

Hidrodinamika i prenos mase u ekstrakcionim kolonama tipa Kini

Milan N. Sovilj¹ i Momčilo Đ. Spasojević²

¹Univerzitet u Novom Sadu, Tehnološki fakultet, Bulevar cara Lazara 1, Novi Sad, Srbija

²Univerzitet u Novom Sadu, Fakultet tehničkih nauka, Trg Dositeja Obradovića 6, Novi Sad, Srbija

Izvod

U ovom radu dat je prikaz eksperimentalnih istraživanja vezanih za hidrodinamiku i prenos mase u ekstrakcionim kolonama tipa Kini (Kühni), koja su preuzeta iz literature. Prikazan je ispitivani uticaj radnih parametara na hidrodinamičke karakteristike u odabranim dvofaznim sistemima tečno-tečno. Utvrđeno je da broj obrtaja rotora i međufazni napon značajno utiču na Sauterov srednji prečnik kapi, dok je uticaj protoka kontinualne i dispergovane faze zanemarljiv. Istovremeno, konstatovano je da sadržaj dispergovane faze uglavnom zavisi od broja obrtaja rotora i protoka dispergovane faze. U radu je zaključeno da su empirijske korelacije, preuzete iz literature, adekvatne za proračun Sauterovog srednjeg prečnika kapi i sadržaja dispergovane faze, za odabrane dvofazne sisteme. U isto vreme, pokazano je da se brzina prenosa mase povećava sa povećanjem nivoa povratnog mešanja. Konstatovano je da koeficijent prenosa mase zavisi od broja obrtaja rotora i pravca prenosa mase između faza. Istovremeno, pokazano je da koeficijent prenosa mase relativno malo zavisi od protoka faza. U radu je prikazana i empirijska korelacija za određivanje koeficijenta prenosa mase koja se zasniva na bezdimenzionalnim brojevima.

Keywords: Sauterov srednji prečnik kapi, sadržaj dispergovane faze, brzina obrtanja rotora, povratno mešanje, koeficijent prenosa mase.

Available on-line at the Journal web address: <http://www.ache.org.rs/HI/>

STRUČNI RAD

UDK: 66.023.23:551.511.32:
544.431.11

Hem. Ind. 75 (2) 93-101 (2021)

1. INTRODUCTION

Ekstrakcija tečno-tečno je jedna od najzastupljenijih separacionih operacija koja se primenjuje u postupcima prenosa mase i energije u hemijskoj i procesnoj industriji. Ona se široko primenjuje u industrijskoj proizvodnji goriva u naftnoj industriji, u nuklearnoj industriji, farmaceutskoj industriji, metalurgiji, pri proizvodnji katrana iz uglja, kao i pri razdvajanju ugljovodonika u petrohemijskoj industriji [1]. U ovim industrijskim granama koriste se različiti tipovi ekstrakcionih kolona, kao što su: kolona sa raspršivanjem, kolona sa punjenjem, pulzacione kolone sa punjenjem ili sa perforiranim podovima, Oldšue-Rašton (Oldshue-Ruschton) kolona, rotacioni disk kontaktor (RDK), Šajbelov (Scheibel) ekstraktor, Karova (Karr) kolona, Kinijeva (Kühni) kolona i dr. [2-4]. Jedna od najefikasnijih ekstrakcionih kolona u laboratorijskoj i industrijskoj praksi je kolona tipa Kini. Ona se sastoji od vertikalne cevi u kojoj se u centralnom delu nalazi osovina koja na sebi nosi specijalne turbinske mešalice (rotori), postavljene između perforiranih podova (statori) koji su pričvršćeni na unutrašnju površinu kolone (Slika 1.) [5]. Turbinske mešalice, zahvaljujući svojoj konstrukciji, izazivaju povećanje brzine kapi i međufazne površine unutar svake sekcije koju čine jedan rotor i dva statora. Perforirani podovi omogućavaju stvaranje aksijalnog toka fluida, čime se ostvaruje potpuna separacija faza, što je različito od postupka u rotacionom disk kontaktoru (RDK). Promenom geometrije statora, značajno se utiče na režim strujanja u dvofaznom sistemu unutar kolone. U procesima tečno-tečno najznačajniji hidrodinamički parametri su: sadržaj dispergovane faze, srednji prečnik kapi, brzina plavljenja i relativna brzina faza. Ovi parametri zavise od geometrije ekstrakcione kolone, površinskih brzina faza i fizičkih karakteristika sistema tečno-tečno. Istovremeno, oni se koriste i pri proračunima koeficijenta povratnog mešanja i brzine prenosa mase u dvofaznom sistemu [6]. Poluindustrijska ispitivanja u ekstrakcionim kolonama su relativno skupa i zahtevaju dosta vremena. Međutim, ova istraživanja se ipak koriste kao prvi korak u postupku projektovanja svih ekstrakcionih kolona. U ovakvim uređajima, kinetika ekstrakcije i brzina prenosa mase značajno zavise od međufazne površine. S druge strane,

Corresponding author: Milan N. Sovilj, Tehnološki fakultet, Bulevar cara Lazara 1, 21000 Novi Sad, Srbija

E-mail: miso@uns.ac.rs

Paper received: 4. decembar 2020.

