0,04 m/s pokazalo je da su vrednosti W_{LD} za sinter ploču bile oko 25% veće nego za jednostruki uvodnik. Moglo se očekivati da će sa sinter pločom vrednosti W_{LD} biti znatno veće u rastvoru CMC-3 u poređenju sa neviskoznom tečnostima jer je pogonska sila za recirkulaciju tečnosti bila znatno veća u CMC-3. Naime, kao što je rečeno u potpoglavlju 5.3.1, korišćenjem sinter ploče u rastvoru

CMC-3 postignut je porast sadržaja gasa u iznosu do 67%, dok je u vodi i rastvoru *n*-butanola ostvaren manji porast sadržaja gasa (oko 27%) u odnosu na jednostruki uvodnik.



Slika 5.12 Uticaj tipa distributora gasa na brzinu tečnosti u silaznoj cevi ALSR u rastvoru CMC-3

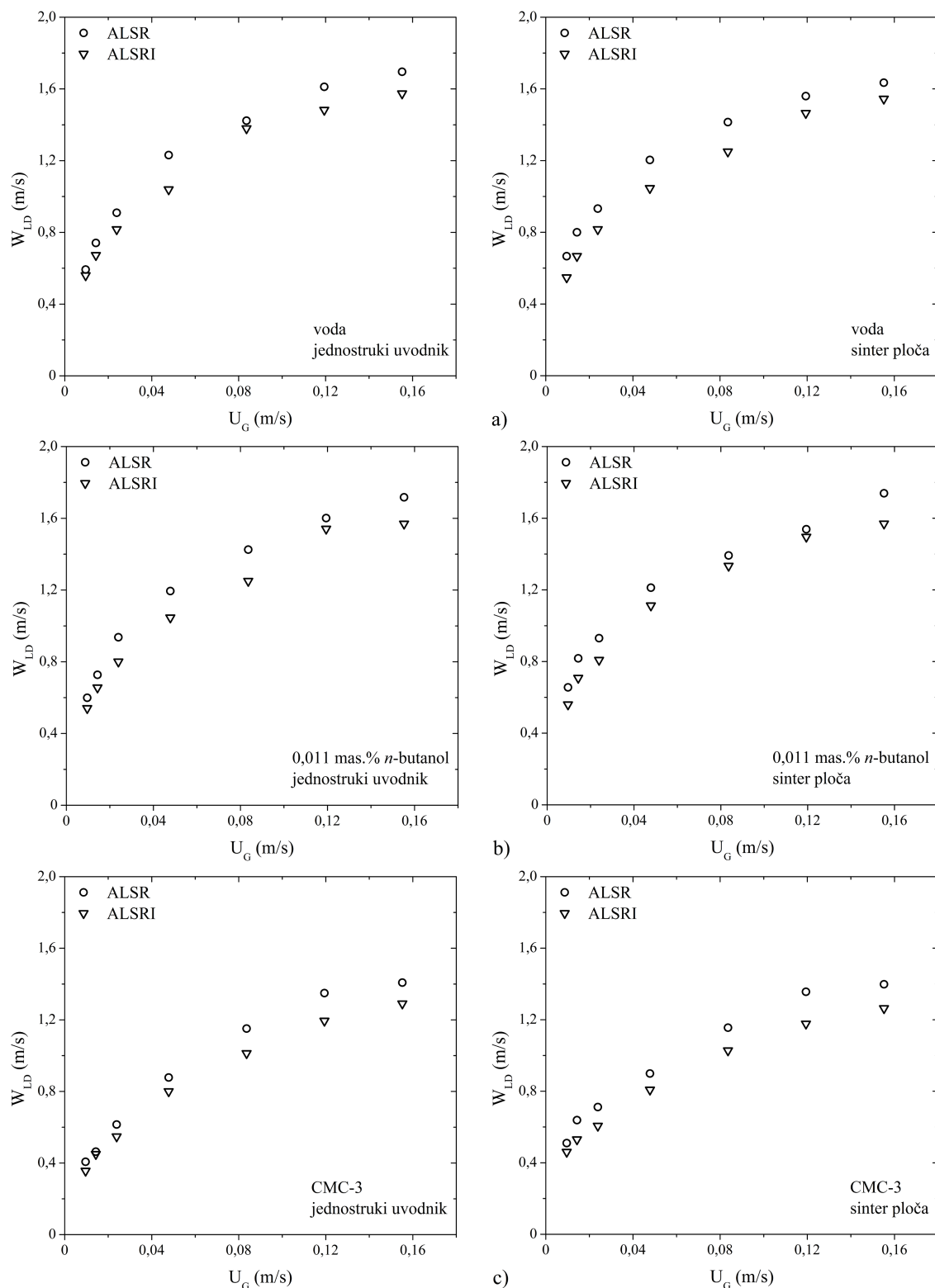
Uticaj vrste tečne faze na brzinu tečnosti u silaznoj cevi ALSR prikazan je na slici 5.13. Može se uočiti da dodatak *n*-butanola ne utiče na W_{LD} bez obzira na korišćeni tip distributora gasa. Ovakvo ponašanje takođe su uočili Miyahara i Nagatani (2009). S druge strane, zapažen je značajan uticaj viskoznosti tečne faze na W_{LD} pošto su u viskoznim rastvorima šećera i CMC postignute od 5 do 48% niže vrednosti W_{LD} u odnosu na vodu. Razlog tome su znatno veće unutrašnje sile trenja (tj. sile viskoznosti) u viskoznim fluidima, u odnosu na vodu. Shodno tome, smanjenje brzine tečnosti je izraženije što je viskoznost rastvora CMC veća, odnosno što su sile viskoznosti veće.



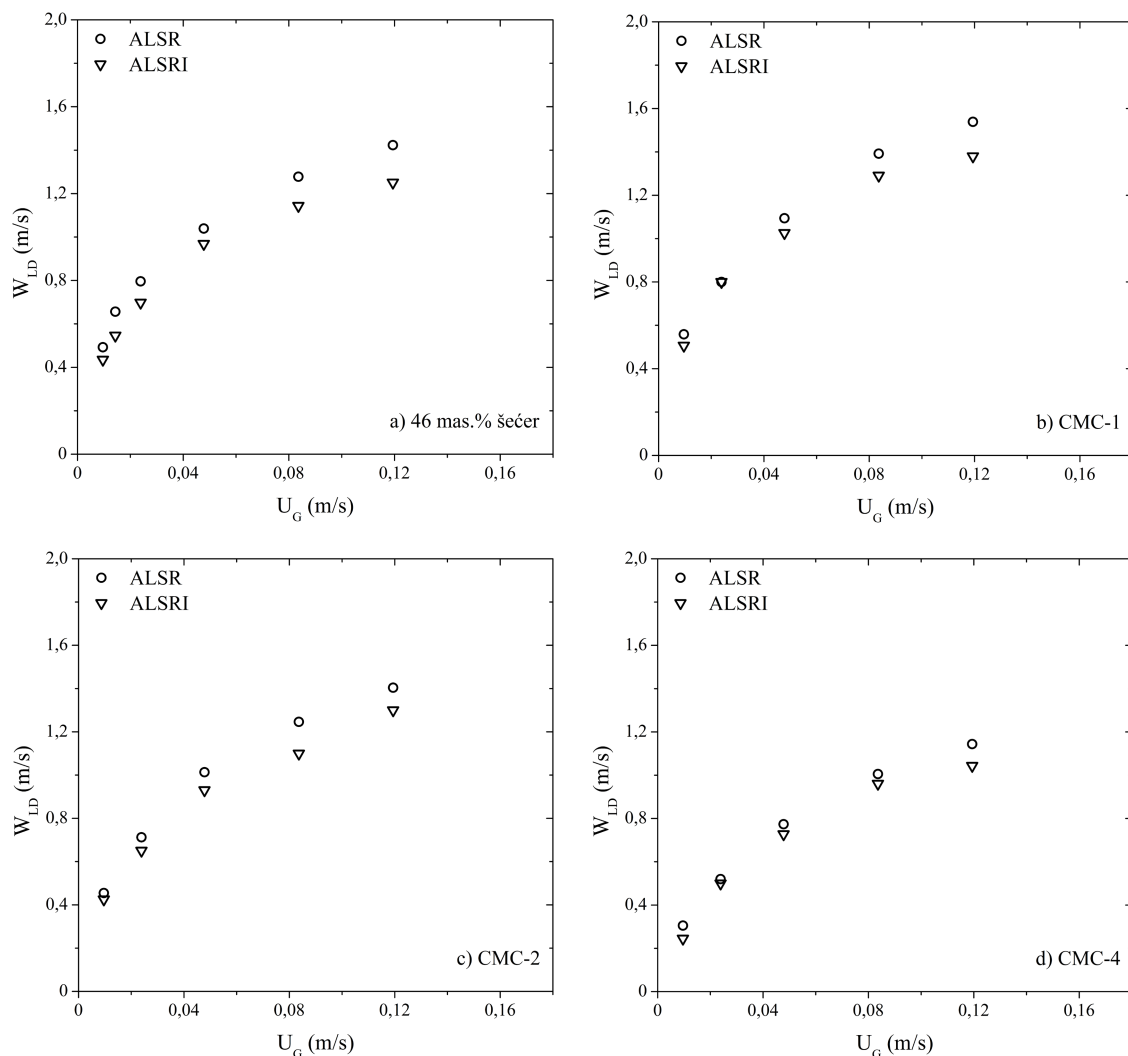
Slika 5.13 Uticaj karakteristika tečne faze na brzinu tečnosti u silaznoj cevi u ALSR. a) jednostruki uvodnik i b) sinter ploča.

5.4.2 Uticaj ugradnje samo-rotirajućih impelera na brzinu tečnosti u silaznoj cevi

Pri ugradnji samo-rotirajućih impelera, s obzirom da predstavljaju otpor proticanju tečnosti, očekivani rezultat jeste smanjenje brzine tečnosti. Na slikama 5.14 i 5.15 prikazano je u kom obimu njihovo prisustvo utiče na brzinu tečnosti.



Slika 5.14 Uticaj ugradnje samo-rotirajućih impelera na W_{LD} u silaznoj cevi u ALSR. a) voda, b) 0,011 mas.% n-butanol i c) CMC-3.



Slika 5.15 Uticaj ugradnje samo-rotirajućih impelera na brzinu tečnosti u silaznoj cevi (distributor: jednostruki uvodnik). a) 46 mas.% šećer, b) CMC-1, c) CMC-2 i d) CMC-4.

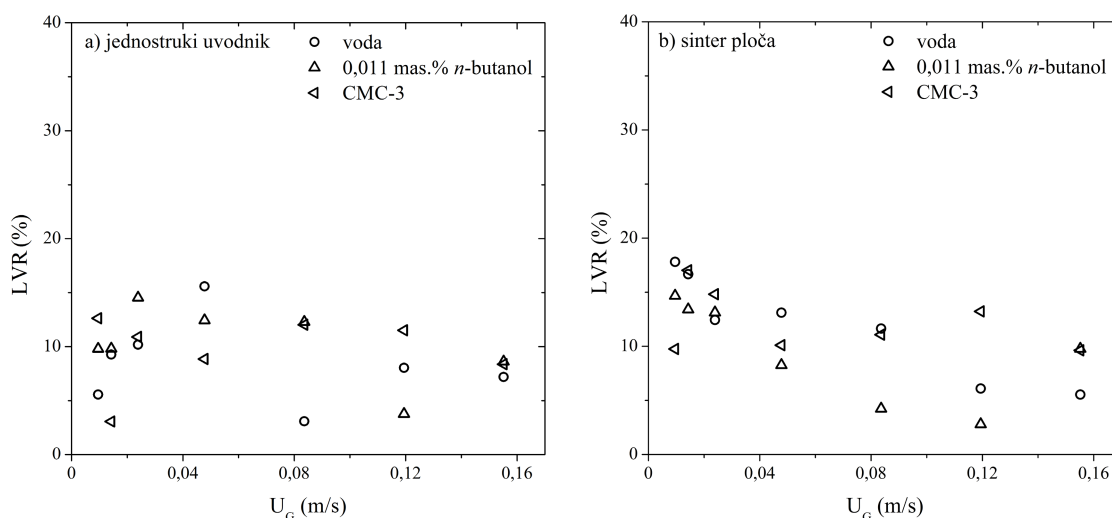
Imajući u vidu da niže vrednosti W_{LD} nepovoljno utiču na $k_L a$ preko manjeg k_L , izuzetno je bitno da se ugradnjom impelera postigne što je moguće manje sniženje W_{LD} kako bi došao do izražaja njihov efekat na poboljšanje a , koji je očigledan zahvaljujući većem sadržaju gasa i mehurovima manjih dimenzija sa većim vremenom zadržavanja (videti potpoglavlja 5.2.2 i 5.3.2). Na osnovu prikazanih slika može se zaključiti da ugradnjom impelera dolazi do umerenog sniženja brzine tečnosti u svim ispitivanim sistemima.

Kao i u slučaju sadržaja gasa, na osnovu izmerenih vrednosti W_{LD} u obe konfiguracije reaktora (ALSR i ALSRI) računato je relativno smanjenje brzine tečnosti usled ugradnje impelera (LVR), na osnovu sledećeg izraza:

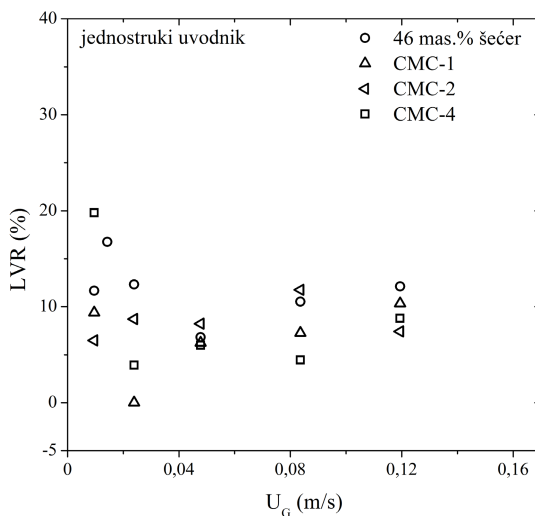
$$LVR = \frac{(W_{LD})_{ALSR} - (W_{LD})_{ALSRI}}{(W_{LD})_{ALSR}} \cdot 100\% \quad (5.2)$$

Na slikama 5.16 i 5.17 prikazan je uticaj karakteristika tečne faze i prividne brzine gasa na LVR korišćenjem samo-rotirajućih impelera. Za opseg prividnih brzina gasa primenjenih u ovom radu postignute vrednosti LVR su u opsegu od 1 do 20%. U ovom slučaju jasni zaključci o uticaju prividne brzine gasa i osobina tečne faze se ne mogu izvesti jer su podaci za LVR rasuti, verovatno usled veće greške određivanja W_{LD} .

Ipak, može se uočiti da je primenom samo-rotirajućih impelera brzina tečnosti u silaznoj cevi u proseku manja oko 10% bez obzira na vrstu tečne faze i tip distributora gasa. Na osnovu malog pada brzine može se očekivati da će impeleri omogućiti bolji prenos mase u *airlift* reaktoru sa spoljašnjom recirkulacijom zahvaljujući porastu zapreminskog koeficijenta prenosa mase usled veće specifične međufazne površine.



Slika 5.16 Uticaj samo-rotirajućih impelera na LVR u vodi, 0,011 mas.% n -butanolu i rastvoru CMC-3. a) jednostruki uvodnik b) sinter ploča.



Slika 5.17 Uticaj samo-rotirajućih impelera na LVR u 46 mas.% rastvoru šećera, CMC-1, CMC-2 i CMC-4 (distributor: jednostruki uvodnik)

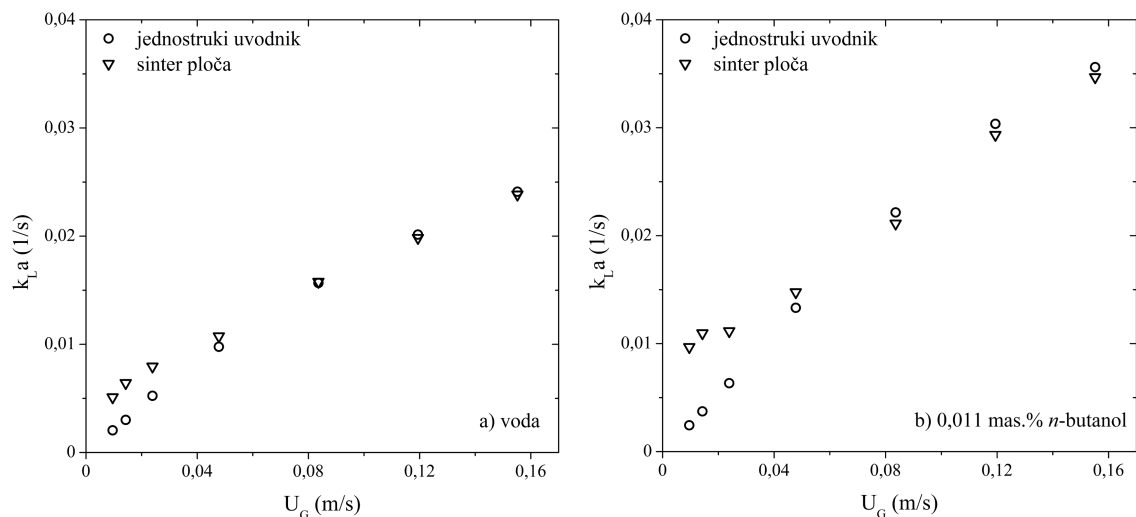
5.5 Masenoprenosne karakteristike ALSR sa i bez impelera

