

Hidrodinamika pulzacionih ekstrakcionih kolona sa perforiranim podovima

Milan N. Sovilj¹ i Momčilo Đ. Spasojević²

¹Univerzitet u Novom Sadu, Tehnološki fakultet, Bulevar cara Lazara 1, 21000 Novi Sad, Srbija

²Univerzitet u Novom Sadu, Fakultet tehničkih nauka, Trg Dositeja Obradovića 6, 21000 Novi Sad, Srbija

Izvod

U ovom radu se prikazuje pregled istraživanja vezanih za hidrodinamiku pulzacionih ekstrakcionih kolona sa perforiranim podovima (PEPP kolone). Analizirane su eksperimentalne vrednosti nekih hidrodinamičkih parametara, preuzete iz literature, kao što su srednji prečnik kapi, brzina plavljenja, sadržaj dispergovane faze, relativna brzina, kao i koeficijent aksijalne disperzije u sistemima tečno-tečno u ovim ekstrakcionim kolonama. Ovi parametri su značajni pri određivanju hidrodinamike i prenosa mase u ekstrakcionim kolonama, koji su važni u postupku razvoja i poboljšanja strategija u projektovanju pulzacionih ekstrakcionih kolona sa perforiranim podovima kada se pri ekstrakciji uvode novi sistemi tečno-tečno. Poznavanje raspodele i veličine prečnika kapi dispergovane faze su neophodni parametri pri određivanju koeficijenta prenosa mase u ekstrakcionoj koloni, kao i pri merenju efikasnosti same kolone. U ovom radu dat je i pregled istraživanja koja se odnose na uticaj geometrijskih i operativnih parametara kolonskog ekstraktora na osnovne hidrodinamičke karakteristike ekstrakcione kolone. U eksperimentalnim merenjima u literaturi su uočena tri radna režima u pulzacionim ekstrakcionim kolonama, definisana kao: režim mešača-odvajanja, disperzioni režim i emulzioni režim. U radu je analizirana i primena nekih od najznačajnijih empirijskih korelacija za određivanje hidrodinamičkih parametara PEPP kolona.

Ključne reči: srednji prečnik kapi, brzina plavljenja, sadržaj dispergovane i kontinualne faze, koeficijent aksijalne disperzije, relativna brzina.

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

STRUČNI RAD

UDK:

66.061.35+66.023.23:551.511.32

Hem. Ind. 74(1) 1-14 (2020)

1. UVOD

Ekstrakcija tečno-tečno je jedna od najznačajnijih separacionih operacija koja se intenzivno koristi u hemijskim procesnim industrijama [1]. U ovim industrijama značajno mesto zauzimaju ekstrakcione kolone sa raspršivanjem, kolone sa punjenjem, pulzacione kolone sa punjenjem, kolone sa perforiranim podovima, kao i druge vrste kolona [2-4]. Iz mnogo razloga, jedna od najčešće korišćenih kolona u praksi je pulzaciona ekstrakcionna kolona sa perforiranim podovima [5]. Mada ove kolone zahtevaju znatno veći unos energije od drugih ekstrakcionih kolona, one ostvaruju veću efikasnost razdvajanja, jednostavne su za upravljanje, rade sa velikim protocima obe faze, pri čemu se znatno redukuju kontaminacije na međufaznoj površini [6]. S druge strane, PEPP kolona je relativno jeftina, potrošnja rastvarača je znatno manja u odnosu na druge ekstrakcione kolone, a zahteva i znatno manji radni prostor u poređenju sa npr. ekstraktorima tipa mešač-odvajanja. Ove ekstrakcione kolone se intenzivno koriste u ekstrakciji radioaktivnih kontaminanata iz rastvora, pošto one nemaju pokretnih unutrašnjih delova i relativno su malih dimenzija [7,8]. PEPP kolone pokazuju jasnu prednost u poređenju sa drugim mehaničkim kontaktorima, naročito u procesima u kojima su prisutni korozija ili radioaktivni rastvori, pošto je pulzaciona jedinica izmeštena izvan ekstrakcione kolone. Kontaktna površina u PPEP koloni se ostvaruje na perforiranim podovima, mada obe faze (lakša i teža) prolaze kroz iste otvore na podu. Pulzacije u kontinualnoj fazi ekstrakcione kolone se realizuju pomoću spoljnog sistema (klipna pumpa-pulzator ili

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

E-mail: miso@uns.ac.rs

Rad primljen: 11. oktobar 2019.

Rad prihvaćen: 28. januar 2020.

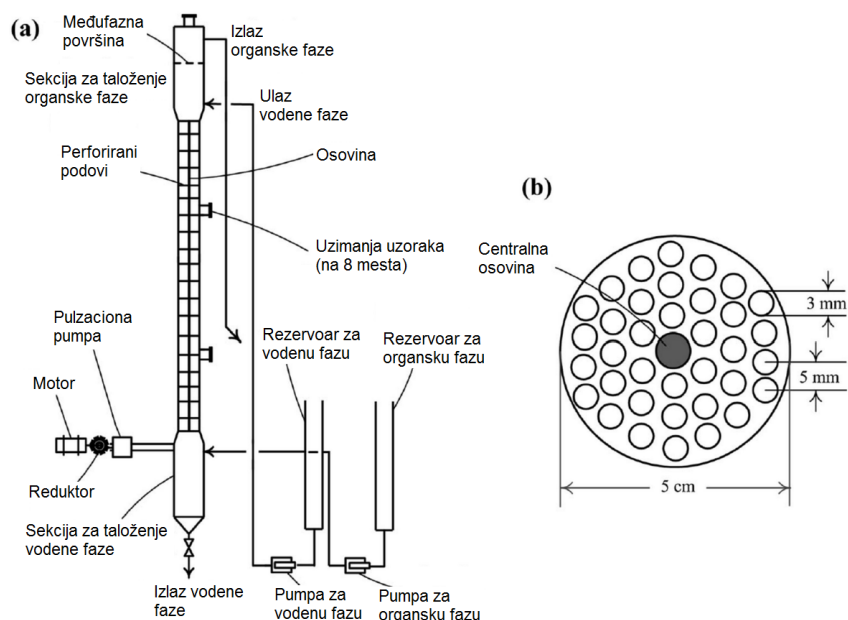
<https://doi.org/10.2298/HEMIND191011003S>



inertni gas), dok su unutrašnji elementi kolone (perforirani podovi) montirani na osovini i zajedno s njom ostaju nepokretni tokom rada uređaja. Na ovaj način kontinualna faza pulzira pri relativno visokoj frekvenciji od $0,5$ do $4,0 \text{ s}^{-1}$ i niskoj pulzacionoj amplitudi od 5 do 25 mm [6,7]. Pulzacije se ostvaruju u težoj i lakšoj fazi naizmenično pri čemu se one kreću kroz otvore na podovima koji nemaju prelivne cevi.

Cilj ovog rada je da prikaže pregled poređenja eksperimentalnih rezultata iz literature koji se odnose na ispitivanje uticaja pojedinih hidrodinamičkih parametara, geometrijskih veličina i radnih parametara na efikasnost rada PEPP kolona. Od hidrodinamičkih parametara upoređivani su podaci za srednji prečnik kapi dispergovane faze (d), sadržaj dispergovane faze (ε_d), podaci za brzinu plavljenja, relativnu brzinu, kao i koeficijent aksijalne disperzije (E_c) koji zavise od radnih parametara i geometrije ekstrakcione kolone. Kao geometrijske veličine posmatrani su prečnik otvora (d_N) na perforiranom podu, ukupna slobodna površina otvora na podu, kao i odnos površine otvora i ukupne površine samog poda. Konačno, kao radni parametri uzeti su u obzir: brzina pulzacije (proizvod amplitude i frekvencije pulzacije, (Af)), kao i površinske brzine kontinualne (U_c) i dispergovane faze (U_d). Ispitivan je uticaj površinskih brzina faza na vrednost koeficijenta aksijalne disperzije u PEPP kolonama.

Tipičan izgled šeme pulzacione ekstrakcione kolone sa perforiranim podovima prikazan je na slici 1.