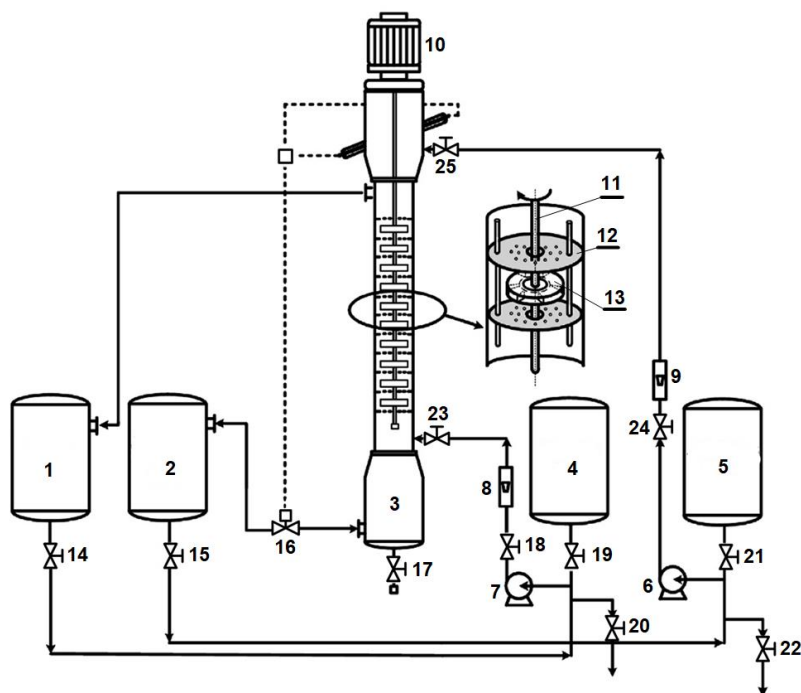
Paper accepted: 31 March 2021.

<https://doi.org/10.2298/HEMIND201204014S>



međufazna površina je osetljiva na kontaminante i zavisi od geometrije kolone, hidrodinamike u koloni, radne visine kolone, protoka tečnih faza, temperature, itd. Poznavanje srednjeg prečnika kapi dispergovane faze i raspodele veličina prečnika kapi duž visine kolone su od fundamentalnog značaja pri dobijanju realističnih parametara kolone (kapacitet i prečnik kolone), uzimajući u obzir da je ekstrakcioni sistem vrlo kompleksan i da se on ne može predvideti samo na osnovu teorije [7,8]. Ekstrakcione kolone tipa Kini projektuju se u širokom opsegu unutrašnjeg prečnika od laboratorijskih kolona (60 mm) do industrijske skale (2,0 m). Unos energije u dvofazni sistem pomoću turbinskih mešalica značajno utiče na prenos mase između faza. Vrlo važan korak u određivanju radne visine ekstrakcione kolone tipa Kini je poznavanje efikasnosti kolone, kao i vrednosti koeficijenta prenosa mase u dvofaznom sistemu. Za ovu svrhu razvijene su odgovarajuće empirijske korelacije, koje su funkcija hidrodinamičkih karakteristika, geometrije kolone i fizičkih svojstava sistema tečno-tečno.

Cilj ovog rada je da prikaže rezultate eksperimentalnih istraživanja hidrodinamičkih karakteristika i prenosa mase u ekstrakcionoj koloni tipa Kini, koja se mogu naći u dostupnoj literaturi. U eksperimentalnim merenjima korišćeni su dvofazni sistemi tečno-tečno u slučajevima sa i bez prenosa mase između faza. Kao radni parametri u toku ekstrakcije tečno-tečno poslužili su: broj obrtaja diskova, protoci dispergovane i kontinualne faze, gustine tečnih sistema i međufazni napon, kao i pravac prenosa mase između faza. Kao hidrodinamički parametri, određivani u eksperimentalnom radu, bili su sadržaj dispergovane faze i srednji prečnik kapi u kolonskom ekstraktoru. U ovom radu je dat pregled empirijskih korelacija, koje su razvijene za slučaj proračunavanja Sauterovog srednjeg prečnika kapi dispergovane faze. S druge strane, prikazani su i postupci neophodni za određivanje koeficijenta prenosa mase u ekstrakcionim kolonama tipa Kini. Istovremeno, razmotrene su i empirijske korelacije koje daju zavisnost koeficijenta prenosa mase od radnih uslova, geometrije kolone i fizičkih karakteristika dvofaznih sistema.



Slika 1. Šematski dijagram poluindustrijske ekstrakcione kolone tipa Kini; osnovna kolona, glavni elementi kolone i dizajn jednog stupnja kolone (Preuzeto i prevedeno iz Asadollahzadeh i sar. [5]). **Legenda:** 1, 4 – rezervoari za organsku fazu; 3 – ekstrakciona kolona; 2, 5 – rezervoari za vodu; 6, 7 – pumpe; 8, 9 – rotameteri; 10 – elektromotor sa reduktorom; 11 – osovina; 12 – perforirani pod (stator); 13 – turbinska mešalica (rotor); 16 – elektromagnetni ventil za regulaciju nivoa; 14, 15, 17-25 – kuglasti ventili.

Figure 1. Scheme of a Kühni extraction column at a pilot scale; extraction column with the main elements and design of an individual plate (Reproduced from Asadollahzadeh et al. [5]). **Legend:** 1, 4 – reservoirs for the organic phase; 3 – extraction column; 2, 5 – reservoirs for the aqueous phase; 6, 7 – pumps; 8, 9 – rotameters; 10 – electric motor with a reducer; 11 – rod; 12 – perforated plate (stator); 13 – turbine mixer (rotor); 16 – solenoid valve for the level regulator; 14, 15, 17-25 – ball valves.

2. HIDRODINAMIKA

2.1. Srednji prečnik kapi

Srednji prečnik kapi dispergovane faze u slučaju kapi eliptičnog oblika, čije su ose minimalna d_1 i maksimalna d_2 , označava se kao ekvivalentni prečnik d_e i izračunava se primenom relacije [9]:

$$d_e = (d_1^2 d_2)^{1/3} \quad (1)$$

S druge strane, zapreminsko-površinski prečnik kapi (Sauterov srednji prečnik kapi), d_{32} , se izračunava iz izraza [10]:

$$d_{32} = \frac{\sum_{i=1}^{NN} n_i d_i^3}{\sum_{i=1}^{NN} n_i d_i^2} \quad (2)$$

gde su: n_i – broj kapi prečnika d_i unutar određenog intervala i ; NN – ukupan broj tačaka.