5.5.1 Zapreminski koeficijent prenosa mase u ALSR

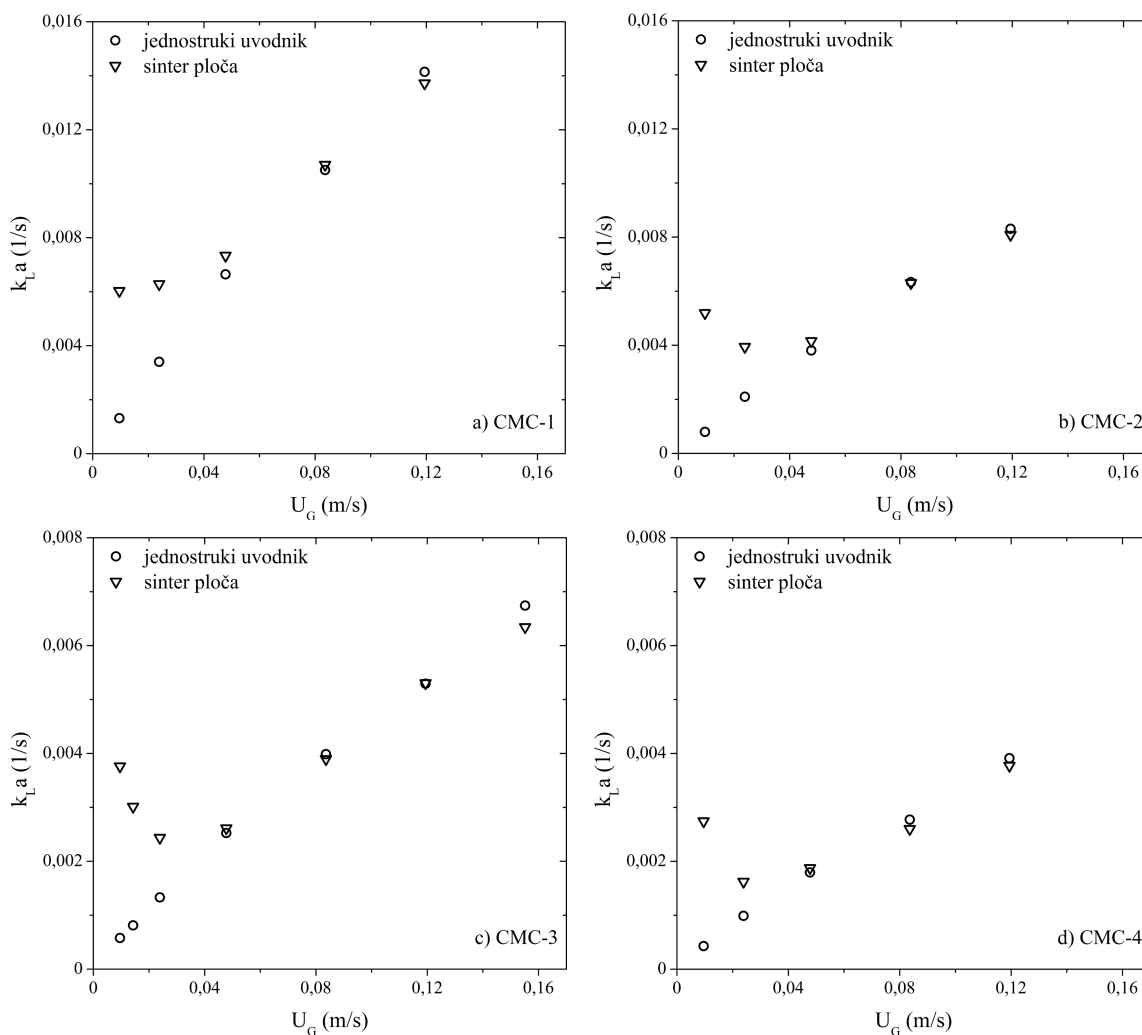
Na slikama 5.18, 5.19 i 5.20 prikazan je uticaj prividne brzine gasa na zapreminski koeficijent prenosa mase u ALSR u zavisnosti od vrste tečne faze i tipa distributora gasa. Može se uočiti da u sistemima sa jednostrukim uvodnikom k_{La} raste sa porastom U_G u svim ispitivanim tečnostima. Isti trend se uočava i u sistemima sa sinter pločom kada su kao tečna faza korišćene neviskozne tečnosti, rastvor šećera i manje viskozni rastvori CMC. U sistemima sa sinter pločom i viskoznijim rastvorima CMC-3 i CMC-4, sa porastom U_G prvobitno dolazi do smanjenja vrednosti k_{La} sve dok se ne ostvari minimum, nakon čega k_{La} počinje da raste sa daljim porastom U_G .

Snažan uticaj tipa distributora gasa (slike 5.18 i 5.19) zapažen je samo pri malim prividnim brzinama gasa, što su saopštili i drugi autori (Miyahara i sar., 1999; Chaumat i sar., 2005). Mehurovi gasa koji se formiraju korišćenjem sinter ploče su stabilniji i manjih dimenzija u odnosu na mehurove koji nastaju primenom jednostrukog uvodnika, te se zbog toga postižu veće vrednosti k_{La} u sistemima sa sinter pločom. Ovo je naročito izraženo pri najmanjoj U_G u veoma viskoznim rastvorima CMC-3 i CMC-4 u kojima se sa sinter pločom postižu čak do 550% veće vrednosti k_{La} u odnosu na jednostruki uvodnik. Ovakvo ponašanje pre svega je posledica pojave mehurastog režima toka praćenog dužim vremenom zadržavanja gasa u uzlaznoj cevi reaktora usled niže brzine isplivavanja mehurova zbog većeg otpora u viskoznim rastvorima CMC-3 i CMC-4. Kao što je rečeno u potpoglavlju 5.2 u kom su diskutovani hidrodinamički režimi, mehurast tok u kom nema koalescencije zapažen je samo pri najmanjem protoku gasa. Sa porastom U_G dolazi do intenzivne koalescencije mehurova gasa usled čega k_{La} opada. Upravo zbog toga se u rastvorima CMC-2, CMC-3 i CMC-4 postiže minimum na grafiku zavisnosti k_{La} od U_G . Pri većim U_G , odnosno u vrtložno-turbulentnom režimu u kom inercione sile dominiraju, gotovo da nije bilo razlike između k_{La} sa sinter pločom i jednostrukim uvodnikom bez obzira na upotrebljenu tečnu fazu, što znači da je uticaj tipa distributora gasa na k_{La} zanemarljiv. Prethodno izneseni zaključci u potpunosti se slažu sa zapažanjima drugih autora da uticaj tipa distributora gasa u velikoj meri zavisi od veličine i stabilnosti mehurova koji se formiraju na samom distributoru (Martín i sar., 2009) pri čemu veličina mehurova gasa prilikom formiranja na distributoru ne zavisi samo od tipa distributora gasa već i od vrste tečne faze.

Masenoprensne karakteristike ALSR sa i bez impelera

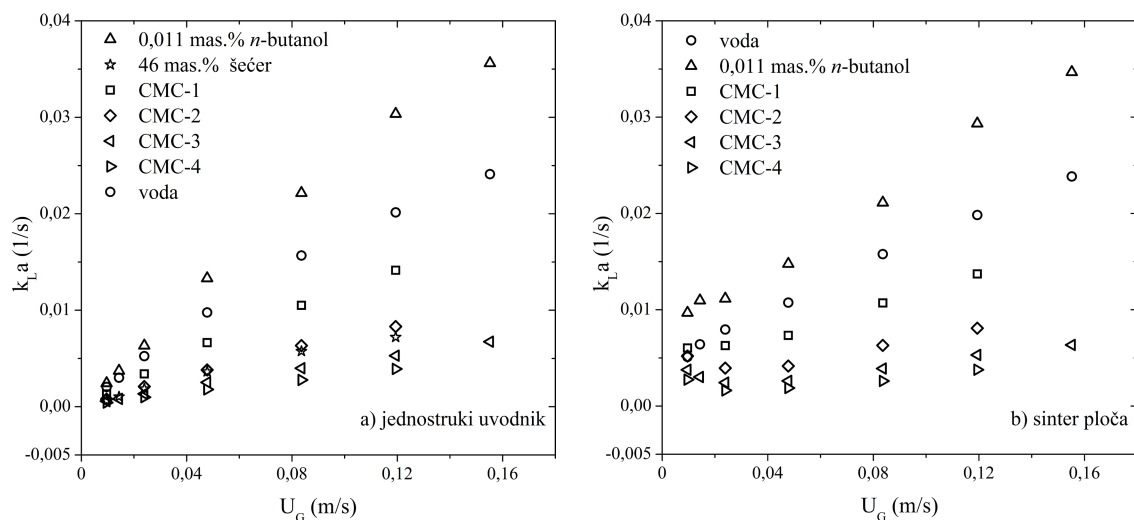


Slika 5.18 Uticaj tipa distributora gasa na zapreminski koeficijent prenosa mase u ALSR u neviskoznim tečnostima. a) voda i b) 0,011 mas.% *n*-butanol.



Slika 5.19 Uticaj tipa distributora gasa na zapreminski koeficijent prenosa mase u ALSR u nenjutnovskim tečnostima. a) CMC-1, b) CMC-2, c) CMC-3 i d) CMC-4.

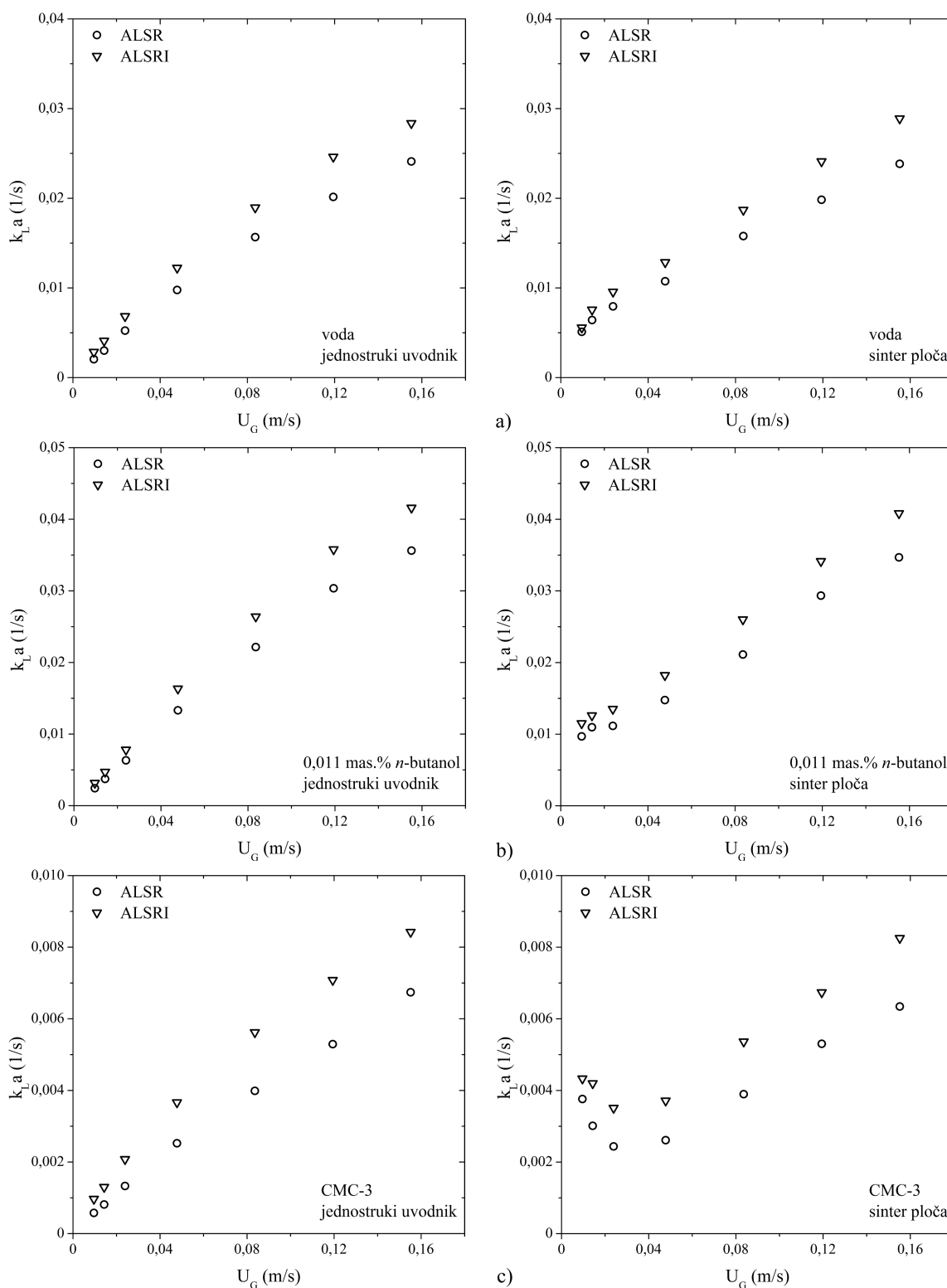
S obzirom da masenoprenosne karakteristike u velikoj meri zavise od osobina tečne faze, na slici 5.20 prikazan je uticaj vrste tečne faze na $k_L a$. Može se videti da *n*-butanol, kao inhibitor koalescencije, poboljšava prenos mase tako što u odnosu na vodu uvećava $k_L a$ oko 35% sa jednostrukim uvodnikom i oko 52% sa sinter pločom. Do porasta $k_L a$ dolazi pre svega zbog povećanja specifične međufazne površine (a) usled smanjenja srednjeg prečnika mehurova gasa i povećanja ε_{GR} . Suprotno rastvoru alkohola, u viskoznim rastvorima CMC vrednosti $k_L a$ u odnosu na $k_L a$ u vodi značajno su manje u većini ispitivanih sistema. Viskoznost rastvora CMC određuje intenzitet umanjjenja: što je veća prividna viskoznost rastvora CMC, veće je i umanjjenje vrednosti $k_L a$. Na primer, u najviskoznijem rastvoru (CMC-4) postignute su oko pet puta manje vrednosti zapreminskog koeficijenta prenosa mase u odnosu na vodu. Smanjenje $k_L a$ je s jedne strane posledica značajnog umanjjenja međufazne površine a do kog dolazi sa porastom prividnog viskoziteta (Wu i sar., 2013). S druge strane, do smanjenja $k_L a$ dolazi i usled opadanja k_L sa porastom viskoznosti. Međutim, pri najmanjoj brzini gasa korišćenjem sinter ploče u rastvoru CMC-1 postignute su 18% veće vrednosti $k_L a$ u poređenju sa vodom. Razlog tome su veći otpori kretanju u viskoznim rastvorima, koji dovode do većeg vremena zadržavanja mehurova gasa, a samim tim i većih vrednosti ε_{GR} i a . Kao što se može videti, iako su sa sinter pločom u viskoznijim rastvorima CMC pri malim protocima gasa prisutni mehurovi veoma malih dimenzija, čime su ε_{GR} i a znatno veći u odnosu na vodu, uticaj viskoznosti na smanjenje k_L prevlađuje, pa su i rezultujuće vrednosti $k_L a$ ipak niže u poređenju sa vodom.



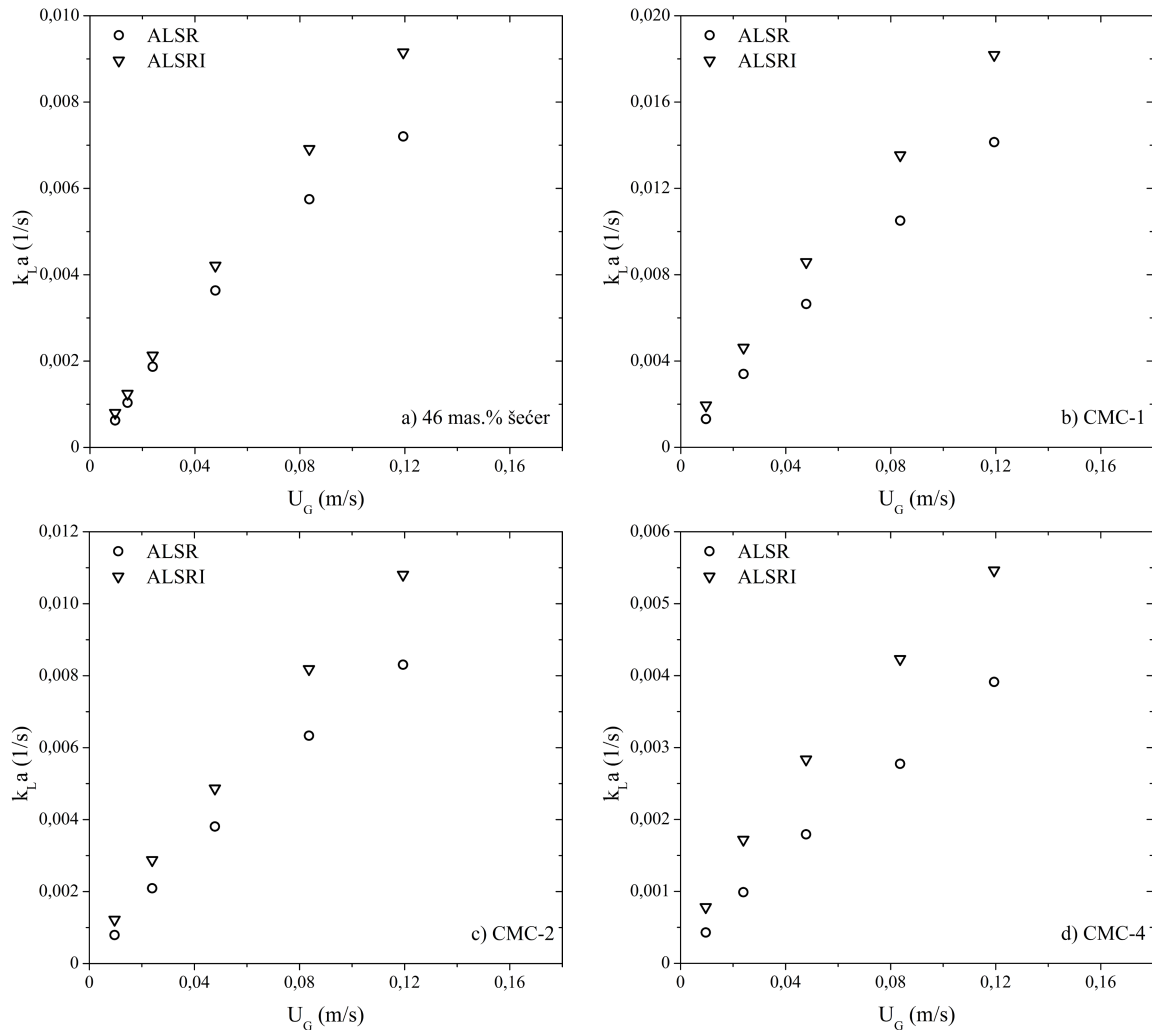
Slika 5.20 Uticaj karakteristika tečne faze na zapreminski koeficijent prenosa mase u ALSR. a) jednostruki uvodnik i b) sinter ploča.