Slika 1. Šematski prikaz poluindustrijske pulzacione ekstrakcione kolone sa perforiranim podovima; a) osnovna ekstrakciona kolona sa elementima, b) dizajn pojedinačnog poda (Preuzeto iz Khawaja i sar. [8])

Figure 1. Scheme of a pilot scale pulsed sieve-plate extraction column; a) basic extraction column with the main elements, b) design of the individual plate (Reprinted with permission from Khawaja et al. [8])

2. 1. BRZINA PLAVLJENJA I SREDNJI PREČNIK KAPI

Pulzacije tečnosti u ekstrakcionoj koloni se ostvaruju na dva načina. U prvom slučaju, klipna pumpa-pulzator je postavljena pri dnu ekstraktora i direktno potiskuje tečni sistem, koji se nalazi u koloni, pri čemu se u toku rada mogu menjati frekvencija pulzacije (f) i amplituda pulzacije (A), koja je jednaka dužini hoda klipa u cilindru pumpe. U drugom slučaju, u radni deo ekstrakcione kolone uvodi se inertan gas, što izaziva pulzacije fluida. Promena frekvencije pulzacije pri uvođenju inertnog gasa u kolonu izaziva periodične pulzacije tečnih fluida, što znači da protok gasa može varirati tokom rada ekstrakcione kolone. Dizajn industrijske PEPP kolone zavisi od rezultata testa koji se izvodi na poluindustrijskoj ekstrakcionoj koloni. To znači da optimalan dizajn ekstrakcione kolone zahteva dobro poznavanje hidrodinamike i prenosa mase u ispitivanom sistemu tečno-tečno. U cilju intenziviranja prenosa mase između faza u osnovnom procesu u kome se ostvaruje porast, regeneracija i obnavljanje međufazne površine, podrazumeva se da dolazi do kontinualnog dispergovanja lakše faze u kapi na perforiranom podu. Obe faze se intenzivno mešaju kao rezultat

pulzacija unutar ekstrakcione kolone. Variranje amplitude pulzacije i/ili frekvencije pulzacije dovodi do tečnog sistema sa optimalnom raspodelom kapi dispergovane faze.

Plavljenje u protivstrujnom pulzacionom ekstraktoru predstavlja uslove protoka fluida pri kojima odgovarajući protok dispergovane (lakše) faze, koja struji naviše kroz kolonu, blokira protok kontinualne (teže) faze na mestu njenog ulaska na vrh kolone (uz konstantnu vrednost brzine pulzacije) i usmerava ga tako da on ističe kroz otvor predviđen za izlaz dispergovane faze [9]. Tačka plavljenja se određuje indirektnim merenjem sadržaja dispergovane faze pomoću razlike pritisaka u koloni, što je opisano u radu [10]. Pre postupka određivanja tačke plavljenja u jednom eksperimentu dve tečne faze se dovode u kontakt u kolonskom ekstraktoru, pri čemu se ostvaruje njihovo međusobno zasićenje. Tačka plavljenja se određuje tako što se dovodi protok kontinualne faze do željenog nivoa i postepeno povećava protok dispergovane faze, dok se ne postigne zadati nivo. U tom trenutku se očitava razlika pritisaka između dna i vrha kolone. Nakon toga protok dispergovane faze se dalje povećava do njegove nove vrednosti, pri kojoj dolazi do stabilne (konstantne) vrednosti razlike pritisaka u koloni, što jasno signalizira da je došlo do plavljenja u koloni. Zbir brzina kontinualne i dispergovane faze u tački plavljenja predstavlja brzinu plavljenja. U trenutku postizanja tačke plavljenja naglo se zaustavljaju ulazi i izlazi obe faze, pri čemu dispergovana faza koalescira na međufaznoj površini. Merenjem promene nivoa međufazne površine određuje se sadržaj dispergovane faze u koloni. Postupak određivanja tačke plavljenja je vrlo sličan i na primeru pulzacione ekstrakcione kolone sa perforiranim podovima. Brzina plavljenja se obično računa iz empirijskih korelacija, što je prikazano u radu [9] na primeru rada pulzacione ekstrakcione kolone sa punjenjem. Empirijske korelacije se uglavnom zasnivaju na konceptu tzv. karakteristične brzine (U_0). Karakteristična brzina se izvodi iz modela za proračun sadržaja dispergovane faze u disperziji, koji se zasniva na pristupu primene relativne brzine (brzine klizanja).

U istraživanju [9] su razvijene empirijske korelacije i nomogrami za definisanje brzine plavljenja pri maksimalnom kapacitetu kolone. Jedna od prikazanih korelacija je data izrazom:

$$\frac{(U_c + U_d)\mu_c}{\sigma} = b_0 \left(\frac{U_d}{U_c}\right)^{b_1} \left(\frac{\Delta\rho}{\rho_c}\right)^{b_2} \left(\frac{\Psi \mu_c^5}{\rho_c \sigma^4}\right)^{b_3} \left(\frac{d\sigma\rho_c}{\mu_c^2}\right)^{b_4} \left(\frac{D}{d_0}\right)^{b_5} \left(\frac{g\mu_c^4}{\rho_c \sigma^3}\right)^{b_6} \left(\frac{\mu_d}{\mu_c}\right)^{b_7} \quad (1)$$

gde je Ψ funkcija snage. Jednačina (1) se može transformisati u logaritamski oblik i koristeći regresionu analizu moguće je dobiti vrednosti koeficijenta i eksponenata na bazi raspoloživih eksperimentalnih podataka. U radu [9] su opisanim postupkom na bazi korišćenja anglosaksonskih jedinica za pojedine fizičke veličine dobijene sledeće vrednosti koeficijenata i eksponenata: $b_0 = 0,527$; $b_1 = -0,014$; $b_2 = 0,63$; $b_3 = -0,207$; $b_4 = 0,458$; $b_5 = 0$; $b_6 = 0,81$ i $b_7 = -0,20$. Ukupna brzina plavljenja (U_{cd}) se određuje tako da je nezavisna od prečnika ekstrakcione kolone.

Relativna brzina (U_s) je definisana prvenstveno za ekstrakcionu kolonu sa raspršivanjem kao osnovni hidrodinamički parametar za protivstrujni tok tečnih faza, što je predstavljeno sledećom jednačinom [11]:

$$U_s = \frac{U_d}{\varepsilon_d} + \frac{U_c}{1 - \varepsilon_d} \quad (2)$$

Koncept karakteristične brzine je uveden u radu [12] za ekstrakcione kolone sa punjenjem, a predstavljen je sledećom jednačinom:

$$U_s = \frac{U_d}{e\varepsilon_d} + \frac{U_c}{e(1 - \varepsilon_d)} = U_0(1 - \varepsilon_d) \quad (3)$$

pri čemu je e – udeo šupljina koje ispunjavaju punjenje u koloni. Za pulzacione ekstrakcione kolone sa perforiranim podovima može se smatrati da je $e = 1$. U tački plavljenja se brzine pojedinačnih faza dobijaju diferenciranjem jednačine (3) s obzirom na sadržaj dispergovane faze u toj tački (ε_f), pri čemu se brzine kontinualne faze (U_c) i dispergovane faze (U_d) posmatraju kao zavisno promenljive [10]

$$\left(\frac{dU_d}{d\varepsilon_d}\right)_{U_c} = 0 \Rightarrow U_{d,f} = 2eU_0(1 - \varepsilon_f)\varepsilon_f^2 \quad (4)$$

$$\left(\frac{dU_d}{d\varepsilon_d} \right)_{U_c} = 0 \Rightarrow U_{c,f} = eU_0(1 - 2\varepsilon_f)(1 - \varepsilon_f)^2 \quad (5)$$

gde je ε_f – granična vrednost sadržaja dispergovane faze u tački plavljenja. Granična vrednost sadržaja dispergovane faze se dobija rešavanjem jednačina (4) i (5), uz uvođenje konstantne veličine, $R = U_d / U_c$:

$$\varepsilon_f = \frac{(R^2 + 8R)^{0.5} - 3R}{4(1 - R)} \quad (6)$$

Brzina dispergovane faze kroz otvor na podu, na kojem dispergovana i kontinualna faza dolaze u kontakt, može se dosta precizno proračunati. Kumar i Hartland [13] su razvili dve poboljšane korelacije koje su dale dobro slaganje računskih i eksperimentalnih podataka za srednji prečnik kapi, uzimajući u obzir eksperimentalne podatke za više dvofaznih sistema iz nekoliko literaturnih izvora, pri čemu je korišćena ekstrakciona kolona sa raspršivanjem. Slaganje računskih i eksperimentalnih rezultata za srednji prečnik kapi, izraženo kao srednje apsolutno relativno odstupanje (SARO), iznosilo je od 9,7 %. Ova veličina se može redukovati na 7,3 % ako se koriste dva regiona za vrednost brzine dispergovane faze razdvojena kritičnim prečnikom kapi. Navedene korelacije se mogu izraziti na sledeći način [13]:

$$d = d_0 Eo^{-0.4} \left[2,13 \left(\frac{\Delta\rho}{\rho_d} \right)^{0.87} + e^{-0,13Fr} \right] \quad Eo < 0,4 \quad (7)$$

$$d = d_0 Eo^{-0,42} \left[1,24 + e^{-Fr^{0,42}} \right] \quad Eo \geq 0,4 \quad (8)$$

gde Eo označava Etvosov (Eötvös) broj a Fr je Frudov (Froude) broj. Za brzine dispergovane faze ispod vrednosti od 10 mm s^{-1} prečnik kapi se može uglavnom odrediti pomoću jedne od dve odgovarajuće jednačine (7) ili (8), koje se u nekim slučajevima mogu i proširiti [13]. U ovim primerima proračunate vrednosti brzine kapi su se dobro slagale sa eksperimentalnim vrednostima [13]. Za brzine kapi veće od 10 mm s^{-1} formirane kapi dispergovane faze na podu nisu bile uniformne.