Srednji prečnik kapi dispergovane faze definiše se, u odsustvu turbulencija ili pri nivou male agitacije u koloni ($Re_R \leq 10\,000$), odnosom između sile uzgona i međufaznog napona, pa se Sauterov srednji prečnik kapi može izraziti sledećom jednačinom [11]:

$$d_{32} = C_1 \left(\frac{\sigma}{\Delta \rho g} \right)^{0,5} \quad (3)$$

gde je C_1 - empirijski parametar čija vrednost zavisi od geometrije kolone, pravca prenosa mase između faza i fizičkih osobina tečnih faza. U rotacionom disk kontaktoru određena je vrednost ovog parametra za kapi n-butil alkohola dispergovane u vodi, koja iznosi $C_1 = 1,3$ [12], dok je u drugoj studiji data vrednost od $C_1 = 0,92$ za pulzacionu kolonu sa perforiranim podovima [13].

U jednoj studiji, ispitivana je hidrodinamika kratke Kini kolone, pod uslovom da nije bilo prenosa mase, koristeći dvofazni sistem tečno-tečno Eksol D-80 (Exxsol D-80)-voda [7]. Eksol D-80 je korišćen kao dispergovana, a voda kao kontinualna faza. Ekstrakciona kolona je imala 5 stupnjeva, unutrašnji prečnik od 15,0 cm, a načinjena je od vertikalne staklene cevi. Svaki stupanj kolone sadržao je turbinsku mešalicu od šest lopatica (prečnik rotora = 8,5 cm, visina rotora = 1,0 cm, pri čemu je vršena tačna kontrola brzine obrtanja rotora). Statori u koloni su imali otvore od 7,0 cm i udeo otvora na perforiranom podu je bio 30 %. U ekstrakcionoj koloni je ostvarivan protivstrujni tok faza, pri čemu su određivani sledeći hidrodinamički parametri: Sauterov srednji prečnik kapi, raspodela veličina kapi i sadržaj dispergovane faze u radnom delu kolone. U radu je korišćena fotografska metoda za određivanje veličina prečnika kapi. Kao radni parametri korišćeni su: brzina obrtanja rotora, protoci obe faze i broj stupnjeva kolone. Utvrđeno je da je funkcija log-normalne verovatnoće gustine adekvatna za modelovanje eksperimentalnih vrednosti za raspodelu prečnika kapi duž kolonskog uređaja. U istom radu [7], pokazano je da se dobijaju kapi manjeg prečnika i znatno ravnomernija raspodela prečnika kapi kada se povećavaju vrednosti broja obrtaja rotora i koristi veći broj stupnjeva kolone. Predložena je, takođe, nova korelaciju za d_{32} , sledećeg oblika [7]:

$$d_{32} = (5,43 \pm 0,35) - (1,38 \pm 0,22) N + [(0,57 \pm 0,15) - (0,10 \pm 0,2) E] V_c N \quad (4)$$

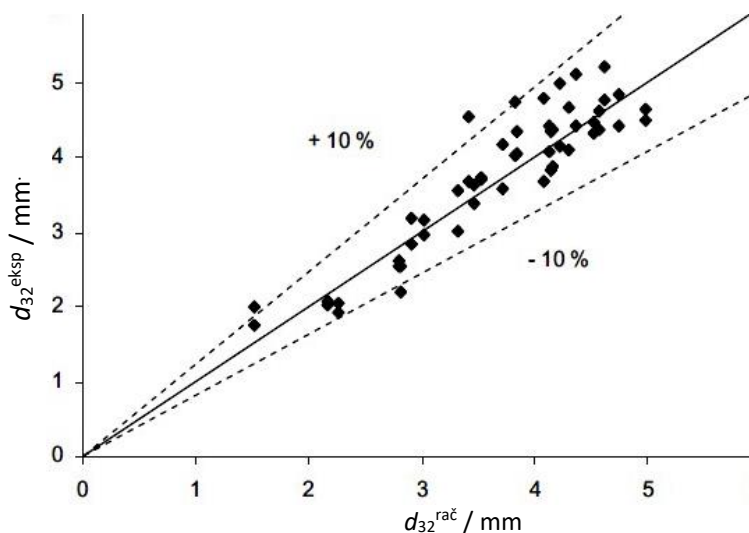
gde su: d_{32} / mm, V_c / L min⁻¹ - protok kontinualne faze i N / o min⁻¹ - broj obrtaja rotora. Ova relacija je primenljiva za sledeće vrednosti promenljivih:

$$1,24 \leq V_c \leq 2,00 / \text{L min}^{-1}, \text{ protok dispergovane faze u opsegu } 1,24 \leq V_d \leq 2,00 / \text{L min}^{-1} \text{ i } 60 \leq N \leq 180 / \text{o min}^{-1}.$$

Na Slici 2. prikazano je poređenje eksperimentalnih podataka za d_{32} u sistemu Eksol D-80-voda i računskih podataka dobijenih pomoću korelacije (4). Sa Slike 2. se može uočiti da se računski podaci za d_{32} nalaze u intervalu od $\pm 10\%$.