5.5.2 Uticaj ugradnje samo-rotirajućih impelera na zapreminski koeficijent prenosa mase

Uticaj ugradnje samo-rotirajućih impelera na zapreminski koeficijent prenosa mase prikazan je na slikama 5.21 i 5.22. Može se uočiti da korišćenjem impelera dolazi do povećanja k_{La} u svim ispitivanim sistemima.



Slika 5.21 Uticaj ugradnje samo-rotirajućih impelera na zapreminski koeficijent prenosa mase. a) voda, b) 0,011 mas.% *n*-butanol i c) CMC-3.



Slika 5.22 Uticaj ugradnje samo-rotirajućih impelera na zapreminski koeficijent prenosa mase (distributor: jednostruki uvodnik). a) 46 mas.% šećer, b) CMC-1, c) CMC-2 i d) CMC-4.

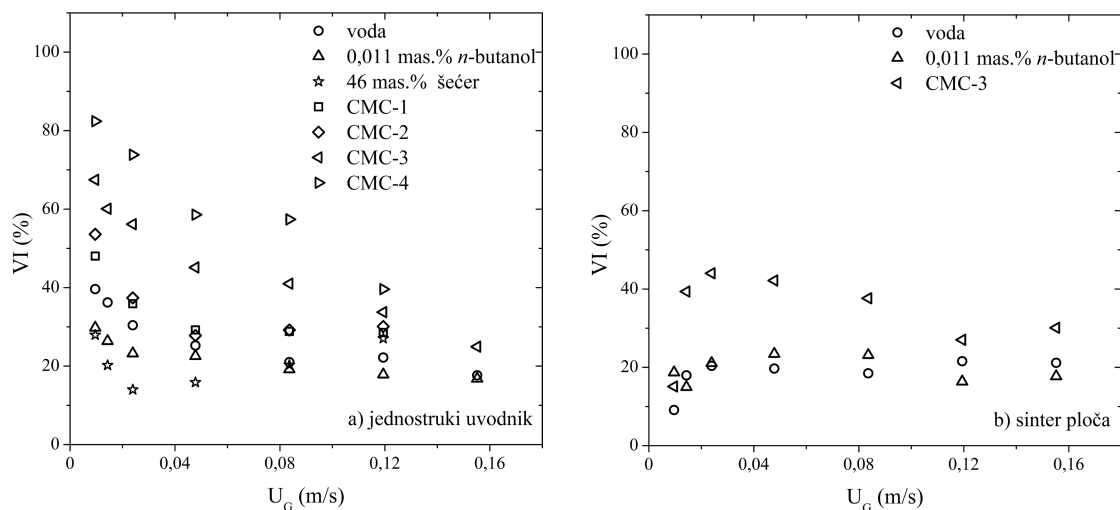
Poboljšanje masenoprenosnih karakteristika praćeno je relativnim povećanjem zapreminskog koeficijenta prenosa mase (VI) na osnovu sledećeg izraza:

$$VI = \frac{(k_{La})_{ALSRI} - (k_{La})_{ALSR}}{(k_{La})_{ALSR}} \cdot 100\% \quad (5.3)$$

Na slici 5.23 prikazan je uticaj karakteristika tečne faze i prividne brzine gasa na poboljšanje zapreminskog koeficijenta prenosa mase korišćenjem samo-rotirajućih impelera. U sistemima ispitivanim u ovom radu ugradnjom impelera postignute su vrednosti VI u opsegu od 9-82%. Ovakav uticaj na k_{La} je očekivan s obzirom da je primenom samo-rotirajućih impelera ostvaren manji srednji prečnik mehurova gasa i veći sadržaj gasa, uz gotovo nezatno opadanje brzine tečnosti (oko 10%).

Na osnovu slike 5.23 može se zaključiti da pored prividne brzine gasa, vrednosti VI zavise od karakteristika tečne faze i tipa distributora gasa. Kao što je rećeno, primenom jednostrukog uvodnika pri manjim protocima gasa formiraju se mehurovi

većih dimenzija koji su izloženi dejstvu samo-rotirajućih impelera. Zbog toga su u sistemima sa jednostrukim uvodnikom pri manjim U_G ostvarene veća poboljšanja vrednosti $k_L a$ u odnosu na sinter ploču. Takođe, može se uočiti da se najveće poboljšanje $k_L a$, koje u zavisnosti od korišćene tečne faze iznosi od 28-82%, postiže pri najmanjim prividnim brzinama gasa. Sa porastom U_G , vrednosti VI opadaju u svim ispitivanim sistemima sa jednostrukim uvodnikom. Pri daljem porastu U_G , odnosno u uslovima u kojima inercione sile prevlađuju nad površinskim (vrtložno-turbulentan režim strujanja), vrednosti VI u nevizkoznim i manje viskoznom tečnostima su nezavisne od U_G i iznose u proseku oko 20 odnosno 30%. Ovakav trend nije zapažen u slučaju viskoznijih rastvora CMC-3 i CMC-4, u kojima vrednosti VI opadaju sa porastom prividne brzine gasa, čak i u vrtložno-turbulentnom režimu. U sistemima sa jednostrukim uvodnikom uočava se značajan uticaj viskoznosti nenjutnovskih tečnosti na VI . Što je viskoznost rastvora CMC veća, veće je i poboljšanje $k_L a$. Naime, sa porastom viskoznosti rastvora CMC srednji prečnik mehurova gasa takođe raste pa je razbijanje mehurova primenom samo-rotirajućih impelera još izraženije u viskoznijim rastvorima. Za razliku od nenjutnovskih tečnosti, u rastvoru šećera uočavaju se veoma male vrednosti VI . Razlog za slabije poboljšanje $k_L a$ sa ugradnjom impelera leži u činjenici da su u rastvoru šećera prisutni sitniji mehurovi gasa te je učestalost njihovog razbijanja manja.



Slika 5.23 Uticaj samo-rotirajućih impelera na relativno povećanje zapreminskog koeficijenta prenosa mase. a) jednostruki uvodnik i b) sinter ploča.

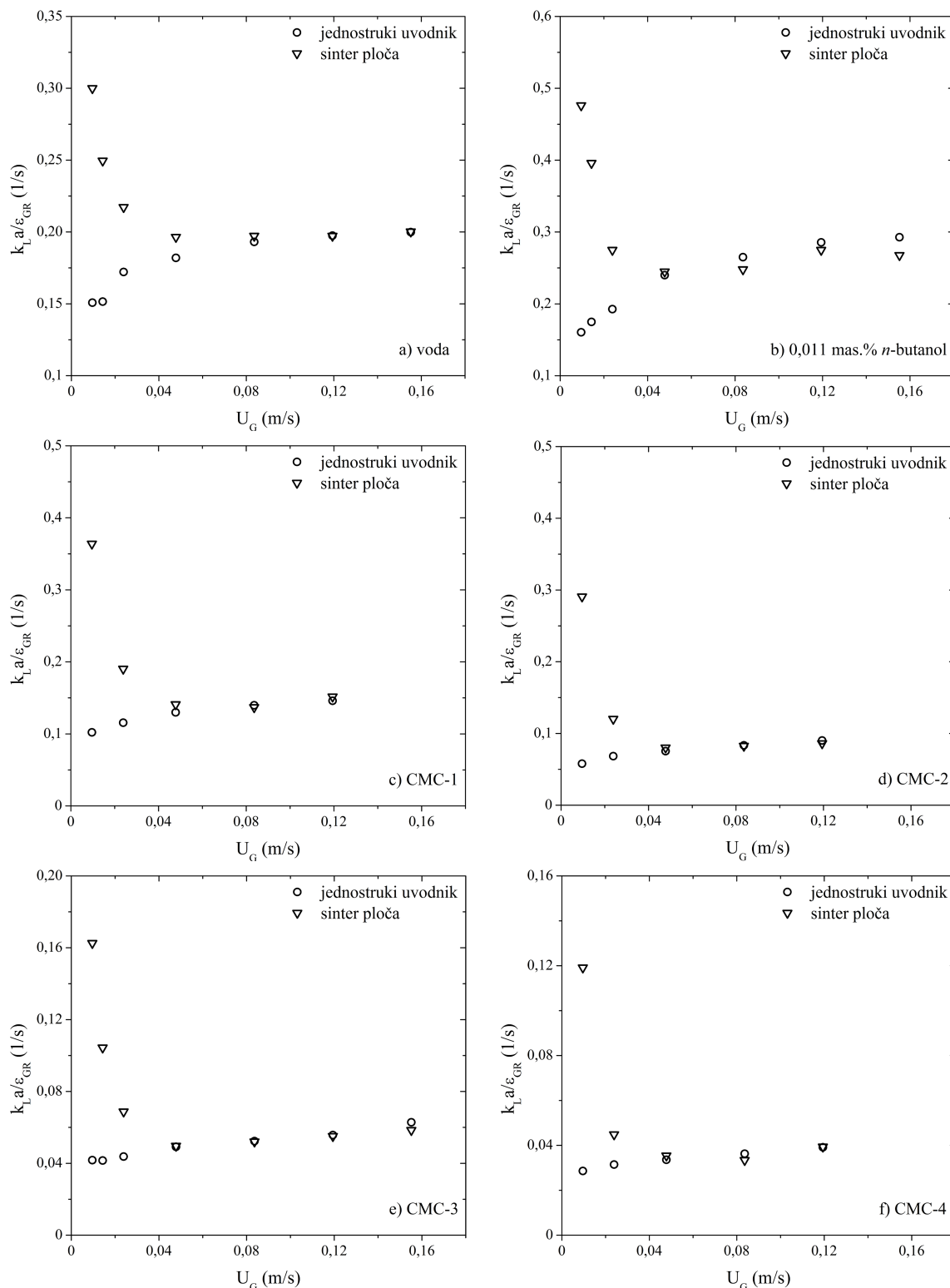
S druge strane, pošto se u sistemima sa sinter pločom pri manjim protocima formiraju veoma sitni i stabilni mehurovi gasa, uticaj impelera na razbijanje mehurova je znatno manji. Stoga je korišćenjem sinter ploče postignuto slabije povećanje zapreminskog koeficijenta prenosa mase u odnosu na jednostruki uvodnik. Takođe, pri manjim protocima gasa u rastvoru CMC-3 uočen je suprotan trend u odnosu na trend u

slučaju jednostrukog uvodnika: VI raste sa porastom prividne brzine gasa. S obzirom da je u rastvoru CMC-3 pri najmanjoj U_G formiran mehuras režim strujanja koji karakterišu sitni i stabilni mehurovi, prisustvo impelera ne dovodi do razbijanja mehurova, te su vrednosti VI veoma male. Međutim, sa povećanjem U_G , usled intenzivne koalescencije mehurova gasa dejstvo impelera na njihovo razbijanje dolazi do izražaja. To je razlog što je postizano povećanje VI sa rastom prividne brzine gasa. Kao što je to bio slučaj u konfiguraciji bez samo-rotirajućih impelera (potpoglavlje 5.5.1), i u konfiguraciji sa impelerima je pri većim brzinama gasa, odnosno u uslovima u kojima inercione sile preovlađuju nad površinskim, takođe zapaženo da tip distributora gasa nema uticaja na k_{La} bez obzira na vrstu tečne faze. Zbog toga je veličina VI takođe nezavisna od primenjenog tipa distributora gasa.

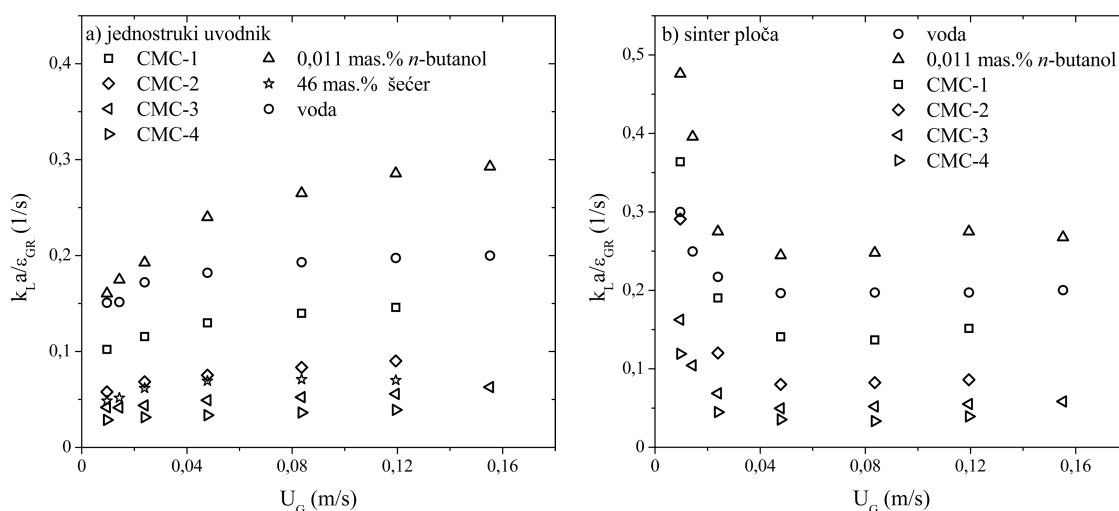
5.5.3 Odnos k_{La}/ε_{GR} u ALSR

S obzirom da su brzina prenosa mase i hidrodinamika usko povezane, što potvrđuje i isti trend kriva k_{La} i ε_{GR} u funkciji U_G , odnos k_{La}/ε_{GR} može poslužiti da dodatno objasni fenomene prenosa mase, naročito imajući u vidu da odnos k_{La}/ε_{GR} predstavlja zapreminski koeficijent prenosa mase po jedinici zapremine mehurova gasa (Vandu i Krishna, 2004; Deng i sar., 2010). Slike 5.24 i 5.25 prikazuju uticaj prividne brzine gasa, vrste tečne faze i tipa distributora gasa na odnos k_{La}/ε_{GR} u konfiguraciji bez impelera (ALSR). Sa slike 5.24 uočava se da pri brzinama gasa manjim od oko 0,06 m/s u sistemima sa jednostrukim uvodnikom odnos k_{La}/ε_{GR} blago raste dok u sistemima sa sinter pločom opada sa porastom U_G . U ovom slučaju objašnjenje se može naći u činjenici da je odnos k_{La}/ε_{GR} direktno proporcionalan k_L/d_B , odnosno količniku koeficijenta prelaza mase sa strane tečnosti (k_L) i Sauterovog srednjeg prečnika mehurova gasa (d_B), što znači da je korišćenjem jednostrukog uvodnika postignuto veće povećanje k_L sa povećanjem U_G u odnosu na povećanje d_{32} sa U_G , te zbog toga odnos k_{La}/ε_{GR} raste sa porastom U_G . S druge strane, primenom sinter ploče dolazi do intenzivnijeg porasta d_{32} sa povećanjem U_G , zbog čega odnos k_{La}/ε_{GR} opada pri manjim protocima gasa. Pri većim prividnim brzinama gasa, odnosno u vrtložno-turbulentnom režimu strujanja, s obzirom da tip distributora gasa ne utiče ni na jednu od dve veličine (k_{La} i ε_{GR}), isti trend se zapaža i sa odnosom k_{La}/ε_{GR} . Povrh toga, u vrtložno-turbulentnom režimu odnos k_{La}/ε_{GR} se ne menja sa promenom U_G tj. teži konstantnim vrednostima koje u zavisnosti od korišćene tečne faze iznose od 0,04-0,28 1/s. Za vodu vrednosti odnosa k_{La}/ε_{GR} iznose oko 0,2 1/s što je u skladu sa rezultatima drugih autora koji su u vrtložno-turbulentnom režimu postigli konstantne

vrednosti u iznosu 0.13-0.5 1/s (Letzel i Stankiewicz, 1999; Vandu i Krishna, 2004; Deng i sar., 2010; Kojić i sar., 2016). Mala odstupanja oko konstantne vrednosti odnosa k_{La}/ε_{GR} objašnjavaju se činjenicom da su u pomenutim radovima korišćeni reaktori različitih geometrija (Deng i sar., 2010). Sa porastom viskoznosti rastvora CMC, vrednosti odnosa k_{La}/ε_{GR} opadaju. Ovakav trend takođe su zapazili i Deng i sar. (2010).



Slika 5.24 Uticaj tipa distributora gasa na odnos k_{La}/ε_{GR} u ALSR.
a) voda, b) 0,011 mas.% *n*-butanol, c) CMC-1, d) CMC-2,
e) CMC-3 i f) CMC-4.



Slika 5.25 Uticaj karakteristika tečne faze na odnos $k_L a / \epsilon_{GR}$ u ALSR.
a) jednostruki uvodnik i b) sinter ploča.