U jednom istraživanju [14] korišćen je sistem kerozin-benzoeva kiselina-voda u PEPP koloni čiji je prečnik bio 5 cm sa 80 perforiranih podova, pri čemu je svaki pod imao 36 otvora prečnika 3 mm, a slobodna površina otvora je bila 13,5 %. Primenjena frekvencija pulzacije je bila u opsegu $(1,1-7,7) \text{ s}^{-1}$, a amplituda pulzacije je bila konstantna i iznosila je 20 mm. Uticaj brzine pulzacije (Af) na Sauterov srednji prečnik kapi dispergovane faze (d_{32}) je prikazan na slici 2.

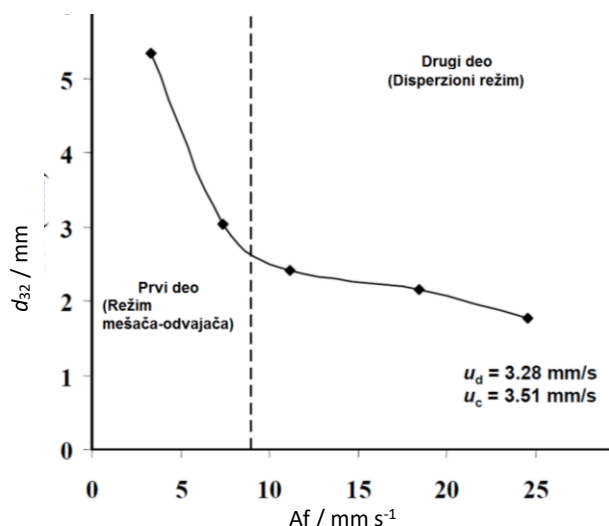
Sauterov srednji prečnik kapi dispergovane faze, d_{32} , koji se još naziva i zapremnisko-površinski prečnik kapi, računa se iz sledeće relacije [14]:

$$d_{32} = \frac{\sum_{i=1}^N n_i d_i^3}{\sum_{i=1}^N n_i d_i^2} \quad (9)$$

gde su n_i – broj kapi srednjeg prečnika d_i unutar određenog intervala i , N – ukupan broj tačaka.

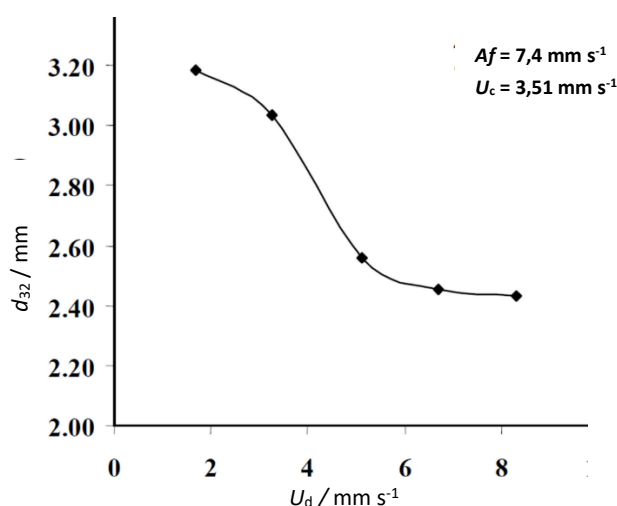
Utvrđeno je da se Sauterov srednji prečnik kapi značajno smanjuje sa porastom brzine pulzacije i površinskih brzina faza pri niskim vrednostima brzine pulzacije i površinskih brzina faza. S druge strane, u oblastima većih vrednosti brzine pulzacije i površinskih brzina faza ovaj trend nije uočen. Na bazi eksperimentalnih rezultata, zaključeno je da se prečnik kapi može predstaviti kao funkcija radnog režima u PEPP koloni, a definisana su tri režima: režim mešača-odvajača, disperzioni režim i emulzioni režim. Uticaj površinskih brzina faza na prečnik kapi je značajan u režimu mešača-odvajača, pri čemu promena površinske brzine kontinualne faze u ovom režimu ima veliki uticaj na prečnik kapi.

Kao što se može videti na slici 3, Sauterov srednji prečnik kapi opada sa porastom vrednosti površinske brzine dispergovane faze, pri konstantnim vrednostima brzine pulzacije i površinske brzine kontinualne faze. Istovremeno, može se zaključiti da, nakon porasta površinske brzine dispergovane faze iznad $6,5 \text{ mm s}^{-1}$, Sauterov srednji prečnik kapi se ne menja značajnije [14].



Slika 2. Uticaj brzine pulzacije (A_f) na Sauterov srednji prečnik kapi (d_{32}), pri konstantnim vrednostima površinskih brzina dispergovane (U_d) i kontinualne faze (U_c) (Preuzeto iz Usman i sar. [14])

Figure 2. Effect of the pulsation velocity (A_f) on the Sauter mean drop diameter (d_{32}), for constant superficial velocities of dispersed (U_d) and continuous (U_c) phases (Reprinted with permission from Usman et al. [14])



Slika 3. Uticaj površinske brzine dispergovane faze (U_d) na Sauterov srednji prečnik kapi (d_{32}), pri konstantnim vrednostima brzine pulzacije (A_f) i površinske brzine kontinualne faze (U_c) (Preuzeto iz Usman i sar. [14])

Figure 3. Effect of the dispersed phase superficial velocity (U_d) on the Sauter mean drop diameter (d_{32}) for constant values of the pulsation velocity (A_f) and the continuous phase superficial velocity (U_c) (Reprinted with permission from Usman et al. [14])

Eksperimentalni podaci za prečnik kapi su upoređivani sa izračunatim podacima pomoću empirijskih korelacija, predloženih od strane Kumara i Hartlanda [15]. Ovi autori su razvili empirijske korelacije za proračun Sauterovog srednjeg prečnika kapi na bazi eksperimentalnih rezultata u osam tipova ekstrakcionih kolona: rotacioni disk kontaktor, asimetrični rotacioni disk kontaktor, Kinijeva (Kühni) kolona, Virc-II (Wirz-II) kolona, pulzaciona kolona sa perforiranim podovima, Karova (Karr) ekstrakciona kolona sa vibracionim pločama, kolona sa punjenjem i kolona sa raspršivanjem. Za svaku od navedenih ekstrakcionih kolona predložena je posebna empirijska korelacija koja je uvažavale specifičnosti date kolone. U slučaju pulzacione ekstrakcione kolone sa perforiranim podovima predložena je jedna empirijska korelacija koja se zasnivala na podacima za 16 različitih sistema tečno-tečno i 326 eksperimentalnih podataka iz 12 literaturnih izvora, kod kojih je kontinualna faza bila voda ili vodeni rastvor azotne kiseline, koji se odnose na Sauterov srednji prečnik kapi [16]. Utvrđeno je da ona važi za sva tri definisana režima strujanja u pulzacionoj ekstrakcionoj koloni sa perforiranim podovima.

Analitički oblik ove korelacije je bio sledećeg oblika [16]

$$\frac{d_{32}}{\sqrt{\frac{\sigma}{\Delta\rho g}}} = 1,35 \alpha^{0,40} \left(\frac{1}{\sqrt{\frac{\sigma_w}{\rho_w g}}} \right)^{0,18} \left(\frac{\mu_d g^{0,25}}{\rho_w^{0,25} \sigma_w^{0,75}} \right)^{0,14} \left(\frac{\sigma}{\sigma_w} \right)^{0,06} \left[0,23 + e^{-29,66 \left(\frac{Af^2}{g\alpha} \right)} \right] \quad (10)$$

gde su: $\rho_w = 998 \text{ kg m}^{-3}$, gustina vode, i $\sigma_w = 0,0728 \text{ N m}^{-1}$, međufazni napon vode, a odnose se na temperaturu od $20 \text{ }^\circ\text{C}$ i važe samo za prethodno navedene sisteme tečno-tečno [16].