Za slučaj prenosa mase iz dispergovane u kontinualnu fazu u jednoj studiji [9] primenjena je poznata univezalna jednačina Kumara i Hartlanda [13] za potrebe proračuna Sauterovog srednjeg prečnika kapi u ekstrakcionoj koloni Kini:

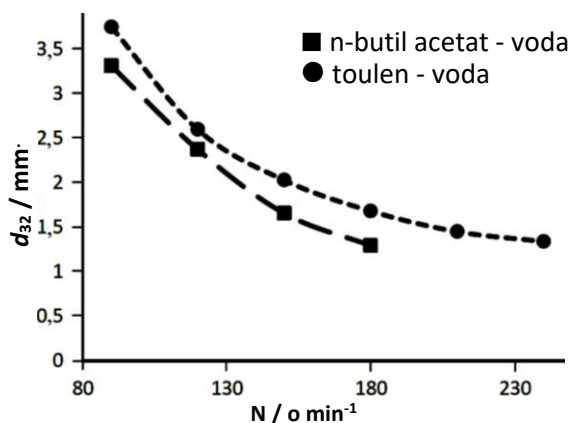
$$d_{32} = \frac{3,05 e^{0,57}}{\left[\frac{1}{\left[2,49 \left(\frac{\sigma}{\Delta \rho g} \right)^{0,5} \right]^2} + \frac{1}{\left[0,52 (\varepsilon_d)^{-0,4} \left(\frac{\sigma}{\rho_c} \right)^{0,6} \right]^2} \right]^{0,5}} \quad (5)$$



Slika 2. Poređenje eksperimentalnih (d_{32}^{eksp}) računskih (d_{32}^{rac}) podataka za Sauterov srednji prečnik kapi u sistemu Eksol D-80-voda (Preuzeto i prevedeno iz Oliveira i sar. [7]).

Figure 2. Comparison of experimental (d_{32}^{eksp}) and calculated (d_{32}^{rac}) data for the Sauter mean drop diameter in the Eksol D-80-water system (Reproduced from Oliveira et al. [7])

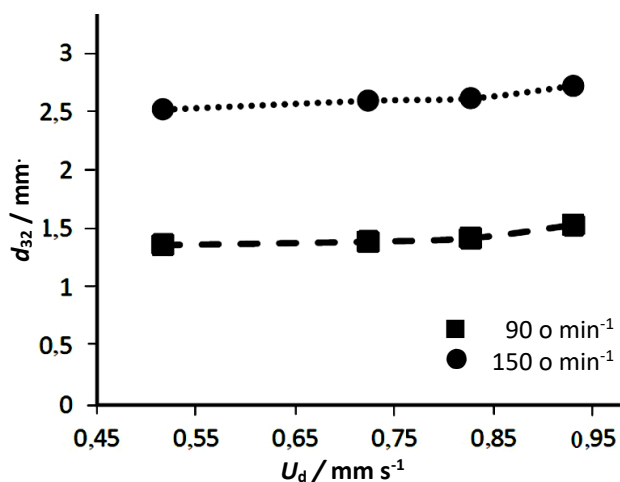
Ispitivanja u ovom radu [9] su vršena u poluindustrijskoj ekstrakcionoj koloni tipa Kini, čije su geometrijske veličine bile: unutrašnji prečnik 11,7 cm, broj stupnjeva 10 i radna visina 75 cm. Dva separatora za odvajanje faza bila su prečnika 17,7 cm, a postavljena su na vrh i na dno kolone, redom. Istovremeno, korišćene su dve pumpe, jedna za kontinualnu a druga za dispergovanu fazu. Međufazna površina je automatski kontrolisana pomoću jednog optičkog senzora. U ovim istraživanjima, u ekstrakcionoj koloni su korišćeni dvofazni sistemi toluen-voda, n-butilacetat-voda i utvrđeno je da se kapi malih prečnika formiraju pri velikim vrednostima broja obrtaja rotora, što je rezultat povećanog razbijanja kapi dispergovane faze (Slika 3.). To znači da Sauterov srednji prečnik kapi značajno zavisi od broja brtaja rotora i međufaznog napona, dok je uticaj protoka dispergovane i kontinualne faze zanemarljiv. Koalescencija kapi pri velikim vrednostima broja obrtaja rotora se povećava zbog povećanja verovatnoće sudara kapi. To znači da se pri tim vrednostima broja obrtaja rotora stvaraju pogodni uslovi za razbijanje kapi, nakon čega se zatim veličina prečnika kapi postepeno stabilizuje.



Slika 3. Uticaj broja obrtaja rotora (N) na Sauterov srednji prečnik kapi (d_{32}), $V_d = V_c = 24 \text{ L h}^{-1}$ (Preuzeto i prevedeno iz Shirvani i sar. [9])

Figure 3. Effect of the rotor speed (N) on the Sauter mean drop size (d_{32}), $V_d = V_c = 24 \text{ L h}^{-1}$ (Reproduced from Shirvani et al. [9])

S druge strane, na Slici 4. može se uočiti da povećanje brzine dispergovane faze relativno malo utiče na Sauterov srednji prečnik kapi, kao i da su srednji prečnici kapi značajno veći pri velikim vrednostima broja obrtaja rotora. Međutim, povećanje brzine dispergovane faze pozitivno utiče na formiranje većih kapi i veće učestalosti koalescencije.



Slika 4. Uticaj brzine dispergovane faze (U_d) na Sauterov srednji prečnik kapi (d_{32}), $V_c = 24 \text{ L h}^{-1}$, N – broj obrtaja rotora (Preuzeto i prevedeno iz Shirvani i sar. [9]) (sistem: *n*-butil acetat-voda).