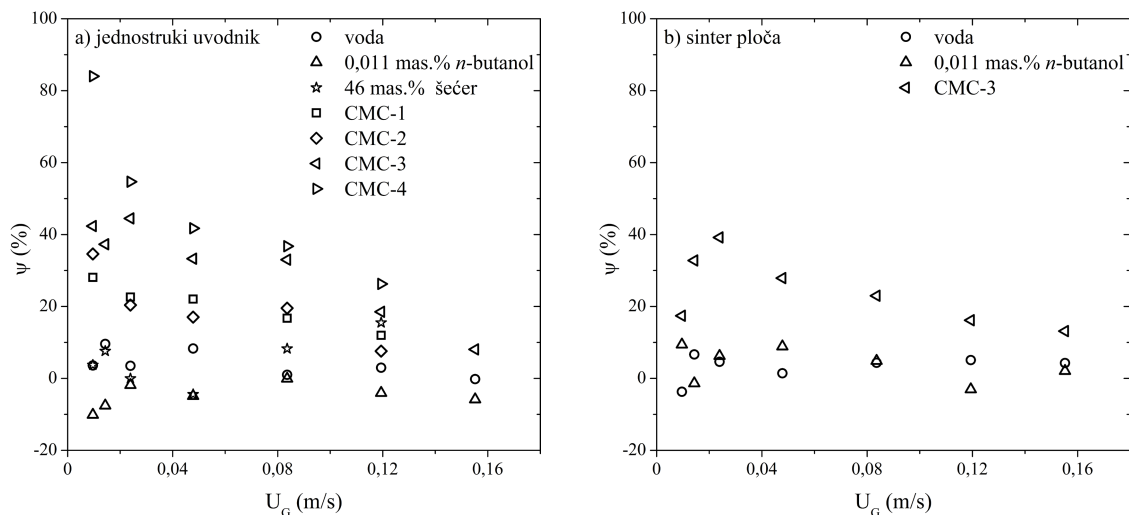
5.5.4 Uticaj ugradnje samo-rotirajućih impelera na odnos $k_L a / \epsilon_{GR}$

Na osnovu dobijenog odnosa $k_L a / \epsilon_{GR}$ u obe konfiguracije reaktora (ALSR i ALSRI) računata je relativna promena odnosa $k_L a / \epsilon_{GR}$ usled ugradnje impelera (ψ) pomoću sledećeg izraza:

$$\psi = \frac{(k_L a / \epsilon_{GR})_{ALSRI} - (k_L a / \epsilon_{GR})_{ALSR}}{(k_L a / \epsilon_{GR})_{ALSR}} \cdot 100\% \quad (5.4)$$

Zanimljivi zaključci mogu se izvesti posmatranjem relativne promene ovog odnosa postignute ugradnjom samo-rotirajućih impelera (slika 5.26). Sa ove slike se može videti da su u sistemima sa neviskoznom tečnostima vrednosti ψ rasute oko nule (maksimalno osciliraju do $\pm 10\%$) za ceo opseg prividnih brzina gasa bez obzira na upotrebljeni tip distributora, što znači da je ugradnja impelera u istoj meri dovela do smanjenja d_{32} i k_L . Međutim, znatno veće vrednosti (do 84%) su ostvarene u viskoznom rastvorima CMC, što znači da su vrednosti odnosa $k_L a / \epsilon_{GR}$ znatno veće u konfiguraciji sa impelerima u odnosu na vrednosti odnosa $k_L a / \epsilon_{GR}$ postignute u konfiguraciji bez impelera. Na osnovu ovoga može se zaključiti da se ugradnjom impelera u viskoznom rastvorima CMC postiže znatno veće smanjenje d_{32} u odnosu na smanjenje k_L . Ovo je u skladu sa prethodno zapaženim efikasnim razbijanjem mehurova prilikom kontakta lopatica impelera sa velikim mehurovima koje dovodi do značajnog smanjenja srednjeg prečnika mehurova gasa. Takođe, može se videti da što je viskoznost rastvora CMC veća, vrednosti ψ su veće. Naime, usled porasta viskoznosti raste i srednji prečnik mehurova gasa, te ugradnjom impelera dolazi do još većeg smanjenja d_{32} u viskoznijim rastvorima CMC.

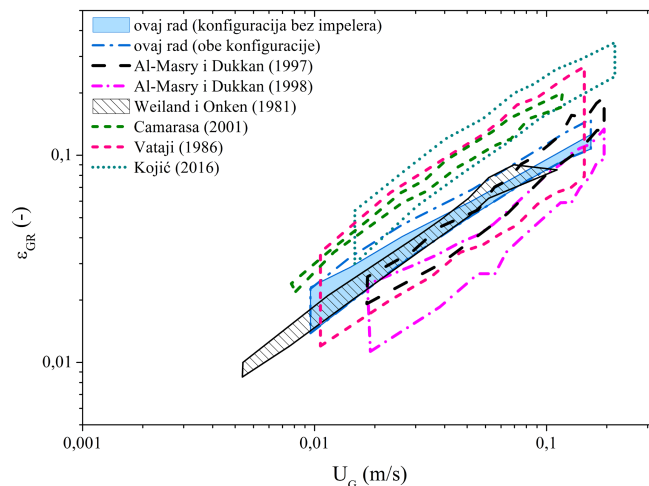
Kad je reč o uticaju distributora gasa na ψ kada je kao tečna faza korišćen rastvor CMC-3 mogu se izvesti slični zaključci kao i u slučaju VI (potpoglavlje 5.5.2). Primenom jednostrukog uvodnika vrednosti ψ opadaju sa porastom U_G . S druge strane, korišćenjem sinter ploče vrednosti ψ prvobitno rastu sa povećanjem prividne brzine gasa (do $U_G=0,025$ m/s) dok daljim povećanjem U_G vrednosti ψ opadaju, kao što je uočeno i sa jednostrukim uvodnikom.



Slika 5.26 Uticaj samo-rotirajućih impelera na relativnu promenu odnosa k_{LA}/ε_{GR} . a) jednostruki uvodnik i b) sinter ploča.

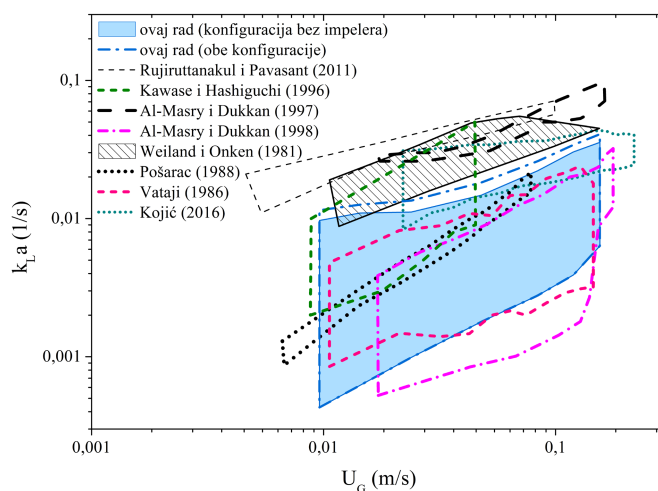
5.6 Poređenje rezultata dobijenih u ovom radu sa rezultatima drugih autora

Pregledom dosadašnjih saznanja o ALSR (poglavlje 2.2) uočeno je da su brojni autori ispitivali hidrodinamičke i masenoprenosne karakteristike u sistemima sa rastvorima alkohola, šećera ili karboksimetilceluloze. Na slici 5.27 prikazano je poređenje rezultata za sadržaj gasa u uzlaznoj cevi dobijenih u ovom radu sa podacima drugih autora. Za ovo poređenje korišćeni su samo rezultati autora koji su primenili približno isti opseg U_G kao u ovom radu, pri čemu su radi preglednosti prikazani samo reprezentativni rezultati. Detalji u vezi sa geometrijskim karakteristikama i korišćenim tečnim fazama dati su u tabeli 2.1. Može se videti da se podaci iz ovog rada uglavnom slažu sa dosadašnjim rezultatima dobijenim u dvofaznim ALSR. Camarasa i sar. (2001) i Kojić (2016) su u sistemima sa rastvorima alkohola dobili znatno veće vrednosti ε_{GR} , u poređenju sa rezultatima iz ovog rada. S druge strane, Al-Masry i Dukkan (1998) su u sistemima sa nenjutnovskim rastvorima CMC dobili niže vrednosti sadržaja gasa. Razlog tome verovatno su različite geometrije reaktora korišćenih u tim radovima u odnosu na ovaj eksperimentalni rad, dok u slučaju rada Al-Masry i Dukkan (1998) razlike potiču i usled različitih reoloških osobina korišćenih tečnih faza.



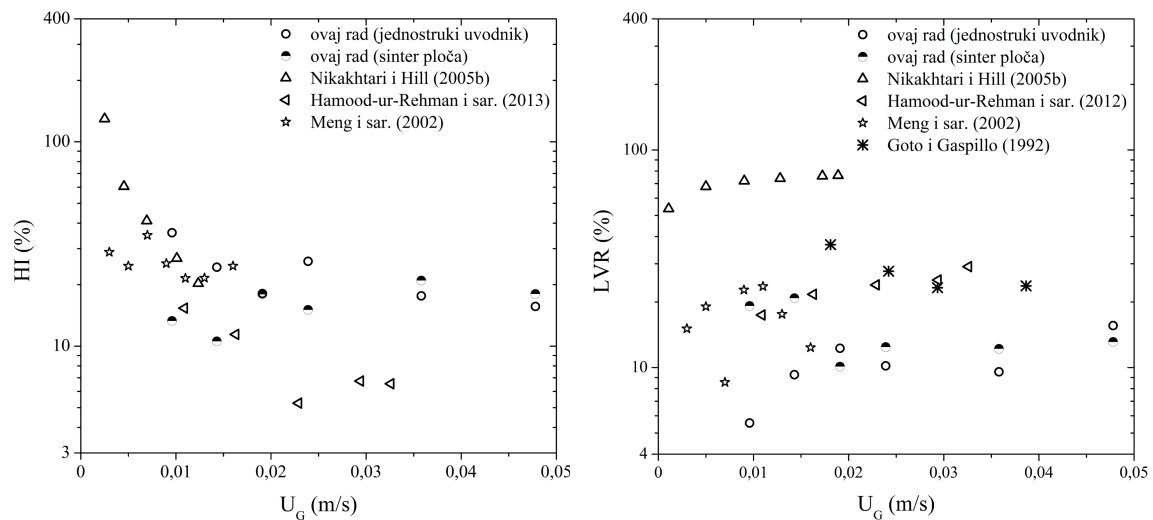
Slika 5.27 Poređenje postignutih vrednosti za sadržaj gasa u uzlaznoj cevi u ovom radu sa rezultatima drugih autora

Pregledom literature zapaženo je da se vrednosti k_{La} mogu razlikovati i po nekoliko desetina puta, u zavisnosti od geometrije reaktora, vrste tečne faze, tipa distributora gasa i U_G . Poređenje rezultata za k_{La} dobijenih u ovom radu sa rezultatima drugih autora koji su ispitivali ponašanje ALSR dato je na slici 5.28. Radi preglednosti, za poređenje su izabrani samo radovi u kojima je primenjen približno isti opseg U_G kao u ovom radu. Uočljivo je slaganje rezultata iz ovog rada sa rezultatima drugih autora. Kao i u slučaju ϵ_{GR} , u poređenju sa radovima drugih autora u kojima je kao tečna faza korišćen rastvor alkohola (Weiland i Onken, 1981; Pošarac, 1988; Al-Masry i Dukkan, 1997; Kojić, 2016), dobijene su niže vrednosti za k_{La} usled razlika u geometrijskim karakteristikama korišćenih reaktora. Na prikazanoj slici se na osnovu velikih površina koje su osvarene u sistemima sa nenjutnovskim tečnostima, kako u ovom radu tako i u radovima Al-Masry i Dukkan (1998), Kawase i Hashiguchi (1996) i Vataji (1986) vidi snažan uticaj viskoznosti na masenoprenosne karakteristike ALSR.



Slika 5.28 Poređenje postignutih vrednosti za zapreminski koeficijent prenosa mase u ovom radu sa rezultatima drugih autora

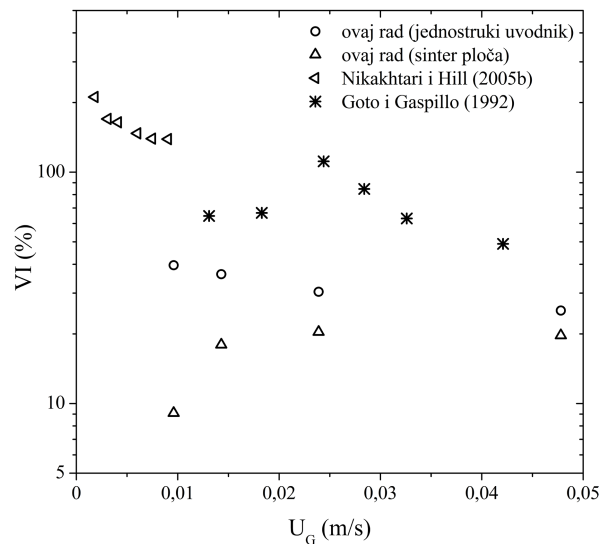
Potpunije sagledavanje uticaja ugradnje impelera na hidrodinamičke i masenoprenosne karakteristike izvršeno je poređenjem rezultata ostvarenih u ovom radu sa rezultatima koje su postigli drugi autori ugradnjom različitih umetaka u *airlift* reaktor sa spoljašnjom recirkulacijom kada je kao tečna faza korišćena voda. Na slici 5.29 prikazani su rezultati za hidrodinamičke karakteristike reaktora: poboljšanje sadržaja gasa u uzlaznoj cevi (*HI*) i relativno smanjenje brzine tečnosti (*LVR*), postignuti u ovom radu primenom samo-rotirajućih impelera, kao i u radovima drugih autora. Može se videti da su pri veoma malim protocima gasa Nikakhtari i Hill (2005b) postigli najveće vrednosti *HI* od oko 130%. Međutim, ovako veliko poboljšanje sadržaja gasa u uzlaznoj cevi ostvareno je na uštrb značajnog smanjenja brzine tečnosti, što se vidi na osnovu velike vrednosti *LVR* od 65%. Ostali autori su ostvarili povećanje sadržaja gasa u opsegu 10-35%, dok je relativno smanjenje brzine tečnosti iznosilo između 8-30%. Korišćenjem samo-rotirajućih impelera u ovom radu postignuti su slični rezultati.



Slika 5.29 Poređenje relativnih promena hidrodinamičkih veličina postignutih ugradnjom impelera u ovom radu sa rezultatima drugih autora uz korišćenje drugih umetaka (tečna faza: voda). a) *HI* i b) *LVR*.

Važno je napomenuti da su za opseg prividnih brzina gasa koje su ispitivane u ovom radu impelera postigli najveće poboljšanje sadržaja gasa uz najmanje smanjenje brzine tečnosti kada je kao distributor gasa korišćen jednostruki uvodnik. U slučaju sinter ploče, kao što je rečeno u potpoglavlju 5.3.2, pri manjim U_G ostvarene su nešto manje vrednosti *HI* u odnosu na vrednosti dobijene za jednostruki uvodnik. Bez obzira na smanjenje, dobijene vrednosti *HI* sa sinter pločom ne odstupaju značajnije u odnosu na rezultate drugih autora. Stoga se može zaključiti da se, bez obzira na upotrebljeni tip distributora gasa, ugradnjom samo-rotirajućih impelera u znatnoj meri poboljšavaju hidrodinamičke karakteristike reaktora.

Poređenjem vrednosti relativnog povećanja zapreminskog koeficijenta prenosa mase postignutog u ovom radu sa rezultatima drugih autora (slika 5.30) može se videti da se primenom samo-rotirajućih impelera postižu manje vrednosti VI . Najveće povećanje zapreminskog koeficijenta prenosa mase ostvareno je u radu Nikakhtari i Hill (2005b) što se moglo očekivati s obzirom da su ovi autori postigli najveće poboljšanje sadržaja gasa. Međutim, opsezi prividnih brzina koje su koristili ovi autori su veoma mali i nalaze se van opsega prividnih brzina korišćenih u ovom radu kao i radu Goto i Gaspillo (1992). Vrednosti VI koje su ostvarili Goto i Gaspillo (1992) ugradnjom statičkih miksera su do 2,5 puta veće u odnosu na vrednosti VI iz ovog rada. S druge strane, ukoliko se pogleda uticaj ugradnje umetaka na hidrodinamičke karakteristike (slika 5.29) može se videti da su statički mešači koje su koristili Goto i Gaspillo (1992) doveli do 2 puta većeg smanjenja brzine tečnosti u odnosu na smanjenje brzine tečnosti koje se postiže ugradnjom samo-rotirajućih impelera.



Slika 5.30 Poređenje relativnog povećanja zapreminskog koeficijenta prenosa mase postignutog ugradnjom impelera u ovom radu sa rezultatima drugih autora uz korišćenje drugih umetaka (tečna faza: voda).

5.7 Modelovanje rezultata

5.7.1 Empirijske korelacije

Jedan od posebnih ciljeva ovog rada bilo je i razvijanje korelacija pomoću kojih će se uspešno predviđati osnovne hidrodinamičke i masenoprenosne veličine *airlift* reaktora sa spoljašnjom recirkulacijom sa i bez impelera. Veličine ispitivane u ovom radu korelisane su pomoću dva izraza. Za sisteme sa neviskoznim tečnostima (voda i

rastvor *n*-butanola) predložena je korelacija čiji je uopšteni oblik dat izrazom 5.5 dok je za sisteme sa nenjutnovskim tečnostima (rastvori CMC) korišćen izraz 5.6.

$$\text{neviskozne tečnosti: } \gamma = p_1 U_G^{p_2} d_o^{\frac{p_3}{U_G}} \left(1 + \left(-\frac{d\sigma}{dC_A}\right)\right)^{p_4} \quad (5.5)$$

$$\text{nenjutnovske tečnosti } \gamma = p_1 U_G^{p_2} d_o^{\frac{p_3}{U_G}} \mu_a^{p_5} \quad (5.6)$$

U oba izraza γ predstavlja sadržaj gasa u uzlaznoj cevi, brzinu tečnosti u silaznoj cevi ili zapreminski koeficijent prenosa mase. Važno je napomenuti da su ε_{GR} , W_{LD} i k_{La} korelisani ili u konfiguraciji bez impelera ili u konfiguraciji sa impelerima. Korelacije su razvijene za sledeće opsege nezavisno promenljivih: $0,0096 < U_G < 0,1552$ m/s; $0,115 < d_o < 4$ mm; $0 < -(d\sigma/dC_A) < 0,155$ mNm²/mol i $0,001 < \mu_a < 0,122$ Pa·s.