U ispitivanju prenosa mase [17] u PEPP koloni prečnika 5 cm i 80 perforiranih podova, korišćen je sistem tečno-tečno etil acetat-sirćetna kiselina-voda i ispitan je uticaj brzina pulzacije i površinskih brzina kontinualne i dispergovane faze na Sauterov srednji prečnik kapi. Utvrđeno je da Sauterov srednji prečnik kapi značajno opada s povećanjem površinske brzine dispergovane faze, pri malim vrednostima brzine pulzacije. Slično uticaju brzine pulzacije, promena vrednosti površinske brzine dispergovane faze utiče na sadržaj dispergovane faze u disperziji. Utvrđeno je, takođe, da sadržaj dispergovane faze kontinualno opada sa porastom površinske brzine dispergovane faze. Međutim, ovakvi uticaji nisu konstantovani pri korišćenju velikih vrednosti brzine pulzacije i velikih vrednosti površinskih brzina faza.

U eksperimentalnom istraživanju [18] određene su vrednosti Sauterovog srednjeg prečnika kapi i sadržaj dispergovane faze u PEPP koloni. Srednji prečnik kapi je određivan pomoću usisne metode, pri čemu je korišćena fotoelektrična detekcija, koja je adaptirana za specijalne granične uslove u ekstrakcionoj koloni. Sadržaj dispergovane faze je meren pomoću razlike pritiska između donjeg i gornjeg dela radne zapremine kolone. U istom radu [18] je razvijena i nova metoda proračuna Sauterovog srednjeg prečnika kapi koja se zasnivala na fotografijama dobijenim visoko preciznom tehnikom, a opisivala je kretanje kapi kroz pulzacionu ekstrakcionu kolonu. Razvijeni matematičko-fizički model omogućava predviđanje veličine kapi i sadržaj dispergovane faze u ograničenom opsegu radnih parametara [18].

U literaturi [19] su prikazani rezultati ispitivanja hidrodinamičkih parametara i prenosa mase u PEPP koloni, prečnika 5 cm i visine 100 cm za sistem toluen-aceton-voda. Vrednosti hidrodinamičkih karakteristika (karakteristična brzina kapi, prečnik kapi), kao i uslovi pri razbijanju kapi koje napuštaju perforirani pod (za prečnike manje od 6 mm) su ispitivane u uslovima pulziranja (režim mešača-odvajanja ili prelazni režim) i odsustva pulziranja u PEPP koloni, koristeći tri različita tipa perforiranog poda i različite vrednosti slobodne površine poda. Razvijena je i korišćena nova fotografska tehnika koja omogućava praćenje i beleženje vrednosti prečnika kapi u koloni, kao i posmatranje parametara pulziranja. Prečnik kapi koja napušta otvor na podu i brzina kapi za datu vrednost prečnika kapi se znatno redukuju u uslovima pulsiranja, pri čemu se ovi efekti pojačavaju zbog prisustva perforiranog poda. Razbijanje mlaza i proces formiranja kapi su u literaturi objašnjeni mehanizmom tipa sabijanje-razbijanje. Granična vrednost brzine kapi se određuje merenjem vremena potrebnog da pojedinačna kap u svakim eksperimentu pređe put jednak visini radnog dela ekstrakcionne kolone. Granična vrednost brzine kapi je funkcija Sauterovog srednjeg prečnika kapi i ona postiže maksimalnu vrednost za sistem n-butanol-aceton voda pri $d_{32} = 2,5 \text{ mm}$ [20]. Ova veličina se naziva kritična granična brzina kapi, pri čemu nakon ove vrednosti granična brzina kapi znatno opada.

Granična brzina kapi je određivana pomoću sledeće jednačine, prikazane u radu [20], koja je data sledećim izrazom:

$$U_t = 0,294 d_{32} \left(\frac{g^2 \Delta\rho^2}{\mu_c \rho_c} \right) \quad (11)$$

S druge strane, u radu [19] predložena je nova korelacija koja omogućava predviđanje prečnika kapi (D_N), koja se formira na otvoru distributora i zasnovana je na prethodno opisanom mehanizmu sabijanje-razbijanje i data je sledećom relacijom:

$$\left(\frac{\rho_d D_N U_N^2}{\sigma} \right)_{\text{krit}} = 3,12 - 1,79 \left(\frac{g d_0^2 \Delta\rho}{\sigma} \right)_{\text{krit}} \quad (12)$$

Na osnovu prethodno prikazanih rezultata može se zaključiti da u svim istraživanjima srednji prečnik kapi dispergovane faze opada sa povećanjem brzine pulzacije. To znači da se uvođenjem pulzacija u PEPP kolonu, u odnosu na klasičnu ekstrakcionu kolonu sa perforiranim podovima, stvara znatno veća međufazna površina, pri istim

vrednostima protoka vodene i organske faze. Istovremeno, srednji prečnik kapi značajno opada i pri porastu površinske brzine dispergovane faze, čime se povećava i medjufazna površina kontakta između faza. Utvrđeno je da Sauterov srednji prečnik kapi drastično opada pri porastu površinske brzine dispergovane faze, pri malim vrednostima brzine pulzacije. Uticaj površinske brzine kontinualne faze nije naročito izražen. Ukupnu brzinu plavljenja je moguće odrediti tako da je ona funkcija prečnika i visine ekstrakcione kolone.

2. 2. Sadržaj dispergovane faze

U literaturi [21] je zaključeno da povratno mešanje, sadržaj dispergovane faze i relativna brzina faza čine parametre od fundamentalnog značaja u projektovanju i radu sa sistemom tečno-tečno u PEPP kolonama. Utvrđeno je da sadržaj dispergovane faze opada pri povećanju brzine pulzacije do postizanja svoje minimalne vrednosti ($\varepsilon_d = 0,075$ za sistem kerozin-voda), a zatim naglo raste pri povećanju brzine pulzacije [21]. Naime, ukoliko se u početnom periodu povećava brzina pulzacije, u dvofazni sistem se unosi više energije što dovodi do smanjenja prečnika kapi, pri čemu diskretan sloj dispergovane faze ispod perforiranog poda nestaje, što dovodi do redukovanja sadržaja dispergovane faze. Dalje povećanje brzine pulzacije izaziva dalje razbijanje kapi, pri čemu kontinualna faza može ući u masu kapi što vrlo rapidno povećava gustinu kapi i dovodi do smanjenja brzine kapi. U ovom procesu formira se velik broj kapi različitih prečnika i ekstrakciona kolona je ispunjena kapima dispergovane faze. U ovom postupku kapi se sudaraju znatno brže i sila trenja utiče na sporije kretanje kapi naviše. Kao rezultat ovih efekata pri većim vrednostima brzine pulzacije povećava se sadržaj dispergovane faze [21]. S druge strane, sadržaj dispergovane faze naglo raste sa povećanjem vrednosti površinske brzine dispergovane faze. U eksperimentalnim istraživanjima [22] meren je sadržaj dispergovane faze za različite vrednosti frekvencije pulzacije, amplitude pulzacije, protoka kontinualne i dispergovane faze za dva dvofazna sistema tečno-tečno u PEPP koloni, pri različitim radnim visinama kolone. Konstantovano je da sadržaj dispergovane faze raste sa porastom radne visine kolone u logaritamskom obliku za radne uslove daleko od tačke plavljenja.