Figure 4. Effect of the dispersed phase velocity (U_d) on the Sauter mean drop size (d_{32}), $V_c = 24 \text{ L h}^{-1}$, N – the rotor speed (Reproduced from Shirvani et al. [9]) (system: *n*-butyl acetate-water)

U ovom istom istraživanju [9], razvijene su dve rigorozne empirijske korelacije koje su korišćene za predviđanje tačke plavljenja i Sauterovog srednjeg prečnika kapi, kod kojih su odstupanja računskih od eksperimentalnih rezultata bila 5,7 i 7,2 %, redom. Istovremeno, u radu je predložena i empirijska korelacija koja daje zavisnost srednjeg prečnika kapi od geometrije kolone, radnih parametara i fizičkih osobina dvofaznog sistema. Postignuto je dobro slaganje računskih i eksperimentalnih rezultata za sve radne uslove u koloni.

2. 2. Sadržaj dispergovane faze

U literaturi [14] su određene vrednosti sadržaja dispergovane faze u ekstrakcionoj koloni tipa Kini, pri čemu su korišćena tri dvofazna sistema: toluen-voda, *n*-butilacetat-voda i *n*-butanol-voda. Ispitivan je uticaj radnih parametara na hidrodinamičke karakteristike, i to, uticaj pravca prenosa mase rastvorka (aceton) između faza, broja obrtaja rotora i protoka dispergovane i kontinualne faze. U radu je još utvrđeno i da sadržaj dispergovane faze zavisi uglavnom od broja obrtaja rotora, pravca prenosa mase između faza i protoka dispergovane faze. U radu je razvijena univerzalna korelacija koja uključuje Frudov (Froude) broj, brzinu faza, kao i modifikovanu grupu koja sadrži geometrijske karakteristike ekstrakcione kolone za predviđanje sadržaja dispergovane faze. Primenom ove korelacije na dobijene eksperimentalne rezultate kao i rezultate preuzete iz literature, zaključeno je da razvijena korelacija daje zadovoljavajuće predviđanje sadržaja dispergovane faze.

U drugoj studiji [6] eksperimentalno su određivani podaci za sadržaj dispergovane faze i relativnu brzinu faza u poluindustrijskoj ekstrakcionoj koloni tipa Kini, pri čemu su korišćeni dvofazni sistemi toluen-aceton-voda i butil acetat-aceton-voda u slučaju kada nije postojao prenos mase između faza. Utvrđeno je da hidrodinamički parametri zavise od geometrije kolone, radnih parametara (broj obrtaja rotora i brzina kontinualne faze) i fizičkih karakteristika tečnih fluida u sistemu tečno-tečno, pri čemu se ovi parametri koriste u proračunima prenosa mase i protoka faza. Utvrđeno je da se sadržaj dispergovane faze povećava s porastom efekta mešanja u dvofaznom sistemu i odnosa protoka faza.

3. PRENOS MASE

3. 1. Koeficijent prenosa mase

Koncentracioni profili faza u Kini koloni su simulirani pomoću modela povratnog mešanja da bi se dobio stvarni koeficijenti prenosa mase koji su bili u funkciji Reynoldsovog broja za pojedinačnu kap dispergovane faze [15]. Za date uslove međufaznog kontakta, koeficijent prenosa mase je zavisio samo od broja obrtaja rotora odnosno intenziteta mešanja u koloni, što je navelo autore na zaključak da je uvećanje razmera uređaja moguće izvesti samo ukoliko je poznata zavisnost promene povratnog mešanja od prečnika kolone. U sistemu metilizobutil keton (MIBK)-aceton-voda

u ekstrakcionoj koloni tipa Kini (prečnika 7,2 cm, 25 stupnjeva) su eksperimentalno određeni koncentracijski profili obe faze, pri čemu su primenom modela povratnog mešanja numerički računati parametri prenosa mase i povratnog mešanja [16]. Konstatovano je da je povratno mešanje u kontinualnoj fazi relativno veliko, a u dispergovanoj fazi zanemarljivo. Iz ovog se može zaključiti da prisustvo povratnog mešanja u kontinualnoj fazi negativno utiče na brzinu prenosa mase između faza.

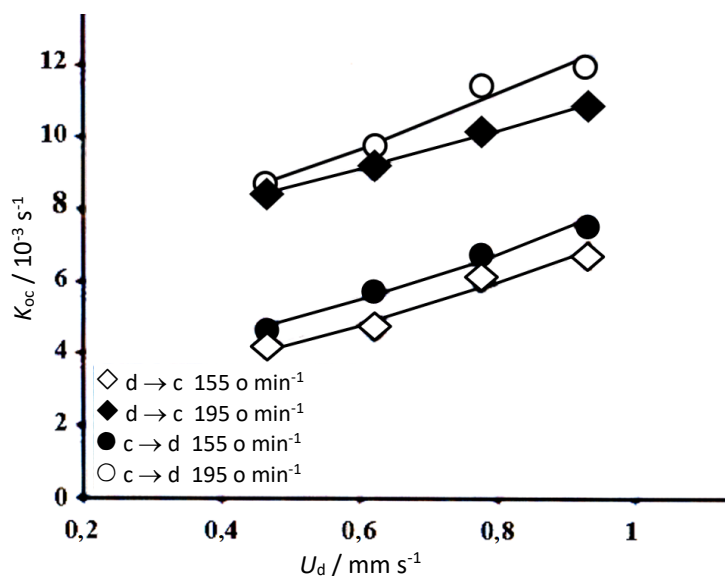
Koeficijenti prenosa mase su određivani u ekstrakcionoj koloni tipa Kini, prečnika 11,7 cm, visine 70 cm, broja stupnjeva 10, prečnika turbinskih mešalica 5 cm, a slobodna površina statora je bila 21,2 %, pri čemu su korišćena dva različita sistema tečno-tečno: toluen-aceton-voda i n-butilacetat-aceton-voda [17]. Na eksperimentalne rezultate koncentracije rastvorene komponente, primenjen je model aksijalne difuzije radi određivanja ukupnog zapreminskog koeficijenta prenosa mase u zavisnosti od radnih parametara (broj obrtaja rotora i protoci kontinualne i dispergovane faze). Iz tako određenih vrednosti ukupnog zapreminskog koeficijenta prenosa mase izračunate su vrednosti faktora poboljšanja prenosa mase koji predstavlja faktor povećanja koeficijenta difuzije dajući efektivni koeficijent difuzije. U radu je razvijena empirijska korelacija za proračun ovog faktora u zavisnosti od Reynoldsovog broja i sadržaja dispergovane faze. Predviđanje vrednosti ukupnog koeficijenta prenosa mase na osnovu ove korelacije primenjene u prethodno predloženoj korelaciji u literaturi [18] je dalo dobro slaganje sa eksperimentalnim rezultatima. Ista ekstrakciona kolona i isti sistem tečno-tečno [17] su primenjeni za određivanje ukupnog zapreminskog koeficijenta prenosa mase u zavisnosti od radnih parametara (broj obrtaja rotora, pravac prenosa mase i protoci obe faze) [5]. I ovde je dobijeno da karakteristike prenosa mase strogo zavise od broja obrtaja rotora i pravca prenosa mase, s tim da postoji relativno mala zavisnost od protoka faza. U radu je razvijena empirijska korelacija za predviđanje ukupnog Šervudovog (Sherwood) broja u kontinualnoj fazi u zavisnosti od sadržaja dispergovane faze, Reynoldsovog broja i pravca prenosa mase. Razvijena empirijska korelacija se zasniva na bezdimenzionalnim brojevima, odnosno data je kao kriterijalna jednačina za prenos mase i može se koristiti kao pogodan alat kod projektovanja ekstrakcionih kolona tipa Kini:

$$\text{Sh}_{oc} = 4,89 + 2,19 \text{Re}(1 - \varepsilon_d)^{0,65} (d \rightarrow c) \quad (6)$$

$$\text{Sh}_{oc} = 5,19 + 5,39 \text{Re}(1 - \varepsilon_d)^{0,46} (d \rightarrow c) \quad (7)$$

pri čemu oznaka $(d \rightarrow c)$ predstavlja pravac prenosa mase iz dispergovane u kontinualnu fazu, dok oznaka $(c \rightarrow d)$ predstavlja pravac prenosa mase iz kontinualne u dispergovanu fazu. Veličina ε_d predstavlja sadržaj dispergovane faze u disperziji.

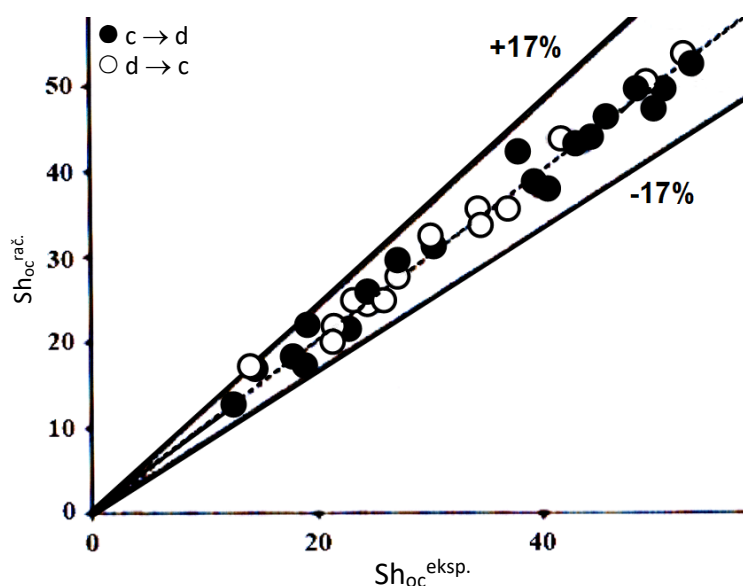
Na slici 5. prikazana je zavisnost ukupnog zapreminskog koeficijenta prenosa mase od brzine dispergovane faze (U_d) za dvofazni sistem toluen-aceton-voda dobijena u ovom radu [5]. Sa slike se može videti da ovaj koeficijent ($K_{oc}a$) raste pri povećanju brzine kontinualne faze (U_d), kao i pri povećanju broja obrtaja rotora (N).



Slika 5. Zavisnost ukupnog zapreminskog koeficijenta prenosa mase ($K_{oc} a$) od brzine dispergovane faze (U_d) za različite vrednosti broja obrtaja rotora (N) i oba pravca prenosa mase za sistem toluen-aceton-voda (Preuzeto i prevedeno iz Asadollahzadeh i sar. [5]). Oznaka $(c \rightarrow d)$ predstavlja pravac prenosa mase iz kontinualne u dispergovanu fazu, dok oznaka $(d \rightarrow c)$ predstavlja pravac prenosa mase iz dispergovane u kontinualnu fazu.

Figure 5. Dependence of the overall volumetric mass transfer coefficient ($K_{oc} a$) on the dispersed phase velocity (U_d) for different rotor speeds (N) for the system toluene-acetone-water (Reproduced from Asadollahzadehet al. [5]). The notation $(c \rightarrow d)$ represents the mass transfer direction from the continuous to the dispersed phase, while the notation $(d \rightarrow c)$ represents the mass transfer direction from the dispersed to the continuous phase.

Slaganje eksperimentalnih i računskih podataka dobijenih pomoću korelacija (6) i (7) prikazano je na Slici 6., pri čemu je relativno odstupanje rezultata bilo 3,75 % [5].