Kako bi se uključio uticaj brzine gasa i tipa distributora, obe predložene korelacije kao nezavisne promenljive sadrže prividnu brzinu gasa (U_G) odnosno prečnik otvora distributora (d_o). Imajući u vidu da je uticaj distributora gasa najviše izražen pri manjim brzinama gasa, a s ciljem da se korelisanje izvrši za ceo opseg primenjenih protoka a ne pojedinačno u granicama uočenih režima, stepen veličine d_o je modifikovan dodavanjem člana U_G kako bi se uključilo zajedničko dejstvo tipa distributora i prividne brzine gasa. Korelacije predložene izrazima 5.5 i 5.6 razlikuju se samo po poslednjem članu koji opisuje osobine tečne faze. U slučaju neviskozni tečnosti, usvojen je gradijent površinskog napona kao nezavisna promenljiva, jer se njime najbolje opisuju karakteristike ovih tečnosti (Šijački i sar., 2013). S druge strane, u slučaju nenjutnovskih tečnosti pogodnije je koristiti prividnu viskoznost kao nezavisnu promenljivu. Prividna viskoznost (μ_a) računata je na osnovu izraza 2.4, dok je brzina smicanja (γ) određivana primenom metode koju su predložili Cerri i sar. (2008). Ova metoda obuhvata fitovanje rezultata za k_{La} u njutnovskim (voda i rastvori šećera) i nenjutnovskim fluidima (rastvori CMC) za svaku konfiguraciju pojedinačno na osnovu izraza 4.19 odnosno 4.21, pri čemu su vrednosti parametara i koeficijenata determinacije prikazane u prilogu 6. Dobijene vrednosti parametara poslužile su da se na osnovu izraza 4.22 izvedu sledeći izrazi za procenu brzine smicanja u zavisnosti od konfiguracije reaktora:

$$\text{ALSR: } \gamma = (1,469 U_G^{-0,065} K^{0,369})^{1/(n-1)} \quad (5.7)$$

$$\text{ALSRI: } \gamma = (0,461 U_G^{-0,068} K^{0,185})^{1/(n-1)} \quad (5.8)$$

S obzirom da su korelacije date izrazima 5.5 i 5.6 izrazito nelinearne, parametri korelacija p_1 - p_5 određivani su nelinearnom regresijom primenom paketa Statistics Toolbox u Matlab R2015b programu. Dobijene vrednosti parametara za ε_{GR} , W_{LD} i k_{La}

prikazane su u tabelama 5.1, 5.2, odnosno 5.3. Takođe, prikazane su i vrednosti grešaka parametara (Δp_i). Pored toga, date su i značajnosti pojedinačnih parametara (t) izražene u procentima, kao i podaci o srednjoj kvadratnoj grešci (MSE), koeficijentu determinacije (R^2) i srednjoj relativnoj grešci (δ). Na osnovu rezultata fitovanja može se zaključiti da predložene korelacije veoma uspešno predviđaju hidrodinamičke i masenoprenosne veličine. U svim slučajevima postignuti su veliki koeficijenti determinacije (iznad 0,96) uz niske vrednosti srednje relativne greške.

Tabela 5.1 Kvalitet fitovanja i vrednosti parametara dobijenih korelisanjem podataka za sadržaj gasa u uzlaznoj cevi

	korelacija 5.5		korelacija 5.6	
	ALSR	ALSRI	ALSR	ALSRI
$p_1 \pm \Delta p_1$	0,464±0,008	0,546±0,012	0,398±0,015	0,420±0,022
t_1 (%)	33,5	35,2	33,1	29,3
$p_2 \pm \Delta p_2$	0,688±0,007	0,675±0,009	0,660±0,014	0,684±0,018
t_2 (%)	59,2	58,8	59,4	58,8
$(p_3 \pm \Delta p_3) \cdot 10^3$	-0,71±0,12	/	-0,78±0,21	-0,96±0,30
t_3 (%)	3,6	/	4,7	4,9
$p_4 \pm \Delta p_4$	-0,097±0,016	-0,142±0,018	/	/
t_4 (%)	3,7	6,0	/	/
$p_5 \pm \Delta p_5$	/	/	0,011±0,005	-0,398±0,015
t_5 (%)	/	/	2,8	7,0
MSE	0,00179	0,00229	0,00331	0,00548
R^2	0,998	0,998	0,989	0,987
δ (%)	3,9	3,9	5,0	6,1

Tabela 5.2 Kvalitet fitovanja i vrednosti parametara dobijenih korelisanjem podataka za brzinu tečnosti u silaznoj cevi

	korelacija 5.5		korelacija 5.6	
	ALSR	ALSRI	ALSR	ALSRI
$p_1 \pm \Delta p_1$	3,24±0,06	3,18±0,07	2,52±0,08	2,10±0,08
t_1 (%)	50,3	50,6	33,9	32,7
$p_2 \pm \Delta p_2$	0,337±0,006	0,366±0,008	0,41±0,01	0,40±0,01
t_2 (%)	48,1	49,4	44,9	45,8
$(p_3 \pm \Delta p_3) \cdot 10^3$	-0,16±0,09	/	-0,79±0,15	-0,33±0,16
t_3 (%)	1,6	/	5,6	2,6
$p_4 \pm \Delta p_4$	/	/	/	/
t_4 (%)	/	/	/	/
$p_5 \pm \Delta p_5$	/	/	-0,075±0,005	-0,074±0,005
t_5 (%)	/	/	15,6	18,9
MSE	0,0376	0,0393	0,0393	0,0467
R^2	0,990	0,990	0,989	0,984
δ (%)	2,9	2,7	3,8	5,1

Tabela 5.3 Kvalitet fitovanja i vrednosti parametara dobijenih korelisanjem podataka za zapreminski koeficijent prenosa mase

	korelacija 5.5		korelacija 5.6	
	ALSR	ALSRI	ALSR	ALSRI
$p_1 \pm \Delta p_1$	0,152±0,008	0,169±0,009	$(9,45 \pm 0,95) \cdot 10^{-3}$	$(7,97 \pm 0,68) \cdot 10^{-3}$
t_1 (%)	25,4	26,3	16,2	15,9
$p_2 \pm \Delta p_2$	0,74±0,002	0,71±0,02	0,64±0,04	0,62±0,03
t_2 (%)	45,5	43,9	29,4	31,3
$(p_3 \pm \Delta p_3) \cdot 10^3$	-2,63±0,37	-2,30±0,36	-3,94±0,45	-4,58±0,44
t_3 (%)	10	9,1	14,4	14,1
$p_4 \pm \Delta p_4$	-0,67±0,005	-0,66±0,05	/	/
t_4 (%)	19	20,7	/	/
$p_5 \pm \Delta p_5$	/	/	-0,3±0,01	-0,36±0,04
t_5 (%)	/	/	40,0	38,7
MSE	0,00125	0,00132	0,00063	0,00051
R^2	0,983	0,989	0,965	0,986
δ (%)	7,8	7,8	10,6	9,5

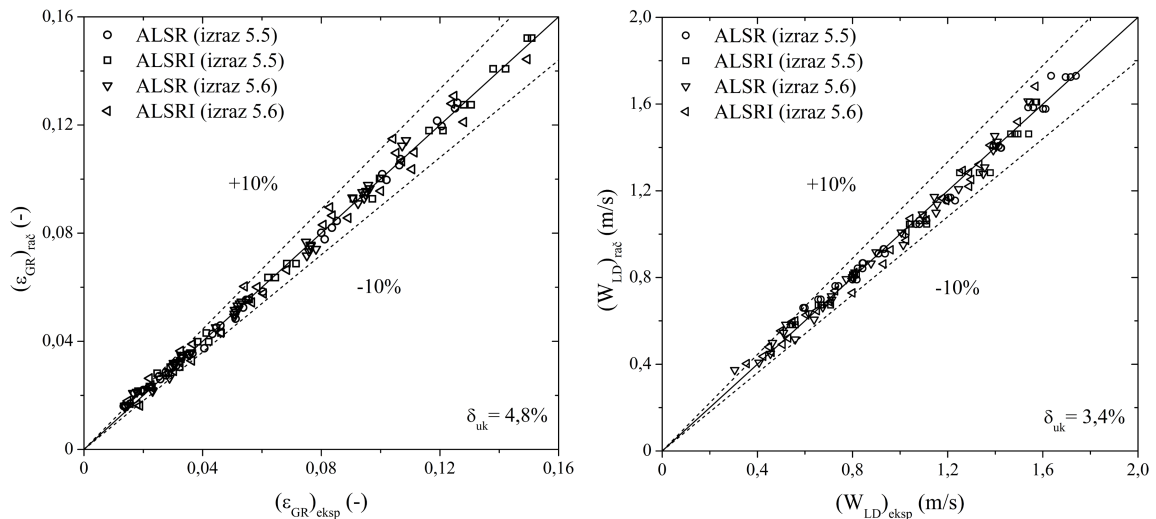
Zanimljiva zapažanja mogu se izneti na osnovu statističke analize rezultata fitovanja. Na osnovu t vrednosti iz tabele 5.1 može se videti da najveći uticaj na sadržaj gasa ima U_G bez obzira na vrstu tečne faze i konfiguraciju reaktora. Poređenjem dobijenih rezultata fitovanja u obe konfiguracije za neviskozne tečnosti (izraz 5.5) mogu se izvesti interesantni zaključci. Naime, u konfiguraciji sa impelerima uočava se odsustvo parametra p_3 . U ovom slučaju utvrđeno je da parametar p_3 nije statistički značajan, što znači da otvor distributora nema uticaj na ε_{GR} u ALSRI, te je fitovanje ponovljeno uz izostavljanje člana d_o u korelaciji. To znači da se zahvaljujući dejstvu impelera jednostruki uvodnik izjednačio sa sinter pločom po efikasnosti.

Kao što se može videti iz tabele 5.2, U_G ima najjači uticaj i u slučaju W_{LD} bez obzira na vrstu tečne faze i konfiguraciju reaktora. U sistemima sa neviskoznim tečnostima (izraz 5.5) u obe konfiguracije parametar p_4 statistički nije značajan, što je u skladu sa zaključkom da dodatak n -butanola ne utiče na W_{LD} bez obzira na korišćeni tip distributora. Takođe, odsustvo parametra p_3 u korelaciji za predviđanje W_{LD} u sistemima sa neviskoznim tečnostima u ALSRI znači da su jednostruki uvodnik i sinter ploča po efikasnosti izjednačeni usled ugradnje impelera u ALSRI.

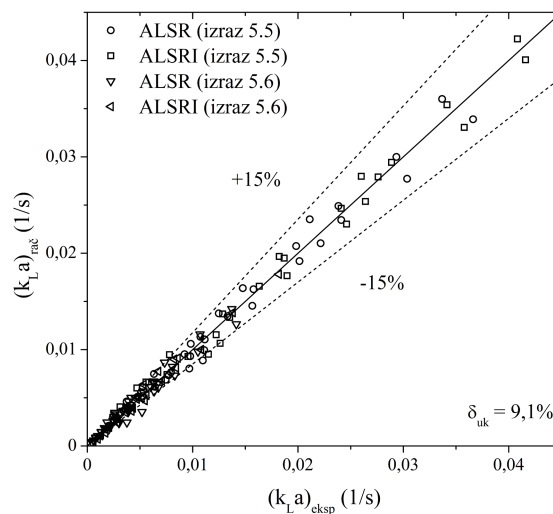
Statistička analiza podataka za $k_L a$, data u tabeli 5.3, ukazuje da U_G ima najveći uticaj u sistemima sa neviskoznim tečnostima. S druge strane, u sistemima sa viskoznim nenjutnovskim tečnostima najveći uticaj na $k_L a$ ima prividna viskoznost. Značajnost parametra p_3 veća je u viskoznim tečnostima u odnosu na neviskozne tečnosti, te se na osnovu toga može zaključiti da je uticaj tipa distributora izraženiji u viskoznim tečnostima. Isto se može uočiti i u slučaju ε_{GR} i W_{LD} . Važno je napomenuti da se

prethodno iznesena zapažanja na osnovu statističke analize u potpunosti slažu sa zaključcima iznetim u potpoglavljima 5.3, 5.4 i 5.5.

Slike 5.31 i 5.32 prikazuju poređenje eksperimentalnih i računskih vrednosti za sadržaj gasa u uzlaznoj cevi i brzinu tečnosti u silaznoj cevi, odnosno zapreminski koeficijent prenosa mase. Na osnovu ovih slika može se zaključiti da predložene korelacije veoma dobro predviđaju vrednosti za ε_{GR} , W_{LD} i $k_L a$ u obe konfiguracije reaktora sa ukupnom srednjom relativnom greškom od 4,8%, 3,4%, odnosno 9,1%. Oko 86% vrednosti za sadržaj gasa može se predvideti sa greškom manjom od 10% primenom predloženih korelacija, dok se u slučaju brzine tečnosti čak oko 95% podataka predviđa sa greškom ispod 10%, što su izuzetno zadovoljavajući rezultati. U odnosu na sadržaj gasa i brzinu tečnosti korelacije slabije predviđaju $k_L a$ pošto je tek oko 68% vrednosti predviđeno sa greškom manjom od 10%.



Slika 5.31 Poređenje eksperimentalnih i izračunatih vrednosti hidrodinamičkih veličina primenom korelacija. a) sadržaj gasa i b) brzina tečnosti.



Slika 5.32 Poređenje eksperimentalnih i izračunatih vrednosti zapreminskog koeficijenta prenosa mase primenom korelacija

5.7.2 Veštačke neuronske mreže

Iako predložene empirijske korelacije veoma uspešno predviđaju sadržaj gasa, brzinu tečnosti i zapreminski koeficijent prenosa mase, jedan od ciljeva ovog rada je i mogućnost primene veštačkih neuronskih mreža (VNM) za predviđanje ovih veličina u *airlift* reaktoru sa spoljašnjom recirkulacijom. S obzirom da se svaka od četiri predložene korelacije može koristiti samo za neviskozne ili viskozne tečnosti u jednoj od konfiguracija, ALSR ili ALSRI, prednost VNM nad korelacijama ogleda se u mogućnosti primene samo jedne mreže bez obzira na konfiguraciju reaktora ili vrstu tečne faze.

Za modelovanje hidrodinamičkih i masenoprenosnih karakteristika ispitivanih reaktora izabrane su nepovratne troslojne mreže koje koriste algoritam povratnog prostiranja u cilju minimizacije srednje kvadratne greške (*MSE*) podataka za obučavanje. Primenjen je Levenberg-Marquardt algoritam tokom obučavanja sa koeficijentom momenta i stepenom brzine učenja u iznosu od 0,9 odnosno 0,05. Za aktivaciju neurona u skrivenom i izlaznom sloju korišćene su sigmoidna odnosno linearna aktivaciona funkcija pošto ove funkcije veoma uspešno predviđaju nelinearne odnose između ulaznih i izlaznih podataka (Al-Masry, 2006).

S ciljem da se izbegnu velike razlike u jačinama sinaptičkih veza koje mogu dovesti do značajnih grešaka, tj. šumova (Liu i sar., 2014), pre obučavanja veštačkih neuronskih mreža eksperimentalni podaci su normalizovani u intervalu [0,01, 0,99] korišćenjem sledećeg izraza:

$$\hat{y}_i = 0,98 \frac{y_i - y_{min}}{y_{max} - y_{min}} + 0.01 \quad (5.9)$$

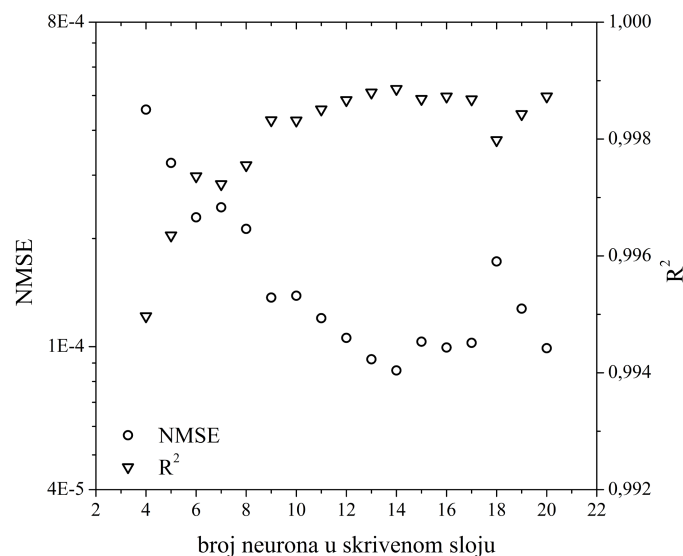
gde su y_{min} i y_{max} minimalna odnosno maksimalna vrednost y_i , a \hat{y}_i normalizovana vrednost promenljive y_i . Eksperimentalni podaci su zatim nasumično podeljeni u tri skupa podataka: za obučavanje, vrednovanje i testiranje modela koji se sastoje od oko 70%, 15% odnosno 15% eksperimentalnih podataka.

Da bi se izbegla prekomerna specijalizacija mreže, kada algoritam nauči da bez greške prepoznaje slučajeve iz skupa podataka za obučavanje, ali nije u mogućnosti da prepozna slučajeve koji se razlikuju od naučenih, korišćen je postupak unakrsnog vrednovanja (Saghatoleslami i sar., 2011). Pomoću unakrsnog vrednovanja uočava se ciklus nakon kog je neophodno zaustaviti obučavanje mreže. Kao kriterijum za rano zaustavljanje obučavanja u ovom radu izabran je niz od deset uzastopnih ciklusa u

kojima dolazi do porasta normalizovane vrednosti srednje kvadratne greške ($NMSE$) na podacima za vrednovanje uprkos stalnom smanjivanju $NMSE$ podataka za obučavanje. Svi proračuni izvršeni su primenom komercijalnog paketa Neural Network Toolbox u sklopu Matlab R2015b programa.

Za svaku od veličina ispitivanih u ovom radu (sadržaj gasa, brzinu tečnosti i zapreminski koeficijent prenosa mase) formirana je po jedna neuronska mreža. U daljem tekstu mreže kojima se modeluju podaci za ε_{GR} , W_{LD} i k_{La} nose oznaku VNM-1, VNM-2 odnosno VNM-3. Ulazni sloj u sve tri mreže sadrži pet neurona, pri čemu svaki od njih predstavlja sledeće nezavisne promenljive: prividnu brzinu gasa, otvor distributora gasa, površinski napon, prividnu viskoznost i tip konfiguracije. Izlazni sloj u sve tri mreže sadrži po jedan neuron koji odgovara izlaznoj promenljivoj: ε_{GR} , W_{LD} ili k_{La} . Optimalan broj neurona u skrivenom sloju određivan je u literaturi najčešće korišćenom metodom probe i greške, pri čemu je broj neurona u skrivenom sloju variran od četiri do 20. S obzirom da učinak neuronskih mreža u velikoj meri zavisi od početnih vrednosti sinaptičkih težina, za dati broj neurona u skrivenom sloju vršeno je 20 proračuna kako bi se postigli najbolji rezultati (Saghatoleslami i sar., 2011; Morales-Medina i sar., 2016).