Pulzaciona ekstrakcionu kolona prečnika 4,3 cm i radne visine 200 cm je korišćena za ispitivanje prenosa mase [23], koristeći kerozin kao dispergovanu fazu i vodu kao kontinualnu fazu, pri čemu su n-buterna ili benzoeva kiselina korišćene kao rastvorak. U ovom radu [23] prikazani su eksperimentalni podaci i njihova analiza, uzimajući u obzir sadržaj dispergovane faze i površinske brzine faza u sistemu tečno-tečno. Korišćen je širok opseg eksperimentalnih uslova i velik broj različitih sistema tečno-tečno u navedenoj analizi. U radu [23] je izvršeno i poređenje dobijenih eksperimentalnih podataka za sadržaj dispergovane faze sa podacima koje je dala korelacija Kumara i Hartlanda [24], prikazana sledećom jednačinom:

$$\varepsilon_d = 2,14 \cdot 10^4 e^{[44,53|Z-Z^*|]} U_d^{0,86} (U_c + U_d)^{0,28} \Delta\rho^{-0,3} \rho_d^{-0,93} \mu_d^{0,77} S^{-0,56} PP^{-0,56} \quad (13)$$

gde je tranzicionalna brzina pulzacije (Z^*) računata iz sledeće relacije:

$$Z^* = 9,69 \cdot 10^{-3} \left(\frac{\sigma \Delta\rho^{1/4}}{\mu_d^{3/4}} S \right)^{1/3} \quad (14)$$

U radu [23] modifikovana je jednačina (13) s ciljem da pokrije širok opseg eksperimentalnih uslova i različitih sistema tečno-tečno:

$$\varepsilon_d = K_1 e^{[K_2|Z-Z^*|]} U_d^{1,02} U_c^{0,02} \Delta\rho^{-0,23} \mu_d^{0,52} d_0^{-0,3} S^{-0,4} PP^{-0,4} \quad (15)$$

gde su $K_1 = 84,6$ i $K_2 = 42,56$ za sistem kerozin-buterna kiselina-voda, dok se $K_1 = 92,0$ i $K_2 = 42,56$ odnose na sistem kerozin-benzoeva kiselina-voda.

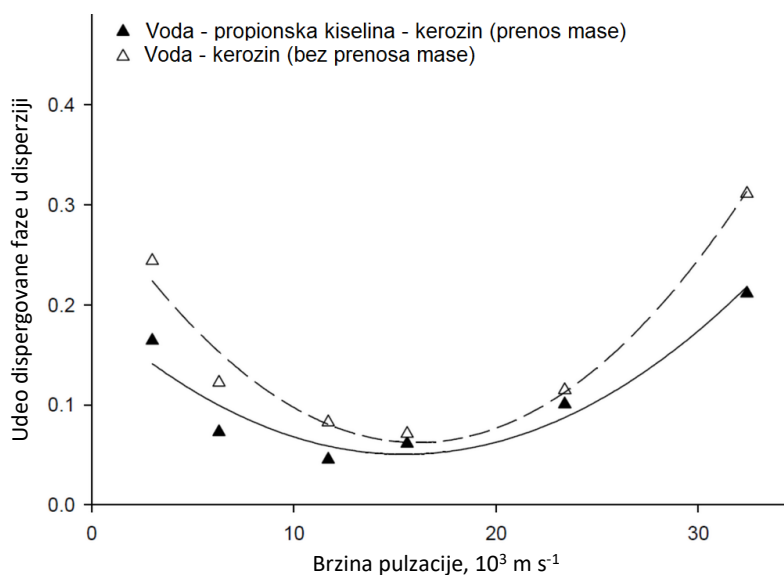
U jednom eksperimentalnom istraživanju [25] PEPP kolona je korišćena za ispitivanje kretanja individualnih kapi rastvarača u vodi. U ovom slučaju kapi imaju određeno vremensko kašnjenje na podovima koje je funkcija geometrije poda, uslova agitacije, kao i pravca i brzine kretanja pulzirajuće vodene faze, kada se kapi formiraju na podu. Razvijena je jedna empirijska korelacija za karakterističnu brzinu, koja se može koristiti za proračun brzine klizanja i sadržaja dispergovane faze [25]. Karakteristična brzina je dobijena na osnovu eksperimentalnih podataka za brzinu klizanja, a predložena korelacija je upoređivana sa eksperimentalnim podacima, pri čemu su određene i granice njene primene.

PEPP kolona [26] je korišćena za ekstrakciju sumporne kiseline iz elektrolitičkog rastvora, a kao rastvarač korišćen je tris (2-etilheksil) amin, TEHA. Kolona je imala prečnik od 7,25 cm i 16 perforiranih podova. Hidrodinamički eksperimenti su pokazali da se opšte poznata korelacija Torntona (Thornton) [27] može koristiti za korelisanje sadržaja dispergovane faze za dati sistem tečno-tečno u ovom tipu kolone.

Efikasnost PEPP kolone je ispitivana kao funkcija prenosa mase između tečnih faza, koji zavisi od međufazne površine [28]. S druge strane, veličina međufazne površine zavisi od raspodele veličine prečnika kapi i sadržaja dispergovane faze u unutrašnjosti kolone. U isto vreme, prenos mase između faza je, takođe, direktno proporcionalan frekvenciji pulzacije [28]. U navedenim eksperimentima korišćena su dva tečno-tečna sistema (n-heksan-voda i kerozin-voda) da bi se odredio uticaj radnih parametara i geometrije kolone na sadržaj dispergovane faze. Kolona je imala unutrašnji prečnik od 4 cm, radna visina je varirala od 34 cm do 50 cm, dok je slobodna površina perforiranog poda bila 19 %.

Vrednosti hidrodinamičkih parametara, kao što su prečnik kapi, sadržaj dispergovane faze i brzina plavljenja su ispitivane i u PEPP koloni prečnika od 7,6 cm [29]. Geometrijski parametri kolone (prečnik otvora na podu, ukupna i slobodna površina poda) i radni parametri (brzina pulzacije i površinska brzina kontinualne faze) su određivani u dvofaznom sistemu kerozin-voda. S druge strane, ispitivan je uticaj radnih parametara na efikasnost ekstrakcije u PEPP koloni. U radu [29] je konstantovano da je sadržaj dispergovane faze funkcija prečnika kapi i površinske brzine dispergovane faze. Pri vrednosti brzine pulzacije od 25 mm s^{-1} , na liniji plavljenja dobijen je paraboličan oblik zavisnosti sa maksimumom na prelazu iz režima mešača-odvajča u disperzioni režim [29]. Maksimalan prenos mase na međufaznoj površini, pri najvišim protocima faza, dobijen je korišćenjem perforiranih podova prečnika 3 mm, razmakom između podova 5 cm i slobodnom površinom poda 20 %. Optimalne vrednosti radnih parametara su bile: brzina pulzacije 25 mm s^{-1} , površinska brzina dispergovane faze 6 mm s^{-1} , pri čemu je korišćen odnos organske i vodene faze od 1:1. Srednji prečnik kapi pri ovim uslovima je bio 1,5 mm, a srednja vrednost sadržaja dispergovane faze 18 %. Razvijene su i empirijske korelacije za predviđanje sadržaja dispergovane faze i srednjeg prečnika kapi [29].

Ispitivane su hidrodinamičke karakteristike u PEPP koloni [21] u uslovima sa i bez prenosa mase u dva sistema tečno-tečno: kerozin-voda i kerozin-propionska kiselina-voda, pri čemu je propionska kiselina korišćena kao rastvorak u slučaju ispitivanja prenosa mase u sistemu tečno-tečno. Opseg radnih parametara je bio: površinska brzina dispergovane faze $1\text{-}5,7 \text{ mm s}^{-1}$, površinska brzina kontinualne faze $1,3\text{-}6,3 \text{ mm s}^{-1}$ i brzina pulzacije $3\text{-}32 \text{ mm s}^{-1}$. Laboratorijska ekstrakciona kolona je imala unutrašnji prečnik 5 cm, 80 perforiranih podova, sa 36 otvora na podu, kao i slobodnu površinu poda 13,5 %. Uticaj brzine pulzacije i prirode sistema tečno-tečno na sadržaj dispergovane faze je prikazan na slici 4. Sadržaj dispergovane faze se značajno menja sa promenom brzine pulzacije za oba ispitivana sistema.



Slika 4. Uticaj brzine pulzacije (A_f) na sadržaj dispergovane faze (ϵ_d); $U_d = 2,73 \text{ mm s}^{-1}$ i $U_c = 2,86 \text{ mm s}^{-1}$ (Preuzeto iz Khawaja i sar. [21])

Figure 4. Effect of the pulsation velocity (A_f) on the dispersed phase holdup (ϵ_d); $U_d = 2,73 \text{ mm s}^{-1}$ and $U_c = 2,86 \text{ mm s}^{-1}$ (Adapted with permission from Khawaja et al. [21])

U literaturi [30] su, takođe, analizirani parametri i korelacije neophodne za projektovanje PEPP kolona. Autori su proveravali primenu različitih korelacija, prisutnih u literaturi, koje se odnose na plavljenje, prečnik kapi i sadržaj dispergovane faze. Poseban akcenat je stavljen na raspoložive korelacije, koje se primenjuju sa velikim stepenom pouzdanosti. Empirijske korelacije su testirane na širokom opsegu eksperimentalnih podataka. Ovi podaci su pokrivali širok opseg geometrijskih i radnih parametara u PEPP kolonama, kao i fizičke karakteristike sistema tečno-tečno.