Slika 6. Poređenje eksperimentalnih ($Sh_{oc}^{eksp.}$) i računskih ($Sh_{oc}^{rač.}$) podataka za Šervudov broj, redom, u sistemu toluen-aceton-voda (Preuzeto i prevedeno iz Asadollahzadeh i sar. [5]). Oznaka ($c \rightarrow d$) predstavlja pravac prenosa mase iz kontinualne u dispergovanu fazu, dok oznaka ($d \rightarrow c$) predstavlja pravac prenosa mase iz dispergovane u kontinualnu fazu.

Figure 6. Comparison of experimental ($Sh_{oc}^{eksp.}$) and calculated ($Sh_{oc}^{rač.}$) results for the Sherwood number, respectively, in the toluene-acetone-water system (Reproduced from Asadollahzadeh et al[5]). The notation ($c \rightarrow d$) represents the mass transfer direction from the continuous to the dispersed phase, while the notation ($d \rightarrow c$) represents the mass transfer direction from the dispersed to the continuous phase.

4. ZAKLJUČAK

U ovom radu su prikazani rezultati analize literaturnih podataka o hidrodinamici i prenosu mase u ekstrakcionim kolonama tipa Kini, pri čemu su korišćeni različiti dvofazni sistemi tečno-tečno. Prikazan je uticaj hidrodinamičkih parametara na Sauterov srednji prečnik kapi i sadržaj dispergovane faze u radnom delu kolone. Utvrđeno je da se Sauterov prečnik kapi smanjuje pri povećanju brzine obrtanja rotora, kao i pri povećanju međufaznog napona, dok je nezavisan od protoka faza. S druge strane, konstantovano je da sadržaj dispergovane faze uglavnom zavisi od broja obrtanja rotora i protoka dispergovane faze. Konstatovano je, takođe, da se sadržaj dispergovane faze povećava s porastom efekta mešanja u dvofaznom sistemu i s povećanjem odnosa protoka faza. U literaturi je prikazano nekoliko empirijskih relacija koje se koriste za proračun srednjeg prečnika kapi, a zavise od radnih parametara, geometrije kolone i fizičkih karakteristika dvofaznog sistema. Predložene empirijske korelacije, preuzete iz literature, se mogu koristiti za predviđanje konačne vrednosti Sauterovog srednjeg prečnika i maksimalnog kapaciteta kolone. Pokazano je da koeficijent prenosa mase zavisi od broja obrtanja rotora i pravca prenosa mase, kao i od veličine povratnog mešanja, koje je funkciji prečnika kolone. S druge strane, koeficijent prenosa mase relativno malo zavisi od protoka faza. U literaturi je predložena empirijska kriterijalna jednačina za određivanje koeficijenta prenosa mase, koja se zasnivana bezdimenzionalnim brojevima i može se koristiti kao pogodan alat kod predskazivanja koeficijenta prenosa mase i projektovanja ekstrakcionih kolon tipa Kini.

Poznavanje vrednosti hidrodinamičkih parametara i karakteristika prenosa mase u ekstrakcionim kolonama tipa Kini je od interesa za projektovanje ovih kolona. Proučavanje naučnih radova iz literature, koji su prikazani i kritički analizirani u ovom radu, a odnose se na određivanje nekih hidrodinamičkih parametara i koeficijenta prenosa mase, može biti od značaja istraživačima koji se bave projektovanjem i dizajnom kolonskih ekstraktora ovog tipa.

Lista oznaka

$a / \text{m}^2 \text{m}^{-3}$	- međufazna površina
C_1	- empirijski parametar u jednačini (3)
c	- kontinualna faza
D_c / m	- prečnik kolone
D_s / m	- prečnik otvora statora
d	- dispergovana faza
d_e / m	- ekvivalentni prečnik
d_i / m	- srednji prečnik kapi u određenom intervalu i
$d_{1, d_2} / \text{m}$	- dužina minimalne i maksimalne ose eliptične kapi, redom
d_{32} / m	- Sauterov srednji prečnik kapi
E	- broj stupnjeva u koloni
$E_c / \text{m}^2 \text{s}^{-1}$	- koeficijent molekulske difuzije
Fr	- Frudov (Froude) broj, $Fr = U_c^2 / d_{32}g$
e	- slobodna površina statora, $e = (D_s / D_c)^2$
$K_{oc} / \text{m} \text{s}^{-1}$	- ukupan koeficijent prenosa mase
$K_{oc} a / \text{s}^{-1}$	- ukupan zapreminski koeficijent prenosa mase
$N / \text{o min}^{-1}$	- broj obrtaja mešalice (rotora)
NN	- ukupan broj tačaka
Re	- Rejnoldsov (Reynolds) broj za kontinualnu fazu, $Re = U_s d_{32} r_c / \mu_c$
Re_R	- Rejnoldsov broj baziran na brzini obrtanja rotora
$U_c, U_d / \text{m} \text{s}^{-1}$	- brzina kontinualne i dispergovane faze, redom
$U_s / \text{m} \text{s}^{-1}$	- relativna brzina faza, $U_s = (U_d / \varepsilon_d) + (U_c / (1 - \varepsilon_d))$
Sh_{oc}	- ukupan Šervudov (Sherwood) broj za kontinualnu fazu, $Sh_{oc} = K_{oc} d_{32} / E_c$
$V_c, V_d / \text{m}^3 \text{s}^{-1}$	- protoci kontinualne i dispergovane faze, redom

Oznake grčkim slovima

ε_d	- sadržaj dispergovane faze u disperziji	$\rho_c / \text{kg} \text{m}^{-3}$	- gustina kontinualne faze
$\rho_d / \text{kg} \text{m}^{-3}$	- gustina dispergovane faze	$\Delta\rho / \text{kg} \text{m}^{-3}$	- razlika gustina, $\Delta\rho = (\rho_c - \rho_d)$
$\mu_c / \text{Pa s}$	- dinamička viskoznost kontinualne faze	$\sigma / \text{N} \text{m}^{-1}$	- međufazni napon.