Na slici 5.33 ilustrovano je određivanje optimalnog broja neurona u skrivenom sloju za mrežu VNM-3. Prikazana je promena normalizovane vrednosti srednje kvadratne greške i koeficijenta determinacije sa brojem neurona u skrivenom sloju. Može se videti da optimalna topologija mreže VNM-3 sadrži 14 neurona u skrivenom sloju, jer je sa tom topologijom postignuta najmanja $NMSE$ uz najveći R^2 . Slični trendovi su takođe uočeni i kod neuronskih mreža VNM-1 i VNM-2 sa 13 odnosno 15 neurona u skrivenom sloju u optimalnoj topologiji mreže (prilog 5).



Slika 5.33 Uticaj broja neurona u skrivenom sloju na normalizovanu vrednost srednje kvadratne greške i koeficijent determinacije za mrežu VNM-3

U tabeli 5.4 date su optimalne topologije za sve tri mreže, zajedno sa vrednostima ključnih parametara. Kao što se može videti, srednje kvadratne greške eksperimentalnih podataka za ε_{GR} , W_{LD} i k_{La} su korišćenjem modela neuronskih mreža značajno manje u odnosu na predložene empirijske modele, čime se opravdava njihova primena za predviđanje hidrodinamičkih i masenoprenosnih veličina u *airlift* reaktoru sa spoljašnjom recirkulacijom. Ovu tvrdnju takođe potvrđuju i izuzetno visoke vrednosti koeficijenta determinacije u sve tri mreže (iznad 0,99).

Tabela 5.4 Optimalna topologija i kvalitet predviđanja primenom veštačkih neuronskih mreža

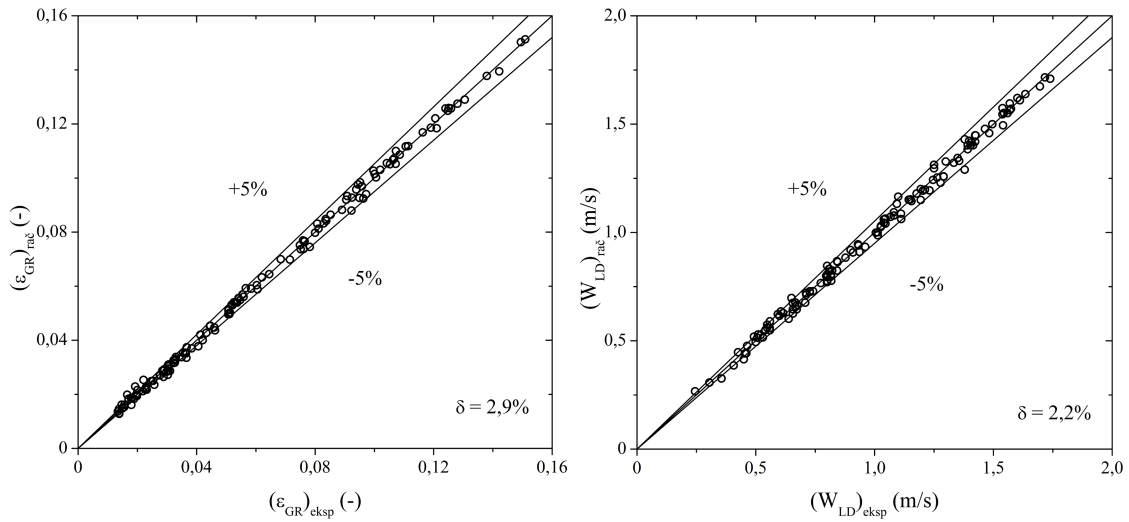
veličina	mreža	BN_{us}^*	$OB_{N_{ss}}^\dagger$	BN_{is}^\ddagger	$NMSE$	R^2	MSE	δ (%)
ε_{GR}	VNM-1	5	13	1	$3,31 \cdot 10^{-4}$	0,998	$4,42 \cdot 10^{-6}$	2,9
W_{LD}	VNM-2	5	15	1	$3,37 \cdot 10^{-4}$	0,997	$5,70 \cdot 10^{-4}$	2,2
k_{La}	VNM-3	5	14	1	$8,59 \cdot 10^{-5}$	0,999	$1,28 \cdot 10^{-7}$	4,8

* broj neurona u ulaznom sloju

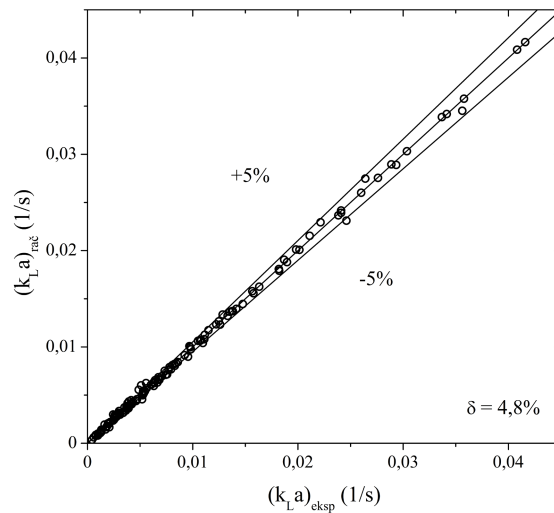
† optimalan broj neurona u skrivenom sloju

‡ broj neurona u izlaznom sloju

Na slikama 5.34 i 5.35 prikazano je poređenje eksperimentalnih i računskih vrednosti za sadržaj gasa u uzlaznoj cevi, brzinu tečnosti u silaznoj cevi i zapreminski koeficijent prenosa mase primenom neuronskih mreža VNM-1, VNM-2 odnosno VNM-3. Na osnovu ovih slika može se zaključiti da predloženi modeli veštačkih neuronskih mreža izuzetno dobro predviđaju vrednosti za ε_{GR} , W_{LD} i k_{La} u obe konfiguracije reaktora sa srednjom relativnom greškom od 2,9%, 2,2% odnosno 4,8%. Pri tome oko 95% podataka za sadržaj gasa se korišćenjem modela VNM-1 može predvideti sa greškom manjom od 10%, dok se u slučaju brzine tečnosti primenom modela VNM-2 svi eksperimentalni podaci predviđaju sa greškom manjom od 10%. U slučaju mreže VNM-3, kojom se predviđaju vrednosti k_{La} , oko 91% podataka se može predvideti u opsegu $\pm 10\%$. Poređenjem sa rezultatima dobijenim primenom empirijskih korelacija (potpoglavlje 5.7.1) uočava se da se primenom modela veštačkih neuronskih mreža postiže bolje slaganje između eksperimentalnih i izračunatih vrednosti u odnosu na predložene korelacije, što dodatno potvrđuje podobnost neuronskih mreža.



Slika 5.34 Poređenje eksperimentalnih i izračunatih vrednosti hidrodinamičkih veličina primenom veštačkih neuronskih mreža. a) sadržaj gasa (mreža VNM-1) i b) brzina tečnosti (mreža VNM-2).



Slika 5.35 Poređenje eksperimentalnih i izračunatih vrednosti zapreminskog koeficijenta prenosa mase primenom veštačke neuronske mreže VNM-3

6. ZAKLJUČAK

U okviru ovog rada izvršena su eksperimentalna ispitivanja uticaja ugradnje samo-rotirajućih impelera u uzlaznu cev na osnovne hidrodinamičke i masenoprenosne karakteristike *airlift* reaktora sa spoljašnjom recirkulacijom tečnosti. Ispitan je i uticaj prividne brzine gasa, karakteristika tečne faze i tipa distributora gasa na osnovne hidrodinamičke i masenoprenosne parametre, kako u konfiguraciji bez impelera tako i u konfiguraciji sa impelerima. Pored toga, razvijeni su empirijski modeli i modeli veštačkih neuronskih mreža koji omogućavaju predviđanje sadržaja gasa, brzine tečnosti i zapreminskog koeficijenta prenosa mase u obe ispitivane konfiguracije *airlift* reaktora sa spoljašnjom recirkulacijom.

Na osnovu dobijenih rezultata mogu se izvesti sledeći zaključci o mogućnostima primene samo-rotirajućih impelera u cilju poboljšanja hidrodinamičkih i masenoprenosnih karakteristika *airlift* reaktora sa spoljašnjom recirkulacijom:

- i. U svim ispitivanim sistemima, brzina obrtanja impelera nezavisna je od pozicije impelera u uzlaznoj cevi reaktora. Sa porastom prividne brzine gasa, brzina obrtanja impelera stalno raste. Ispitivanja uticaja vrste tečne faze na brzinu obrtanja pokazala su da dolazi do znatno sporijeg okretanja impelera sa porastom viskoznosti tečne faze. S druge strane, tip distributora gasa ne utiče na obrtanje samo-rotirajućih impelera.
- ii. Rezultati ispitivanja režima rada pokazali su da ugradnja samo-rotirajućih impelera znatno utiče na ponašanje mehurova, a sami tim i na režime strujanja. Njihov uticaj na režime strujanja najizraženiji je u viskoznijim rastvorima karboksimetilceluloze (CMC) korišćenjem jednostrukog uvodnika. Analiza

sekvenci slika ukazuje da prilikom kontakta velikih mehurova sa lopaticama impelera dolazi do izuzetno efikasnog razbijanja mehurova gasa.

- iii. Rezultati ispitivanja sadržaja gasa u uzlaznoj cevi pokazali su da se ugradnjom samo-rotirajućih impelera u svim ispitivanim sistemima postiže značajno povećanje sadržaja gasa, što je posledica razbijanja mehurova od strane impelera, ali i posledica suzbijanja koalescencije usled povećane turbulencije. Relativno povećanje sadržaja gasa u velikoj meri zavisi od korišćene vrste tečne faze i tipa distributora gasa. Najveća povećanja sadržaja gasa, u opsegu 7-47%, postižu se pri najmanjim prividnim brzinama gasa (U_G) kada je upotrebljen jednostruki uvodnik. Pri većim U_G , uticaj tipa distributora na relativno povećanje sadržaja gasa je zanemarljiv.
- iv. Ugradnjom impelera dolazi do umerenog sniženja brzine tečnosti u svim ispitivanim sistemima, što je bila i jedna od osnovnih namena ovog tipa umetka. Relativno sniženje brzine tečnosti u silaznoj cevi primenom samo-rotirajućih impelera u proseku iznosi oko 10% bez obzira na vrstu tečne faze i tip distributora gasa.
- v. Rezultati ispitivanja zapreminskog koeficijenta prenosa mase (k_{La}) ukazuju na to da se ugradnjom samo-rotirajućih impelera u uzlaznu cev ALSR postižu značajna povećanja k_{La} u opsegu od 9 do 82%. Za uslove rada koji se najčešće sreću u fermentacionim procesima (veće U_G) dobijene su 20-30% veće vrednosti k_{La} na šta su uticale i karakteristike tečne faze kao i tip distributora gasa. Najveće povećanje k_{La} dobijeno je u sistemima sa viskoznim rastvorima CMC pri najmanjim U_G primenom jednostrukog uvodnika. Sa porastom U_G impelera su bili manje efikasni. Pri većim U_G , tip distributora gasa nije imao uticaja.
- vi. Relativne promene odnosa k_{La}/ε_{GR} koje se postižu ugradnjom impelera ukazuju na to da samo-rotirajući impelera u viskoznim rastvorima CMC dovode do znatno većeg smanjenja d_{32} u odnosu na smanjenje k_L , dok u neviskoznim tečnostima dovode do približno istog smanjenja d_{32} i k_L .
- vii. Empirijske korelacije su veoma uspešno (sa srednjom relativnom greškom do 9,1%) predvidele sadržaj gasa, brzinu tečnosti, odnosno zapreminski koeficijent prenosa mase, u obe konfiguracije *airlift* reaktora sa spoljašnjom recirkulacijom.

Zaključak

- viii. Razvijeni modeli veštačkih neuronskih mreža izuzetno dobro predviđaju vrednosti za sadržaj gasa, brzinu tečnosti i zapreminski koeficijent prenosa mase sa srednjom relativnom greškom do 4,8%.

Rezultati ove doktorske disertacije nedvosmisleno ukazuju da samo-rotirajući impeleri mogu uspešno da se koriste za poboljšanje hidrodinamičkih i masenoprenosnih karakteristika, s obzirom da njihovom ugradnjom, uz zanemarljive energetske zahteve, dolazi do opadanja srednjeg prečnika mehurova gasa, povećanja sadržaja gasa i zapreminskog koeficijenta prenosa mase, kao i umerenog smanjenja brzine tečnosti.

LITERATURA

- Abashar, M.E., U. Narsingh, A.E. Rouillard i R. Judd (1998). Hydrodynamic Flow Regimes, Gas Holdup, and Liquid Circulation in Airlift Reactors. *Industrial and Engineering Chemistry Research*, 37, 1251-1259.
- Abashar, M.E.E. (2002). Influence of Hydrodynamic Flow Regimes on the Prediction of Gas Hold-up and Liquid Circulation in Airlift Reactors. *Journal of King Saud University - Engineering Science*, 16, 97-111.
- Akita, K., T. Okazaki i H. Koyama (1988). Gas holdups and friction factors of gas-liquid two-phase flow in an air-lift bubble column. *Journal of Chemical Engineering of Japan*, 21, 476-482.
- Akita, K., O. Nakanishi i K. Tsuchiya (1994). Turn-around energy losses in an external-loop airlift reactor. *Chemical Engineering Science*, 49, 2521-2533.
- Al-Masry, W.A. i M. Chetty (1996). On the estimation of effective shear rate in external loop airlift reactors: non-Newtonian fluids. *Resources, Conservation and Recycling*, 18, 11-24.
- Al-Masry, W.A. i A.R. Dukkan (1997). The role of gas disengagement and surface active agents on hydrodynamic and mass transfer characteristics of airlift reactors. *Chemical Engineering Journal*, 65, 263-271.
- Al-Masry, W.A. i A.R. Dukkan (1998). Hydrodynamics and Mass-Transfer Studies in a Pilot-Plant Airlift Reactor: Non-Newtonian Systems. *Industrial and Engineering Chemistry Research*, 37, 41-48.
- Al-Masry, W.A. (2001). Gas Holdup in Circulating Bubble Columns with Pseudoplastic Liquids. *Chemical Engineering and Technology*, 24, 71-76.
- Al-Masry, W.A. (2004). Influence of gas separator and scale-up on the hydrodynamics of external loop circulating bubble columns. *Chemical Engineering Research and Design*, 82, 381-389.
- Al-Masry, W.A. (2006). Analysis of hydrodynamics of external loop circulating bubble columns with open channel gas separators using neural networks. *Chemical Engineering Research and Design*, 84, 483-486.
- Albijanić, B., V. Havran, D.L. Petrović, M. Djurić i M.N. Tekić (2007). Hydrodynamics and mass transfer in a draft tube airlift reactor with dilute alcohol solutions. *AIChE Journal*, 53, 2897-2904.
- Alvarez, E., J.M. Correa, C. Riverol i J.M. Navaza (2000). Model based in neural networks for the prediction of the mass transfer coefficients in bubble columns. Study in Newtonian and non-Newtonian fluids. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 27, 93-98.
- Baawain, M.S., M.G. El-Din i D.W. Smith (2007). Artificial Neural Networks Modeling of Ozone Bubble Columns: Mass Transfer Coefficient, Gas Hold-Up, and Bubble Size. *Ozone: Science & Engineering*, 29, 343-352.

- Bajón Fernández, Y., E. Cartmell, A. Soares, E. McAdam, P. Vale, C. Darche-Dugaret i B. Jefferson (2015). Gas to liquid mass transfer in rheologically complex fluids. *Chemical Engineering Journal*, 273, 656-667.
- Bello, R.A., C.W. Robinson i M. Moo-Young (1980). Mass transfer and liquid mixing in external-circulation-loop contactors. *Advances in Biotechnology*. Ed: M. Moo-Young, Pergamon Press. 1: 547-552.
- Bello, R.A., C.W. Robinson i M. Moo-Young (1984). Liquid circulation and mixing characteristics of airlift contactors. *The Canadian Journal of Chemical Engineering*, 62, 573-577.
- Bello, R.A., C.W. Robinson i M. Moo-Young (1985a). Gas holdup and overall volumetric oxygen transfer coefficient in airlift contactors. *Biotechnology and Bioengineering*, 27, 369-381.
- Bello, R.A., C.W. Robinson i M. Moo-Young (1985b). Prediction of the volumetric mass transfer coefficient in pneumatic contactors. *Chemical Engineering Science*, 40, 53-58.
- Bendjaballah, N., H. Dhaouadi, S. Poncin, N. Midoux, J.-M. Hornut i G. Wild (1999). Hydrodynamics and flow regimes in external loop airlift reactors. *Chemical Engineering Science*, 54, 5211-5221.
- Bentifraouine, C., C. Xuereb i J.-P. Riba (1997). An Experimental Study of the Hydrodynamic Characteristics of External Loop Airlift Contactors. *Journal of Chemical Technology & Biotechnology*, 69, 345-349.
- Benyahia, F., L. Jones, S. Petit i D. Plantaz (1996). Mass transfer studies in pneumatic reactors. *Chemical Engineering & Technology*, 19, 425-431.
- Benyahia, F. i L. Jones (1997). Scale Effects on Hydrodynamic and Mass Transfer Characteristics of External Loop Airlift Reactors. *Journal of Chemical Technology & Biotechnology*, 69, 301-308.
- Boyer, C., A.-M. Duquenne i G. Wild (2002). Measuring techniques in gas-liquid and gas-liquid-solid reactors. *Chemical Engineering Science*, 57, 3185-3215.
- Camarasa, E., E. Carvalho, L.A.C. Meleiro, R. Maciel Filho, A. Domingues, G. Wild, S. Poncin, N. Midoux i J. Bouillard (2001). A hydrodynamic model for air-lift reactors. *Chemical Engineering and Processing*, 40, 121-128.
- Cao, C., S. Dong, Q. Geng i Q. Guo (2008). Hydrodynamics and Axial Dispersion in a Gas-Liquid-(Solid) EL-ALR with Different Sparger Designs. *Industrial and Engineering Chemistry Research*, 47, 4008-4017.
- Carvalho, E., E. Camarasa, L.A.C. Meleiro, R. Maciel Filho, A. Domingues, C. Vial, G. Wild, S. Poncin, N. Midoux i J. Bouillard (2000). Development of a hydrodynamic model for air-lift reactors. *Brazilian Journal of Chemical Engineering*, 17, 607-616.
- Cerri, M.O., L. Futiwaki, C.D.F. Jesus, A.J.G. Cruz i A.C. Badino (2008). Average shear rate for non-Newtonian fluids in a concentric-tube airlift bioreactor. *Biochemical Engineering Journal*, 39, 51-57.
- Chaumat, H., A.M. Billet-Duquenne, F. Augier, C. Mathieu i H. Delmas (2005). Mass transfer in bubble column for industrial conditions-effects of organic medium,