Rezultati prikazani u ovom delu rada ukazuju na to da sadržaj dispergovane faze u disperziji raste pri povećanju radne visine kolone u logaritamskom obliku, za radne uslove daleko od tačke plavljenja. Sadržaj dispergovane faze značajno raste pri povećanju površinske brzine dispergovane faze, a opada sa povećanjem brzine pulzacije. U jednom radu je konstatovano da se sadržaj dispergovane faze ne menja pri velikim vrednostima brzine pulzacije i površinskih brzina faza. Porast sadržaja dispergovane faze u disperziji utiče na povećanje međufazne površine u sistemu tečno-tečno. Vrednost minimalnog sadržaja dispergovane faze je funkcija međufaznog napona ispitivanog sistema tečno-tečno. Konstatovano je, između ostalog, da sadržaj dispergovane faze zavisi od srednjeg prečnika kapi i površinske brzine dispergovane faze. Poznavanje sadržaja dispergovane faze omogućava precizniji proračun međufaznog koeficijenta prenosa mase u dvofaznom sistemu tečno-tečno, kao i kapaciteta ekstrakcione kolone. Prikazane su i odgovarajuće empirijske korelacije koje služe za predviđanje sadržaja dispergovane faze.

2. 3. KOEFICIJENT AKSIJALNE DISPERZIJE

Vrlo važan faktor u razumevanju osnovnih mehanizama prenosa mase u protivstrujnim ekstrakcionim kolonama tečno-tečno je efekat povratnog mešanja u kontinualnoj fazi. U praktičnim proračunima, koji opisuju prenos mase, koriste se stupnjeviti i difuzioni (disperzni) model. U cilju poređenja rezultata eksperimentalnih merenja korisnije je da se za izražavanje veličine povratnog mešanja u koloni koristiti veličina poznata kao koeficijent aksijalne disperzije (E_c), koji proizilazi iz difuzionog modela, radije nego koeficijent povratnog toka, prisutan u stupnjevitom modelu [31]. U jednom prethodnom istraživanju [32] određivana je vrednost povratnog mešanja u kontinualnoj fazi za širok opseg vrednosti dispergovane i kontinualne faze u pulzacionoj ekstrakcionoj koloni. Za simulaciju hidrodinamike ispitivanog sistema tečno-tečno korišćen je difuzioni model [32]. Utvrđeno je da povećanje površinske brzine dispergovane faze izaziva smanjenje koeficijenta aksijalne disperzije i porast relativne brzine, pošto sadržaj dispergovane faze raste sve do svog maksimuma a zatim opada. S druge strane, povećanje vrednosti površinske brzine kontinualne faze utiče na porast koeficijenta aksijalne disperzije do njegove maksimalne vrednosti. U literaturi [33] su prikazani rezultati određivanja koeficijenta aksijalne disperzije u PEPP koloni, pri promenljivom prečniku kolone od 7,2, 15,2 i 30 cm. U eksperimentalnom radu korišćen je dvofazni sistem kerozin-voda. Voda je korišćena kao kontinualna, a kerozin kao dispergovana faza. Vrednost koeficijenta aksijalne disperzije nije bila funkcija korišćenog prečnika kolone. Povećanje vrednosti površinske brzine dispergovane faze nije uticalo na vrednost koeficijenta aksijalne disperzije u dispergovanoj fazi, mada je uočeno izrazito mešanje unapred u emulzionom režimu. U ovom radu [33] su razvijene i korelacije koje se zasnivaju na dimenzionoj analizi i na fizičkom modelu. U radu [34] korišćen je fizički model koji je uzeo u obzir kvantitativne vrednosti koeficijenta aksijalne disperzije u pulzacionoj ekstrakcionoj koloni, vodeći računa o radnim uslovima, geometrijskim parametrima, kao fizičkim karakteristikama eksperimentalnog sistema tečno-tečno. Računski dobijeni rezultati za E_c su se vrlo dobro slagali sa eksperimentalnim podacima u devet različitih geometrija ekstrakcionih kolona. Model razvijen u ovom radu [34] se pokazao kao vrlo značajan pri projektovanju PEPP kolona. Na bazi poznavanja 992 podataka za 28 sistema tečno-tečno iz 13 različitih izvora, razvijena je korelacija za koeficijent aksijalne disperzije u pulzacionom ekstrakcionim kolonama sa perforiranim podovima [35]. Eksperimentalni podaci za koeficijent aksijalne disperzije dobijeni su u uslovima stacionarnog rada kolone, pri čemu je korišćena dinamička metoda za unošenje indikatora u dvofazni sistem. Razvijena korelacija predstavlja jednostavnu jednačinu koja omogućava izračunavanje koeficijenta aksijalne disperzije u kontinualnoj fazi u sva tri režima rada ekstrakcione u širokom opsegu radnih parametara. Razvijena korelacija se može koristiti pri projektovanju i dizajnu PEPP kolona u uslovima prenosa mase. U radu [36] je prikazana empirijska jednačina za koeficijent aksijalne disperzije, koja se odnosi na pulzacione ekstrakcione kolone sa diskovima i tanjirima, a koje su po konstrukciji najbliže ekstrakcionim kolonama sa perforiranim podovima:

$$E_c = 0,026 \varepsilon d^{-0,92} H^{0,45} A^{1,13} f^{0,98} \quad (16)$$



Rezultati poređenja eksperimentalnih podataka za hidrodinamičke parametre pulzacionih ekstrakcionih kolona sa perforiranim podovima, prikazani u ovom radu, ukazali su na to da porast površinske brzine dispergovane faze izaziva smanjenje koeficijenta aksijalne disperzije u kontinualnoj fazi, što znači da se na ovaj način smanjuje povratno mešanje u kontinualnoj fazi. S druge strane, povećanje vredosti površinske brzine kontinualne faze utiče na porast koeficijenta aksijalne disperzije u kontinualnoj fazi. Konačno, koeficijent aksijalne disperzije ne zavisi od efektivnog prečnika ekstrakcione kolone.

2. 4. RELATIVNA BRZINA

Relativna brzina (brzina klizanja), definisana jednačinom (2), predstavlja osnovni hidrodinamički parametar u protivstrujnim ekstrakcionim kolonama tečno-tečno. Za proračun ovog parametra, kao što se vidi, potrebno je poznavati brojčane vrednosti površinskih brzina kontinualne i dispergovane faze, kao i sadržaj dispergovane faze u koloni. S druge strane, relativna brzina zavisi od srednjeg prečnika kapi i fizičkih osobina sistema tečno-tečno. U literaturi je prikazano više pokušaja da se relativna brzina prikaže kao funkcija sadržaja dispergovane faze. Jedna od najčešće korišćenih relacija je ona prikazana u radu [37], a odnosi se na ekstrakcionu kolonu sa raspršivanjem:

$$\frac{d \rho_c U_s}{\mu_c} = \frac{3wq^2 \varepsilon_d}{[(1-\varepsilon_d)q^3 C_1]} \left[\left\{ C_1 q^3 \text{Ar} \frac{(1-\varepsilon_d)^3}{[54(wq^2 \varepsilon_d)^2 + 1]} \right\}^{0,5} - 1 \right] \quad (17)$$

gdje su: C_1 – konstanta, w – faktor poprečnog preseka i q – faktor iskrivljenosti.

U literaturi [38] je prikazana jednostavna jednačina za određivanje relativne brzine i sadržaja dispergovane faze u gravitacionim taložnicima, sledećeg oblika:

$$\frac{U_s}{dg} = 2,725 \left(\frac{\Delta\rho}{\rho_c} \right) \left[\frac{(1-\varepsilon_d)}{(1+\varepsilon_d^3)} \right]^{1,834} \quad (18)$$

Primena ove jednačine je proverena u eksperimentalnim podacima koji su obuhvatali vrednosti za sadržaj dispergovane faze u opsegu 0,01 - 0,75 i vrednostima Rejnoldsovog broja u opsegu 7 do 2450. Kumar i Hartland [39] su na osnovu 998 eksperimenralnih podataka za 29 sistema tečno-tečno iz 14 literaturnih izvora razvili empirijsku jednačinu za predskazivanje sadržaja dispergovane faze i relativne brzine u disperzijama kod kojih su se kapi taložile pod uticajem gravitacije:

$$\frac{4dg\Delta\rho(1-\varepsilon_d)}{(1+4,56\varepsilon_d^{0,7})3\rho_c U_s^2} = 0,53 + \frac{24\mu_c}{d\rho_c U_s} \quad (19)$$

Dobro slaganje eksperimentalnih i računskih podataka za relativnu brzinu, dobijenih primenom ove jednačine, postiguto je u opsegu 0,01 - 0,76 za sadržaj dispergovane faze i za vrednosti Rejnoldsovog broja u opsegu 0,16 – 3169.