REFERENCES

- [1] Perry RH, Green DW. (eds.). *Perry's Chemical Engineers Handbook*, 7th ed., McGraw-Hill, Inc., New York, NY: 1999, pp. 15-37 ÷ 15-47.
- [2] Pratt HRC, Stevens GW. in *Science and Practice of Liquid-Liquid Extraction*, Thornton, JD. ed., Oxford University Press, London: 1992, pp. 492-589.
- [3] Simons AJF. in *Handbook of Solvent Extraction*, Lo, TC, Baird, MHI, Hanson, C, eds., John Wiley & Sons, New York, NY: 1983, pp. 343-353.
- [4] Sovilj MN. *Difuzione operacije*, Univerzitet u Novom Sadu, Tehnološki fakultet, Novi Sad: 2004, str. 172-193 (in Serbian).
- [5] Asadollahzadeh M, Torkaman R, Torab-Mostaedi M, Experimental determination of continuous phase overall mass transfer coefficients case study: Kühni extraction column. *Iran J Chem Eng.* 2017; 36 (5): 149-161.
- [6] Arab E, Ghaemi A. Experimental study of holdup and slip velocity in a Kühni extraction column. *Farayandno*, 2017; 12 (58): 70-85.
- [7] Oliveira NS, Morales Silva D, Gondim MPC, Borges Mansur MA. A study of the drop size distributions and hold-up in short Kühni columns. *Brazil J Chem Eng.* 2008; 25 (4): 729 – 741.
- [8] Pietsch W, Pilhofer T. Calculation of the drop size in pulsed sieve-plate extraction columns. *Chem Eng Sci.* 1984; 39 (6): 961-965.
- [9] Shirvani AR, Ghaemi A, Torab-Mostaedi M. Experimental investigation of flooding and drop size in a Kühni extraction column. *IJE Trans C.: Aspects.* 2016; 29 (3): 288-296.
- [10] Usman MR, Sattar H, Hussain SN, Muhammad H, Asghar A, Afzal W. Drop size in a liquid pulsed sieve-plate extraction column. *Brazil J Chem Eng.* 2009; 26(4): 677-683.
- [11] Bailes PJ, Gledhill J, Godfrey J C, Slater M J. Hydrodynamic behavior of packed, rotating disc and Kühni liquid-liquid extraction columns. *Chem Eng Res Des.* 1986; 64: 43-55.
- [12] Chang-Kakoti DK, Fei W-Y, Godfrey J C, Slater M J. Drop sizes and distributions in rotating disc contactors used for liquid-liquid extraction. *J Sep Process Technol.* 1985; 6: 40- 48.

- [13] Kumar A, Hartland S. Unified correlations for the prediction of drop size in liquid-liquid extraction columns. *Ind Eng Chem Res.* 1996; 35 (8): 2682-2695.
- [14] Asadollahzadeh M, Torab-Mostaedi M, Shahhosseini S, Ghaemi A, Torkaman R. Unified new correlation for prediction of dispersed phase holdup in agitated extraction columns. *Separ Purif Technol.* 2016; 158: 275-285.
- [15] Kumar A, Hartland S. Mass transfer in a Kühni extraction column. *Ind Eng Chem Res.* 1988; 27 (7): 1198-1203.
- [16] Dongaonkar KR, Pratt HRC, Stevens GW. Mass transfer and axial dispersion in a Kühni extraction column. *AIChE J.* 1991; 37 (5): 694-704.
- [17] Hemmati A, Torab-Mostaedi M, Asadollahzadeh M. Mass transfer coefficients in a Kühni extraction column. *Chem Eng Res Des.* 2015; 93: 747-754.
- [18] Johnson AI, Hamielec AE. Mass transfer inside drops. *AIChE J.* 1960; 6: 145-149.

ABSTRACT

Hydrodynamics and mass transfer in Kühni extraction columns

Milan N. Sovilj¹ i Momčilo Đ. Spasojević²

¹University of Novi Sad, Faculty of Technology, Bulevar Cara Lazara 1, Novi Sad, Serbia

²University of Novi Sad, Faculty of Technical Sciences, Trg Dositeja Obradovića 6, Novi Sad, Serbia

(Technical paper)

This work provides a review of hydrodynamic characteristics and mass transfer in the Kühni extraction columns. The experiments, as reported in the literature, were performed in the presence and absence of mass transfer. The results showed that the Sauter mean drop diameter was strongly affected by the rotor speed and interfacial tension, whereas the effects of the dispersed and continuous velocities were negligible. Empirical correlations for the Sauter mean drop diameter, taken from the literature, were discussed. It was experimentally determined that the dispersed-phase holdup depended to a great extent on the rotor speed, mass transfer direction between the phases, physical characteristics of fluids in the liquid-liquid system, and the dispersed-phase flowrate whereas it increased with the increase in mixing in the two-phase system and the ratio of phase flowrates. On the other hand, it has been shown that the mass transfer rate increases with increasing the level of back mixing. It was found that the mass transfer coefficient depends on the rotor speed and the direction of mass transfer between the phases. At the same time, it has been shown that the mass transfer coefficient depends relatively little on the phase flowrates. An empirical correlation was proposed for prediction of the overall mass transfer coefficient based on dimensionless numbers. Also, novel empirical correlations for prediction of the Sherwood number in the continuous phase were presented based on the dispersed-phase holdup, Reynolds number, and mass transfer direction between the phases. Empirical correlations based on dimensionless numbers can be considered as a useful tool for the design of the Kühni columns.

Keywords: Sauter mean drop diameter, dispersed-phase holdup, rotor speed, axial mixing, mass transfer.