- gas and liquid flow rates and column design. *Chemical Engineering Science*, 60, 5930-5936.
- Chavarría-Hernández, N., R. Sanjuan-Galindo, B.-R. Rodríguez-Pastrana, L. Medina-Torres i A.-I. Rodríguez-Hernández (2007). Submerged monoxenic culture of the entomopathogenic nematode *Steinernema carpocapsae* in an internal-loop airlift bioreactor using two configurations of the inner tube. *Biotechnology and Bioengineering*, 98, 167-176.
- Chisti, M.Y. i M. Moo-Young (1987). Airlift reactors: characteristics, applications and design considerations. *Chemical Engineering Communications*, 60, 195-242.
- Chisti, M.Y. (1989). *Airlift bioreactors*. London and New York, Elsevier Applied Science.
- Chisti, Y., M. Kasper i M. Moo-Young (1990). Mass transfer in external-loop airlift bioreactors using static mixers. *Canadian Journal of Chemical Engineering*, 68, 45-50.
- Chisti, Y. i U.J. Jauregui-Haza (2002). Oxygen transfer and mixing in mechanically agitated airlift bioreactors. *Biochemical Engineering Journal*, 10, 143-153.
- Choi, K. (2001). Hydrodynamic and mass transfer characteristics of external-loop airlift reactors without an extension tube above the downcomer. *Korean Journal of Chemical Engineering*, 18, 240-246.
- Choi, K.H. (2002). Effect of unaerated liquid height on hydrodynamic characteristics of an external-loop airlift reactor. *Chemical Engineering Communications*, 189, 23-39.
- de Jesus, S.S., A. Santana i R.M. Filho (2014). Hydrodynamic and Mass Transfer Study in a Mechanically Stirred Hybrid Airlift Bioreactor Based on Impeller Type. *International Journal of Chemical Engineering and Applications*, 5, 41-45.
- de Jesus, S.S., J. Moreira Neto, A. Santana i R. Maciel Filho (2015). Influence of impeller type on hydrodynamics and gas-liquid mass-transfer in stirred airlift bioreactor. *AIChE Journal*, 61, 3159-3171.
- Deng, Z., T. Wang, N. Zhang i Z. Wang (2010). Gas holdup, bubble behavior and mass transfer in a 5 m high internal-loop airlift reactor with non-Newtonian fluid. *Chemical Engineering Journal*, 160, 729-737.
- Dhaouadi, H., S. Poncin, J.M. Hornut, G. Wild, P. Oinas i J. Korpajarvi (1997). Mass transfer in an external-loop airlift reactor: experiments and modeling. *Chemical Engineering Science*, 52, 3909-3917.
- Fausett, L. (1994). *Fundamentals of Neural Networks: Architectures, Algorithms and Applications*. Upper Saddle River, NJ, USA, Prentice-Hall.
- Fields, P.R. i N.K.H. Slater (1983). Tracer dispersion in a laboratory air-lift reactor. *Chemical Engineering Science*, 38, 647-653.
- Freitas, C., M. Fialová, J. Zahradnik i J.A. Teixeira (1999). Hydrodynamic model for three-phase internal- and external-loop airlift reactors. *Chemical Engineering Science*, 54, 5253-5258.

- Garcia-Ochoa, F. i E. Gomez (2009). Bioreactor scale-up and oxygen transfer rate in microbial processes: An overview. *Biotechnology Advances*, 27, 153-176.
- Garson, G.D. (1991). Interpreting neural-network connection weights. *AI Expert*, 6, 46-51.
- Gavrilescu, M., R.V. Roman i R.Z. Tudose (1997). Hydrodynamics in external-loop airlift bioreactors with static mixers. *Bioprocess and Biosystems Engineering*, 16, 93-99.
- Gavrilescu, M. i R.Z. Tudose (1997). Mixing studies in external-loop airlift reactors. *Chemical Engineering Journal*, 66, 97-104.
- Gharib, J., M. Keshavarz Moraveji, R. Davarnejad i M.E. Malool (2013). Hydrodynamics and mass transfer study of aliphatic alcohols in airlift reactors. *Chemical Engineering Research and Design*, 91, 925–932.
- Ghirardini, M., G. Donati i F. Rivetti (1992). Gas lift reactors: hydrodynamics, mass transfer, and scale up. *Chemical Engineering Science*, 47, 2209-2214.
- Gibbs, P.A. i R.J. Seviour (1998). The production of exopolysaccharides by *Aureobasidium pullulans* in fermenters with low-shear configurations. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 49, 168-174.
- Gluz, M.D. i J.C. Merchuk (1996). Modified airlift reactors: The helical flow promoters. *Chemical Engineering Science*, 51, 2915-2920.
- Goto, S. i P.D. Gaspillo (1992). The effect of static mixer on mass transfer in draft tube bubble column and in external loop column. *Chemical Engineering Science*, 47, 3533-3539.
- Hagan, M.T., H.B. Demuth, M.H. Beale i O.D. Jesús (2014). *Neural Network Design*. Boston, MA, USA, PWS Publishing Co.
- Hamood-ur-Rehman, M., Y. Dahman i F. Ein-Mozaffari (2012). Investigation of mixing characteristics in a packed-bed external loop airlift bioreactor using tomography images. *Chemical Engineering Journal*, 213, 50-61.
- Hamood-ur-Rehman, M., F. Ein-Mozaffari i Y. Dahman (2013). Dynamic and local gas holdup studies in external loop recirculating airlift reactor with two rolls of fiberglass packing using electrical resistance tomography. *Journal of Chemical Technology & Biotechnology*, 88, 887-896.
- Haykin, S.S. (2009). *Neural Networks and Learning Machines*. Upper Saddle River, NJ, USA, Prentice Hall.
- Hsu, Y.C. i M.P. Dudukovic (1980). Gas holdup and liquid recirculation in gas-lift reactors. *Chemical Engineering Science*, 35, 135-141.
- Hughmark, G.A. (1967). Holdup and Mass Transfer in Bubble Columns. *Industrial and Engineering Chemistry Process Design and Development*, 6, 218-220.
- Hussain, A.M. (1999). Review of the applications of neural networks in chemical process control - simulation and online implementation. *Artificial Intelligence in Engineering*, 13, 55-68.

- Jokić, A.I., J.A. Grahovac, J.M. Dodić, S.N. Dodić, S.D. Popov, Z.Z. Zavargo i D.G. Vučurović (2012). Modelovanje alkoholne fermentacije gustog soka šećerne repe primenom veštačkih neuronskih mreža. *Hemijska industrija*, 66, 211-221.
- Jones, S.T. (2007). Gas-liquid mass transfer in an external airlift loop reactor for syngas fermentation. *Doktorska disertacija*, Iowa State University.
- Jones, S.T. i T.J. Heindel (2010). Hydrodynamic Considerations in an External Loop Airlift Reactor with a Modified Downcomer. *Industrial and Engineering Chemistry Research*, 49, 1931-1936.
- Joshi, J.B., V.V. Ranade, S.D. Gharat i S.S. Lele (1990). Sparged loop reactors. *The Canadian Journal of Chemical Engineering*, 68, 705-741.
- Kadic, E. i T.J. Heindel (2014). *An Introduction to Bioreactor Hydrodynamics and Gas-Liquid Mass Transfer*. Hoboken, NJ, USA, John Wiley & Sons, Inc.
- Kantarci, N., F. Borak i K.O. Ulgen (2005). Bubble column reactors. *Process Biochemistry*, 40, 2263-2283.
- Kawase, Y. i N. Hashiguchi (1996). Gas-liquid mass transfer in external-loop airlift columns with newtonian and non-newtonian fluids. *The Chemical Engineering Journal and the Biochemical Engineering Journal*, 62, 35-42.
- Keitel, G. (1978). Untersuchungen zum Stoffaustausch in Gas-Flüssig-Dispersionen in Rührschlaufenreaktor und Blasensäule. *Doktorska disertacija*, Universität Dortmund.
- Keitel, G. i U. Onken (1981). Errors in the determination of mass transfer in gas-liquid dispersions. *Chemical Engineering Science*, 36, 1927-1932.
- Kemłowski, Z., J. Przywarski i A. Diab (1993). An average gas hold-up and liquid circulation velocity in airlift reactors with external loop. *Chemical Engineering Science*, 48, 4023-4035.
- Kiambi, S.L., H.K. Kiriamiti i A. Kumar (2011). Characterization of two phase flows in chemical engineering reactors. *Flow Measurement and Instrumentation*, 22, 265-271.
- Kilonzo, P.M. i A. Margaritis (2004). The effects of non-Newtonian fermentation broth viscosity and small bubble segregation on oxygen mass transfer in gas-lift bioreactors: a critical review. *Biochemical Engineering Journal*, 17, 27-40.
- Koide, K., S. Yamazoe i S. Harada (1985). Effects of surface-active substances on gas holdup and gas-liquid mass transfer in bubble column. *Journal of Chemical Engineering of Japan*, 18, 287-292.
- Kojić, P. (2016). Hidrodinamika i prenos mase u airlift reaktoru sa membranom. *Doktorska disertacija*, Tehnološki fakultet, Univerzitet u Novom Sadu.
- Kojić, P.S., M.S. Tokić, I.M. Šijački, N.L. Lukić, D.L. Petrović, D.Z. Jovičević i S.S. Popović (2015). Influence of the Sparger Type and Added Alcohol on the Gas Holdup of an External-Loop Airlift Reactor. *Chemical Engineering & Technology*, 38, 701-708.
- Kojić, P.S., I.M. Šijački, N.L. Lukić, D.Z. Jovičević, S.S. Popović i D.L. Petrović (2016). Volumetric gas-liquid mass transfer coefficient in an external-loop airlift

- reactor with inserted membrane. *Chemical Industry and Chemical Engineering Quarterly*, 22, 275-284.
- Krichnavaruk, S. i P. Pavasant (2002). Analysis of gas–liquid mass transfer in an airlift contactor with perforated plates. *Chemical Engineering Journal*, 89, 203-211.
- Lefrancois, L., C.G.T. Mariller i J.V. Mejane (1955). *Effectionnements aux Procèdes de Cultures Forgiques et de Fermentations Industries Brevet D’Invention*. Broj patenta: 1,102,200, France.
- Letzel, M. i A. Stankiewicz (1999). Gas hold-up and mass transfer in gas-lift reactors operated at elevated pressures. *Chemical Engineering Science*, 54, 5153-5157.
- Li, G.-Q., S.-Z. Yang, Z.-L. Cai i J.-Y. Chen (1995). Mass transfer and hydrodynamics in an airlift reactor with viscous non-Newtonian fluid. *Chinese Journal of Chemical Engineering*, 3, 23-31.
- Lin, C.H., B.S. Fang, C.S. Wu, H.Y. Fang, T.F. Kuo i C.Y. Hu (1976). Oxygen transfer and mixing in a tower cycling fermentor. *Biotechnology and Bioengineering*, 18, 1557-1572.
- Lin, J., M. Han, T. Wang, T. Zhang, J. Wang i Y. Jin (2004). Influence of the gas distributor on the local hydrodynamic behavior of an external loop airlift reactor. *Chemical Engineering Journal*, 102, 51-59.
- Liu, M., T. Zhang, T. Wang, W. Yu i J. Wang (2008). Experimental study and modeling on liquid dispersion in external-loop airlift slurry reactors. *Chemical Engineering Journal*, 139, 523-531.
- Liu, Y., G. He, M. Tan, F. Nie i B. Li (2014). Artificial neural network model for turbulence promoter-assisted crossflow microfiltration of particulate suspensions. *Desalination*, 338, 57-64.
- Livingstone, D.J., D.T. Manallack i I.V. Tetko (1997). Data modelling with neural networks: Advantages and limitations. *Journal of Computer-Aided Molecular Design*, 11, 135-142.
- Luo, L., J. Yuan, P. Xie, J. Sun i W. Guo (2013). Hydrodynamics and mass transfer characteristics in an internal loop airlift reactor with sieve plates. *Chemical Engineering Research and Design*, 91, 2377-2388.
- Maltarollo, V.c.G.a., K.t.M. Honório i A.r.B.F. da Silva (2013). *Applications of Artificial Neural Networks in Chemical Problems. Artificial Neural Networks - Architectures and Applications*. Ed: K. Suzuki.
- Maretto, C. i R. Krishna (1999). Modelling of a bubble column slurry reactor for Fischer–Tropsch synthesis. *Catalysis Today*, 52, 279-289.
- Martín, M., F.J. Montes i M.A. Galán (2009). Physical explanation of the empirical coefficients of gas-liquid mass transfer equations. *Chemical Engineering Science*, 64, 410-425.
- Meng, A.X., G.A. Hill i A.K. Dalai (2002). Hydrodynamic Characteristics in an External Loop Airlift Bioreactor Containing a Spinning Sparger and a Packed Bed. *Industrial and Engineering Chemistry Research*, 41, 2124-2128.

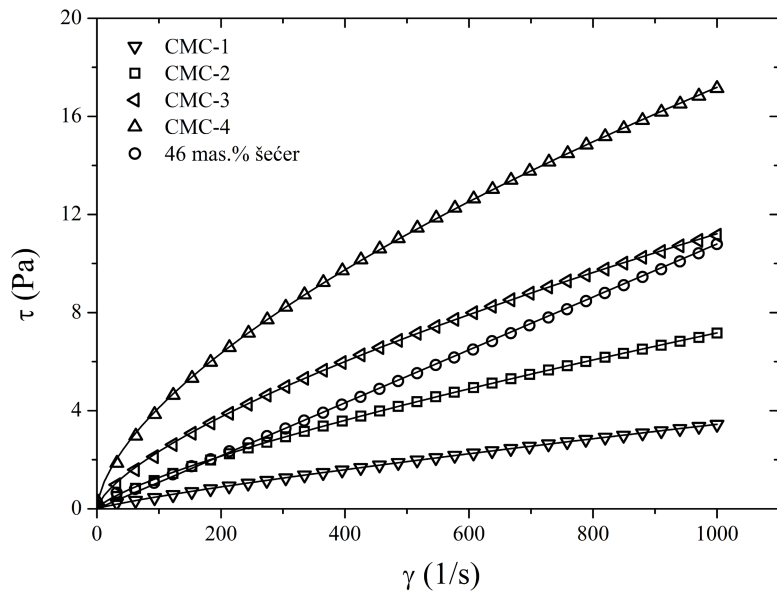
- Merchuk, J.C. (1986). Gas hold-up and liquid velocity in a two-dimensional air lift reactor. *Chemical Engineering Science*, 41, 11-16.
- Merchuk, J.C., S. Yona, M.H. Siegel i A.B. Zvi (1990). On the first-order approximation to the response of dissolved oxygen electrodes for dynamic K_{La} estimation. *Biotechnology and Bioengineering*, 35, 1161-1163.
- Merchuk, J.C. i M. Glutz (1999). Bioreactors: Air-lift Reactors. *Encyclopedia of Bioprocess Technology: Fermentation, Biocatalysis, and Bioseparations*. Ed: M. C. Flickinger and S. W. Drew. New York City, New York, John Wiley & Sons, Inc.: 320-353.
- Milivojević, M.M. (2011). Brzina tečnosti u dvofaznim i trofaznim pneumatskim reaktorima sa spoljašnjom recirkulacijom. Doktorska disertacija, Tehnološko-Metalurški Fakultet, Univerzitet u Beogradu.
- Miyahara, T., H. Hamanaka, T. Umeda i Y. Akagi (1999). Effect of Plate Geometry on Characteristics of Fluid Flow and Mass Transfer in External-Loop Airlift Bubble Column. *Journal of Chemical Engineering of Japan*, 32, 689-695.
- Miyahara, T. i N. Nagatani (2009). Influence of alcohol addition on liquid-phase volumetric mass transfer coefficient in an external-loop airlift reactor with a porous plate. *Journal of Chemical Engineering of Japan*, 42, 713-719.
- Miyahara, T., N. Nagatani, T. Ohnishi i F. Takebe (2011). Liquid-Phase Volumetric Mass Transfer Coefficient for Dilute Alcohol Solution in an External-Loop Airlift Reactor with a Porous Plate (Effect of Pore Size of Porous Plate). *Japanese Journal of Multiphase Flow*, 25, 142-148.
- Mohajerani, M., M. Mehrvar i F. Ein-Mozaffari (2012). Using an external-loop airlift sonophotoreactor to enhance the biodegradability of aqueous sulfadiazine solution. *Separation and Purification Technology*, 90, 173-181.
- Mohanty, K., D. Das i M.N. Biswas (2006). Hydrodynamics of a novel multi-stage external loop airlift reactor. *Chemical Engineering Science*, 61, 4617-4624.
- Mohanty, K., D. Das i M.N. Biswas (2007). Mass transfer characteristics of a novel multi-stage external loop airlift reactor. *Chemical Engineering Journal*, 133, 257-264.
- Morales-Medina, R., R. Pérez-Gálvez, A. Guadix i E.M. Guadix (2016). Artificial neuronal network modeling of the enzymatic hydrolysis of horse mackerel protein using protease mixtures. *Biochemical Engineering Journal*, 105, Part B, 364-370.
- Nikakhtari, H. i G.A. Hill (2005a). Enhanced Oxygen Mass Transfer in an External Loop Airlift Bioreactor Using a Packed Bed. *Industrial and Engineering Chemistry Research*, 44, 1067-1072.
- Nikakhtari, H. i G.A. Hill (2005b). Hydrodynamic and oxygen mass transfer in an external loop airlift bioreactor with a packed bed. *Biochemical Engineering Journal*, 27, 138-145.
- Nishikawa, M., H. Kato i K. Hashimoto (1977). Heat Transfer in Aerated Tower Filled with Non-Newtonian Liquid. *Industrial and Engineering Chemistry Process Design and Development*, 16, 133-137.