3. ZAKLJUČAK

U ovom radu prikazan je pregled rezultata vezanih za određivanje nekih hidrodinamičkih parametara u PEPP kolonama. Hidrodinamičke karakteristike ekstrakcione kolone su analizirane kao zavisnosti od geometrijskih i operativnih parametara u dvofaznim sistemima tečno-tečno. U ovom radu je pokazano da unos energije u ekstrakcionu kolonu pomoću brzine pulzacije ima značajan uticaj na prečnik kapi, odnosno dovodi do znatne redukcije srednjeg prečnika kapi, što doprinosi boljem prenosu mase u sistemu tečno-tečno. Veličina srednjeg prečnika kapi je funkcija postojećih radnih režima strujanja u kolonskom uređaju (režim mešača-odvajača, disperzioni režim i emulzioni režim). Uticaj vrednosti površinske brzine dispergovane faze je naročito izražen u režimu mešača-odvajača. Promenom površinske brzine dispergovane faze utiče se značajno na prečnik kapi u ovom režimu strujanja. Pokazano je da se srednji

prečnik kapi značajno smanjuje pri povećanju površinskih brzina dispergovane i kontinualne faze ako se koriste male vrednosti ovih parametara.

Utvrđeno je da povećanje sadržaja dispergovane faze u disperziji utiče na povećanje međufazne površine u sistemu tečno-tečno. Konstatovano je, takođe, da sadržaj dispergovane faze zavisi od srednjeg prečnika kapi i površinske brzine dispergovane faze. Pokazano je da se sadržaj dispergovane faze značajno menja sa promenom brzine pulzacije za ispitivane sisteme tečno-tečno.

Pokazano je da povećanje površinske brzine dispergovane faze utiče na smanjenje vrednosti koeficijenta aksijalne disperzije, kao i na porast relativne brzine. S druge strane, povećanje vrednosti površinske brzine kontinualne faze izaziva povećanje koeficijenta aksijalne disperzije. Utvrđeno je da vrednost koeficijenta aksijalne disperzije ne zavisi od prečnika kolone i vrednosti površinske brzine dispergovane faze.

Empirijske korelacije, preuzete iz literature, kao i analizirane zavisnosti hidrodinamičkih karakteristika od geometrijskih i operativnih parametara, prikazane u ovom radu, se mogu koristiti kao dobra osnova za projektovanje ovih ekstrakcionih kolona. Tako, npr. poznavanje vrednosti srednjeg sadržaja dispergovane faze omogućava proračun koeficijenta prenosa mase, koji predstavlja bitan faktor pri proračunima vezanim za projektovanje kolonskih ekstraktora. S druge strane, podatak o sadržaju dispergovane faze je fundamentalan u vezi proračuna potreba za količinom korišćenog rastvarača u ekstrakcionom procesu. Kada je poznata vrednost brzine plavljenja u ekstrakcionoj koloni, dolazi se do saznanja o mogućem maksimalnom kapacitetu uređaja. Koeficijent aksijalne disperzije omogućava proračun koeficijenta prenosa mase u sistemu tečno-tečno, za dati opseg vrednosti radnih uslova.

Određivanje hidrodinamičkih parametara u PEPP kolonama je od značaja za projektovanje ovih kolona uz minimalan broj testiranja na poluindustrijskim uređajima. Pregled radova koji su korišćeni i kritički analizirani u ovom radu, a odnose na određivanje nekih hidrodinamičkih parametara u PEPP kolonama, može biti od koristi svima koji se bave projektovanjem i dizajnom kolonskih ekstraktora ovog tipa.

LISTA OZNAKA

- a - vrednost međufazne površine po jedinici zapremine ekstraktora, $m^2 m^{-3}$
- A - amplituda pulzacije, m
- A_f - brzina pulzacije, $m s^{-1}$
- Ar - modifikovani Arhimedov (Archimedes) broj, $Ar = g d^3 \rho_c \Delta \rho / \mu_c^2$
- C_1 - konstanta u jednačini (17)
- d - srednji prečnik kapi, m
- d_i - srednji prečnik kapi u određenom intervalu i , m
- d_o - prečnik otvora na podu, m
- d_{32} - zapreminsko-površinski ili Sauterov srednji prečnik kapi, m
- D - prečnik kolonskog uređaja, m
- D_N - prečnik kapi koja se formira na otvoru poda, m
- E_c - koeficijent aksijalne (podužne) disperzije, $m^2 s^{-1}$
- e - udeo šupljina u punjenju kolone sa punjenjem
- E_o - Etvosov (Eötvös) broj, $E_o = g d^2 \Delta \rho / \sigma$
- f - frekvencija pulzacije, s^{-1}
- Fr - Frudov (Froude) broj, $Fr = U_o^2 / g d_o$
- g - gravitaciono ubrzanje, $m s^{-2}$
- H - efektivna visina kolone, m
- N - ukupan broj tačaka
- n_i - broj kapi prečnika d_i unutar intervala i
- PP - razmak između podova, m
- q - faktor iskrivljenosti
- R - konstanta, $R = U_d / U_c$
- S - slobodna površina na podu, %
- U - površinska brzina faza, $m s^{-1}$
- U_o - karakteristična brzina, $m s^{-1}$

- U_c - površinska brzina kontinualne faze, $m s^{-1}$
 $U_{c,f}$ - površinska brzina kontinualne faze u tački plavljenja, $m s^{-1}$
 U_d - površinska brzina dispergovane faze, $m s^{-1}$
 $U_{d,f}$ - površinska brzina dispergovane faze u tački plavljenja, $m s^{-1}$
 U_{cd} - ukupna brzina plavljenja, $U_{cd} = (U_c + U_d) / m s^{-1}$
 U_N - brzina kapi na otvoru perforiranog poda, $m s^{-1}$
 U_s - relativna brzina (brzina klizanja), $m s^{-1}$
 U_t - granična brzina kapi, $m s^{-1}$
 Z - modifikovana brzina pulzacije, $m s^{-1}$
 Z^* - tranziciona brzina pulzacije, $m s^{-1}$
 w - faktor poprečnog preseka

Oznake grčkim slovima

- α - udeo slobodne površine na podu
 ε_d - udeo dispergovane faze u disperziji
 ε_f - granična vrednost sadržaja dispergovane faze u tački plavljenja
 μ_c - dinamička viskoznost kontinualne faze, Pa s
 μ_d - dinamička viskoznost dispergovane faze, Pa s
 ρ_c - gustina kontinualne faze, $kg m^{-3}$
 ρ_w - gustina vode na 20 °C, $\rho_w = 998 kg m^{-3}$
 $\Delta\rho$ - razlika gustina između faza, $(\rho_c - \rho_d) / kg m^{-3}$
 σ - međufazni napon, $N m^{-1}$
 σ_w - međufazne napon vode na 20 °C, $\sigma_w = 0,0728 N m^{-1}$
 ψ - funkcija snage.