- Olden, J.D. i D.A. Jackson (2002). Illuminating the “black box”: a randomization approach for understanding variable contributions in artificial neural networks. *Ecological Modelling*, 154, 135-150.
- Olden, J.D., M.K. Joy i R.G. Death (2004). An accurate comparison of methods for quantifying variable importance in artificial neural networks using simulated data. *Ecological Modelling*, 178, 389-397.
- Philip, J., J.M. Proctor, K. Niranjani i J.F. Davidson (1990). Gas hold-up and liquid circulation in internal loop reactors containing highly viscous newtonian and non-newtonian liquids. *Chemical Engineering Science*, 45, 651-664.
- Pi, K., L. Huang, Z. Li, L. Gao i A.R. Gerson (2014). Oxygen mass transfer characteristics in an internal-loop airlift reactor with preset trumpet-shaped riser. *Asia-Pacific Journal of Chemical Engineering*, 9, 834-844.
- Pollard, D.J., A.P. Ison, P.A. Shamlou i M.D. Lilly (1998). Reactor heterogeneity with *Saccharopolyspora erythraea* airlift fermentations. *Biotechnology and Bioengineering*, 58, 453-463.
- Popović, M. i C.W. Robinson (1984). Estimation of some important design parameters for non-Newtonian liquids in pneumatically-agitated fermenters. *Proceedings of the 34th Canadian Chemical Engineering Congress, Quebec City, Quebec, Canada*.
- Popović, M. i C.W. Robinson (1987a). The specific interfacial area in external-circulation-loop airlifts and a bubble column-I. Aqueous sodium sulphite solution. *Chemical Engineering Science*, 42, 2811-2824.
- Popović, M. i C.W. Robinson (1987b). The specific interfacial area in external-circulation-loop airlifts and a bubble column-II. Carboxymethyl cellulose/sulphite solution. *Chemical Engineering Science*, 42, 2825-2832.
- Popović, M. i C.W. Robinson (1988). External-circulation-loop airlift bioreactors: Study of the liquid circulating velocity in highly viscous non-Newtonian liquids. *Biotechnology and Bioengineering*, 32, 301-312.
- Popovic, M.K. i C.W. Robinson (1989). Mass transfer studies of external-loop airlifts and a bubble column. *AIChE Journal*, 35, 393-405.
- Popović, M.K. i C.W. Robinson (1993). Mixing characteristics of external-loop airlifts: non-Newtonian systems. *Chemical Engineering Science*, 48, 1405-1413.
- Pošarac, D. (1988). Ispitivanje hidrodinamike i prenosa mase u trofaznom reaktoru sa spoljnom recirkulacijom. Doktorska disertacija, Univerzitet u Novom Sadu, Novi Sad.
- Pošarac, D. i D.L. Petrović (1991). Prediction of the gas holdup and liquid recirculation velocity in an external loop airlift reactor. *Journal of the Serbian Chemical Society*, 56, 359-369.
- Räsänen, M., T. Eerikäinen i H. Ojamo (2016). Characterization and hydrodynamics of a novel helix airlift reactor. *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*, 108, 44-57.

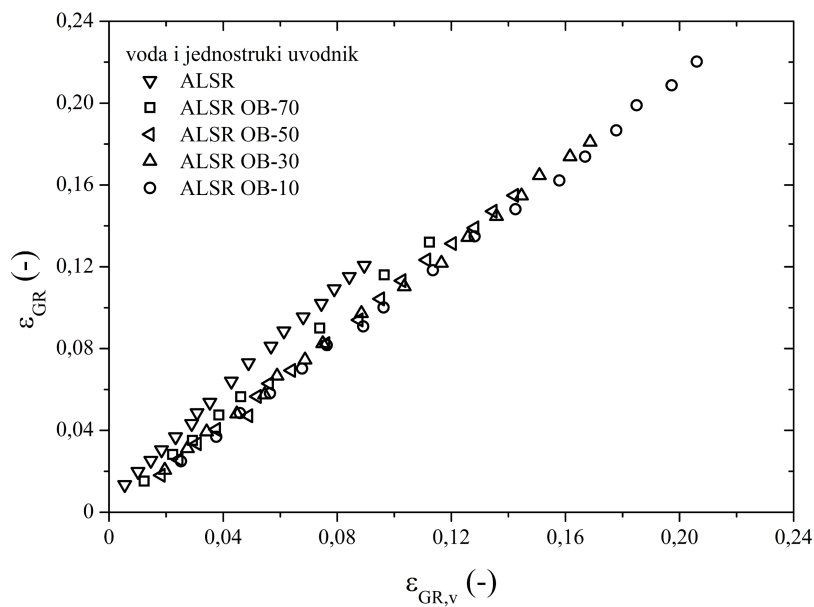
- Rujiruttanakul, Y. i P. Pavasant (2011). Influence of configuration on the performance of external loop airlift contactors. *Chemical Engineering Research and Design*, 89, 2254-2261.
- Russell, A.B., C.R. Thomas i M.D. Lilly (1994). The influence of vessel height and top-section size on the hydrodynamic characteristics of airlift fermentors. *Biotechnology and Bioengineering*, 43, 69-76.
- Saghatoleslami, N., G.H. Vatankhah, H. Karimi i S.H. Noie (2011). Prediction of the overall sieve tray efficiency for a group of hydrocarbons, an artificial neural network approach. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 3, 319-325.
- Sarkar, S., K. Mohanty i B.C. Meikap (2008). Hydrodynamic modeling of a novel multi-stage gas-liquid external loop airlift reactor. *Chemical Engineering Journal*, 145, 69-77.
- Shamlou, P.A., J. Rajarajan i A.P. Ison (1998). Gas holdup, liquid circulation velocity and shear rate in an external loop airlift containing non-Newtonian polymer solutions. *Bioprocess Engineering*, 19, 399-402.
- Siegel, M.H., J.C. Merchuk i K. Schugerl (1986). Air-lift reactor analysis: Interrelationships between riser, downcomer, and gas-liquid separator behavior, including gas recirculation effects. *AIChE Journal*, 32, 1585-1596.
- Siegel, M.H. i C.W. Robinson (1992). Application of airlift gas-liquid-solid reactors in biotechnology. *Chemical Engineering Science*, 47, 3215-3229.
- Šijački, I.M., M.S. Tokić, P.S. Kojić, D.L. Petrović, M.N. Tekić, M.S. Djurić i S.S. Milovančev (2011). Sparger Type Influence on the Hydrodynamics of the Draft Tube Airlift Reactor with Diluted Alcohol Solutions. *Industrial and Engineering Chemistry Research*, 50, 3580-3591.
- Šijački, I.M., M.S. Tokić, P.S. Kojić, D.L. Petrović, M.N. Tekić i N.L. Lukić (2013). Sparger Type Influence on the Volumetric Mass Transfer Coefficient in the Draft Tube Airlift Reactor with Diluted Alcohol Solutions. *Industrial and Engineering Chemistry Research*, 52, 6812-6821.
- Sivasubramanian, V., B.S. NaveenPrasad i M. Velan (2008). Mass transfer studies in an external loop airlift bioreactor for wastewater treatment. *International Conference on Waste Engineering and Management - ICWEM*. Hong Kong, China.
- Snape, J.B., J. Zahradník, M. Fialová i N.H. Thomas (1995). Liquid-phase properties and sparger design effects in an external-loop airlift reactor. *Chemical Engineering Science*, 50, 3175-3186.
- Tekić, M.N., I.M. Šijački, M.S. Tokić, P.S. Kojić, D.L. Petrović, N.L. Lukić i S.S. Popović (2014). Hydrodynamics of a self-agitated draft tube airlift reactor. *Chemical Industry and Chemical Engineering Quarterly*, 20, 59-69.
- Utiger, M., C. Guy, F. Stuber, A.-M. Duquenne i H. Delmas (1999). Local measurements for the study of external loop airlift hydrodynamics. *The Canadian Journal of Chemical Engineering*, 77, 375-382.
- Vandu, C.O. i R. Krishna (2004). Influence of scale on the volumetric mass transfer coefficients in bubble columns. *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*, 43, 575-579.

- Vataji, Đ.N. (1986). Hidrodinamika i prenos mase u barbotажnim kolonama sa nenjutnovskim tečnostima. Doktorska disertacija, Tehnološki fakultet, Univerzitet u Novom Sadu.
- Verlaan, P. (1987). Modelling and characterization of an airlift-loop bioreactor. Doktorska disertacija, Agricultural University, Wageningen.
- Vial, C., S. Poncin, G. Wild i N. Midoux (2002). Experimental and theoretical analysis of the hydrodynamics in the riser of an external loop airlift reactor. *Chemical Engineering Science*, 57, 4745-4762.
- Vial, C., S. Poncin, G. Wild i N. Midoux (2005). Experimental and theoretical analysis of axial dispersion in the liquid phase in external-loop airlift reactors. *Chemical Engineering Science*, 60, 5945-5954.
- Vorapongsathorn, T., P. Wongsuchoto i P. Pavasant (2001). Performance of airlift contactors with baffles. *Chemical Engineering Journal*, 84, 551-556.
- Wang, S., Y. Arimatsu, K. Koumatsu, K. Furumoto, M. Yoshimoto, K. Fukunaga i K. Nakao (2003). Gas holdup, liquid circulating velocity and mass transfer properties in a mini-scale external loop airlift bubble column. *Chemical Engineering Science*, 58, 3353-3360.
- Weiland, P. i U. Onken (1981). Fluid Dynamics and Mass Transfer in an Airlift Fermenter with External Loop. *German Chemical Engineering*, 4, 42-50.
- Weiland, P. (1984). Influence of draft tube diameter on operation behaviour of airlift loop reactors. *German Chemical Engineering*, 7, 374-385.
- Wu, Q., X. Wang, T. Wang, M. Han, Z. Sha i J. Wang (2013). Effect of liquid viscosity on hydrodynamics and bubble behaviour of an external-loop airlift reactor. *The Canadian Journal of Chemical Engineering*, 91, 1957-1963.
- Yazdian, F., S.A. Shojaosadati, M. Nosrati, M. Pesaran Hajiabbas i E. Vasheghani-Farahani (2009). Investigation of gas properties, design, and operational parameters on hydrodynamic characteristics, mass transfer, and biomass production from natural gas in an external airlift loop bioreactor. *Chemical Engineering Science*, 64, 2455-2465.
- Zhang, T., J. Wang, T. Wang, J. Lin i Y. Jin (2005a). Effect of internal on the hydrodynamics in external-loop airlift reactors. *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*, 44, 81-87.
- Zhang, T., T. Wang i J. Wang (2005b). Mathematical modeling of the residence time distribution in loop reactors. *Chemical Engineering and Processing*, 44, 1221-1227.
- Zhang, T., C. Wei, C. Feng i J. Zhu (2012). A novel airlift reactor enhanced by funnel internals and hydrodynamics prediction by the CFD method. *Bioresource Technology*, 104, 600-607.
- Zhao, M., K. Niranjani i J.F. Davidson (1994). Mass transfer to viscous liquids in bubble columns and air-lift reactors: influence of baffles. *Chemical Engineering Science*, 49, 2359-2369.
- Zuber, N. i J.A. Findlay (1965). Average Volumetric Concentration in Two-Phase Flow Systems. *Journal of Heat Transfer*, 87, 453-468.

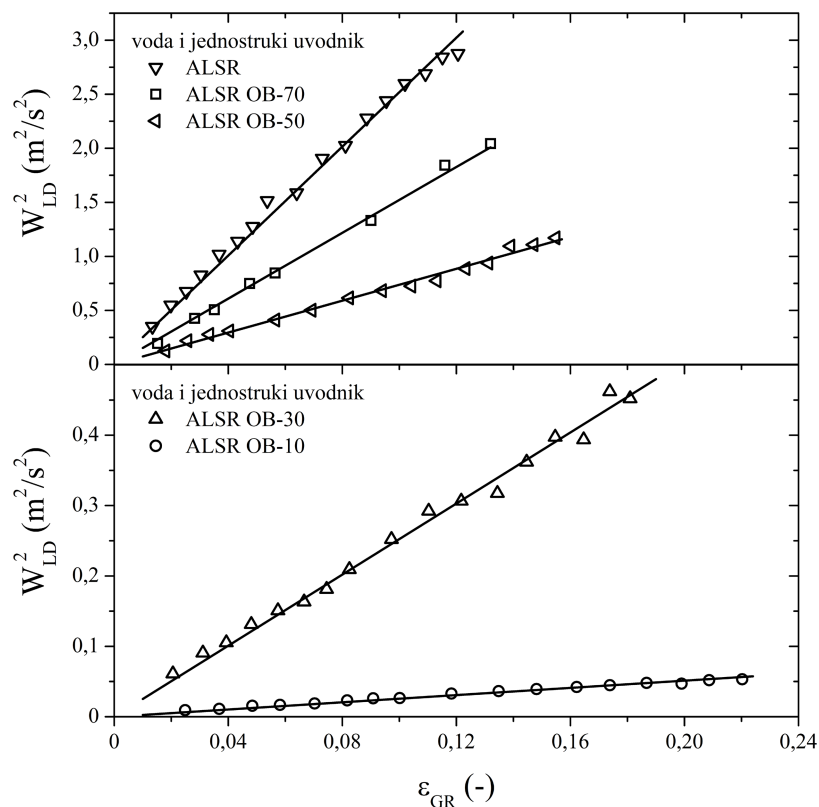
PRILOZI



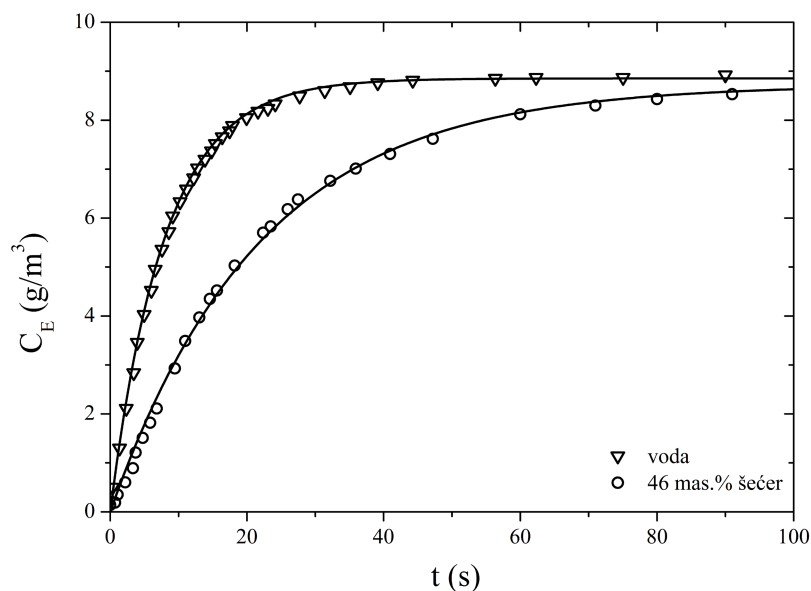
Prilog 1 Zavisnost napona smicanja od brzine smicanja za rastvore šećera i karboksimetilceluloze. Legenda: simboli–eksperimentalne vrednosti; linije–izračunate vrednosti na osnovu stepenog modela (izraz 4.2)



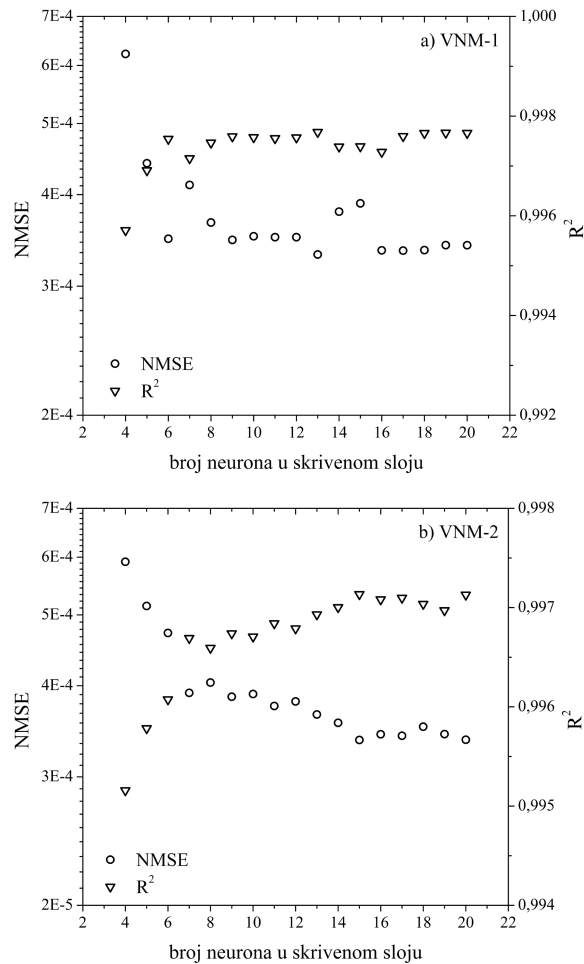
Prilog 2 Zavisnost ε_{GR} od $\varepsilon_{GR,v}$ za sistem vazduh-voda i jednostruki uvodnik



Prilog 3 Zavisnost W_{LD}^2 od ε_{GR} za sistem vazduh-voda i jednostruki uvodnik. Legenda: simboli–eksperimentalne vrednosti; linije–izračunate vrednosti na osnovu izraza 4.11



Prilog 4 Dinamika kiseonične elektrode. Legenda: simboli–eksperimentalne vrednosti; linije–izračunate vrednosti na osnovu modela datog izrazom 4.17



Prilog 5 Uticaj broja neurona u skrivenom sloju na normalizovanu vrednost srednje kvadratne greške i koeficijent determinacije. a) VNM-1) i b) VNM-2.

Prilog 6 Vrednosti parametara dobijenih korelisanjem podataka za zapreminski koeficijent prenosa mase primenom metode koju su predložili Cerri i sar. (2008)

	parametar	ALSR	ALSRI
njutnovski fluidi (izraz 4.19):	β	$1,476 \cdot 10^{-2}$	$1,260 \cdot 10^{-2}$
	φ	0,841	0,794
	θ	-0,306	-0,34
	R^2	0,964	0,998
nenjutnovski fluidi (izraz 4.21):	b	$1,312 \cdot 10^{-2}$	$1,638 \cdot 10^{-2}$
	c	0,861	0,817
	d	-0,419	-0,403
	R^2	0,978	0,997