LITERATURA

- [1] Perry, RH, Green, DW (eds.). *Perry's Chemical Engineers Handbook*, 7th ed., New York, NY: McGraw-Hill, Inc.; 1999, pp. 15-37 – 15-47.
- [2] Sovilj, MN, Knežević, G. Gas-agitated liquid-liquid extraction in a spray extraction column. *Collect Czech Chem Commun.* 1994; 59: 2235-2243.
- [3] Seibert, AF., Fair, JR. Hydrodynamics and mass transfer in spray and packed liquid-liquid columns. *Ind Eng Chem Res.* 1988; 27: 470-481.
- [4] Pietzsch, W, Pilhofer, TH. Calculation of the droplet size in pulsed-plate extraction columns. *Chem Eng Sci.* 1984; 39: 961-965.
- [5] Yu, Y, Kim, SD. Axial dispersion, holdup and flooding characteristics in pulsed extraction columns. *Can J Chem Eng.* 1987; 65 (5): 752-758.
- [6] Sovilj, MN. *Difuzione operacije*, Univerzitet u Novom Sadu, Tehnološki fakultet, Novi Sad, 2004, str. 172-193. (in Serbian)
- [7] Treybal, RE. *Mass Transfer Operations*, 3rd ed., New York, NY: McGraw Hill Company; 1981, pp. 541-557.
- [8] Khawaja, SY, Usman, MR, Nasif, M, Akram, MS, Afzal, W, Akhtar, NA. Mass transfer efficiency of a tall and low plate free area liquid pulsed sieve-plate extraction column. *Int J Ind Chem.* 2017; 8 (4): 397-410.
- [9] Asadollahzadeh, M, Haghighi-Asl, A, Safdari, J, Torab-Mostaedi, M. Flooding characteristics in pulsed packed extraction column. *Brazil J Chem Eng.* 2011; 28 (4), 639-648.
- [10] Godfrey, JC, Slater, MJ. Slip velocity relationships for liquid-liquid extraction columns. *Chem Eng Res Des.* 1991; 69a: 130-141.
- [11] Gayler, R, Roberts, VW, Pratt, HRC. Liquid-liquid extraction: A further study of holdup in packed column. *Trans Instn Chem Engrs.* 1953; 31, 57-68.
- [12] Kumar, A, Hartland, S. Correlation for droplet size in liquid-liquid spray columns. *Chem Eng Commun.* 1984; 31 (1-6): 193-207.
- [13] Smoot, LD, Mar, BW, Babb, AL. Flooding characteristics and separation efficiencies of pulsed sieve-plate columns – Experimental data applied to design of extraction columns. *Ind Eng Chem.* 1959; 51: 1005 – 1010.
- [14] 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.
- [15] Kumar, A, Hartland, S. Unified correlations for predictions of drop size in liquid-liquid extraction columns. *Ind Eng Chem Res.* 1996; 35: 2682-2695.
- [16] Kumar, A, Hartland, S. Prediction of drop size in pulsed perforated-plate extraction columns. *Chem Eng Commun.* 1986; 44: 163-182.
- [17] Usman, MR, Hussain, SN, Rehman, L, Bashir, M, Butt, MA. Mass transfer performance in a pulsed sieve-plate extraction column. *Proc Pak Acad Sci.* 2006; 43:173–179.

- [18] Pietzsch, W, Blass, E. A new method for the prediction of liquid pulse sieve-tray extractors. *Chem Eng Techn.* 1987; 10 (1): 73-86.
- [19] Al-Jimaz, AS. The hydrodynamic behaviour and mass transfer characteristics of single droplets in a pulsed sieve plate column. *Ph. D. Thesis.* Aston University, Birmingham, United Kingdom, 1992.
- [20] Salimi-Khorshidi, A, Abolghasemi, H, Kharkpay, A, Younes-Sinaki, N. Maximum Sauter mean diameter and terminal velocity of drops in a liquid-liquid spray extraction column. *Chem Biochem Eng Q.* 2013; 27 (3): 279-287.
- [21] Khawaja, SY, Usman, MR, Khan, S, Afzal, W, Akram, MS, Khan, RU, Akhtar, NA. On the factors influencing the hydrodynamic performance of a pulsed sieve- plate extraction column: Dispersed phase holdup. *J Fac Eng Techn.* 2011; 18: 1-11.
- [22] Montazer-Rahmani, MM, Safdari, SJ, Akhgari, H. Dependence of holdup on height in a pulsed column based on binary liquid-liquid equilibrium data. *Can J Chem Eng,* 2006; 84 (3): 375-380.
- [23] Venkatanarasaiah, D, Varma, YBG. Dispersed phase holdup and mass transfer in liquid pulsed column. *Bioproc Biosys Eng.* 1988; 18: 119-126.
- [24] Kumar, A, Hartland, S. Prediction of dispersed phase holdup in pulsed perforated plate columns. *Chem Eng Process: Process Intensif.* 1988; 23 (1): 41-59.
- [25] Hussain, AA, Liang, TB, Slater, MJ. Characteristic velocity of drops in a liquid- liquid extraction pulsed sieve-plate column. *Chem Eng Res Des.* 1988; 66 (6): 541-554.
- [26] Gottlieb, K, Grinbaum, B, Chen, D, Stevens, GW. The use of pulsed perforated plate extraction column for recovery of sulfuric acid from cooper tank house electrolyte bleeds. *Hydrometallurgy.* 2000; 58: 203-213.
- [27] Thornton, JD. Liquid-liquid extraction. Part XII: The effect of pulse wave from and plate geometry on the performance and throughput of s pulsed column. *Trans Instn Chem Engrs.* 1975; 35: 316-330.
- [28] Santos, HPD, Gois, LMN. Dispersed phase holdup in a sieve plate liquid-liquid extraction column. *Internat Rev Chem Eng.* 2013; 5 (5).
- [29] Somkuwar, N, Kolhe, N, Rathod, V. Hydrodynamics of a pulsed sieve plate extraction column. *Indian Chem Engineer.* 2014; 56 (3): 235-257.
- [30] Yadav, RL, Partwardhan, AW. Design aspects of pulsed plate columns. *Chem Eng J,* 2008; 138 (1-3): 389-415.
- [31] Miyauchi, T, Vermeulen, T. Longitudinal dispersion in two-phase continuous- flow operations. *Ind Eng Chem Fundamen.* 1963; 2 (2): 113-123.
- [32] Din, GU, Chughtai, I R, Inayuat, MH, Khan, IH. Axial dispersion, holdup and slip velocity of dispersed phase in a pulsed sieve plate extraction column by radiotracer residence time distribution analysis. *Appl Radiat Isot.* 2008; 18 (12): 1818-1824.
- [33] Prvcic, LM, Pratt, HRC, Stevens, GW. Axial dispersion in pulsed-, perforated-plate extraction columns. *Ind Eng Chem Res.* 2017; 56 (11): 3049-3058.
- [34] Tang, X, Chen, F, Lou, F, Wang, J. Estimation of axial dispersion in pulsed-plate extraction columns. *Chem Engrs Des.* 2009; 87 (11): 1562-1566.
- [35] Kumar, A, Hartland, S. Prediction of continuous-phase axial mixing coefficients in pulsed perforated-plate extraction columns, *Ind Eng Chem Res,* 1989; 28 (10): 1507-1513.
- [36] Torkaman, R, Torab-Mostaedi, M, Safdari, J, Moasavian, MS, Asadzollehzadeh, M. Mass transfer coefficients in pulsed column for separation of Samarium and Gadolinium. *Iran J Chem Chem Eng.* 2017; 36 (1): 145-158.
- [37] Pihof, Th. Extraction liquide-liquide. Hydrodynamik von tropfenschwärmen in flüssig-flüssig sprüchkolonnen. *Chem Ing Tech.* 1974; 46, MS 133/74. (German).
- [38] Kumar, A, Vohra, DK, Hartland, S. Sedimentation of droplet dispersion in counter- current spray columns. *Can J Chem Eng.* 1980; 58: 154-159.
- [39] Kumar, A, Hartland, S. Gravity settling in liquid/liquid dispersions. *Can J Chem Eng.* 1985; 63 (3): 368-376.

SUMMARY

Hydrodynamics of pulsed sieve-plate extraction columns

Milan N. Sovilj¹ and Momčilo Đ. Spasojević²

¹University of Novi Sad, Faculty of Technology, Bulevar cara Lazara 1, 21000 Novi Sad, Republic of Serbia

²University of Novi Sad, Faculty of Technical Sciences, Trg Dositeja Obradovića 6, 21000 Novi Sad, Republic of Serbia

(Technical paper)

This paper presents a review of some hydrodynamic parameters in pulsed sieve-plate extraction columns. The hydrodynamic parameters in liquid-liquid systems in these columns were analyzed regarding the effects of operating and geometrical parameters. The values of Sauter mean drop diameter were function of the existing work flow regimes in the column device defined as mixer-settler, emulsion and dispersion regimes. It was concluded that the dispersed-phase holdup was a function of the mean drop diameter and dispersed-phase superficial velocity. An increase in the dispersed-phase holdup induced an increase in the interface area in the liquid-liquid system. Knowledge of the value of the dispersed-phase holdup can be used for calculation of the volumetric mass transfer coefficient, one of the important factor in the design of the column extractor. It was concluded that the increase in the dispersed-phase superficial velocity is causing a decrease in axial dispersion. On the other hand, an increase in the continuous-phase superficial velocity is causing the increase in the axial dispersion coefficient. Some of the empirical equations proposed in literature for calculations of the hydrodynamic parameters were presented. These correlations, derived for determination of the hydrodynamic parameters in pulsed sieve-plate extraction columns, can be used for the design of these liquid-liquid extraction columns.

Keywords: Sauter mean drop diameter, dispersed-phase holdup, continuous and dispersed-phase superficial velocities, axial dispersion coefficient, slip velocity