

VESNA B. LAZAREVIĆ<sup>1</sup>  
IVAN M. KRSTIĆ<sup>2</sup>  
LJILJANA M. TAKIĆ<sup>3</sup>  
MIODRAG L. LAZIĆ<sup>3</sup>  
VLADA B. VELJKOVIĆ<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Centar za preventivnu medicinsku  
zaštitu, Niš, Srbija

<sup>2</sup>Fakultet zaštite na radu,  
Univerzitet u Nišu, Niš, Srbija

<sup>3</sup>Tehnološki fakultet, Univerzitet u  
Nišu, Leskovac, Srbija

NAUČNI RAD

UDK 628.3:66.066.11.067

DOI: 10.2298/HEMIND100801054L

## BISTRENJE I FILTRACIJA SUSPENZIJE FLOKULISANIH ČESTICA IZ HEMIJSKOG PREČIŠĆAVANJA OTPADNE VODENE EMULZIJE IZ PROCESA OBRADNE OBOJENIH METALA

*U radu se ispitivane brzine bistrenja i filtracije suspenzije flokulisanih čestica dobijene prečišćavanjem otpadne vodene emulzije (OVE) iz procesa obrade obojenih metala, dodatkom aluminijum(III)-sulfata i hidratisanog kreča. Cilj rada je bio da se definišu optimalni uslovi bistrenja i filtracije u postupku hemijskog prečišćavanja OVE. Ispitivan je uticaj količina hidratisanog kreča, tj. pH pri kome se vrši koagulacija, i pomoćnih filtracionih sredstva (PFS) koja se dodaju suspenziji flokulisanih čestica na brzinu njenog bistrenja i njene filtracije. Povećanjem pH u fazi koagulacije iznad 10 povećavaju se brzine bistrenja i filtracije suspenzije flokulisanih čestica, a smanjuje zapremina zgušnjene suspenzije (mulja). Uticaj PFS na brzinu bistrenja je negativan, a na brzinu filtracije pozitivan. PFS treba dodati zgušnjenju suspenziji neposredno pre filtracije. Od ispitivanih PFS najbolje se pokazala infuzorijska zemlja Celite standard super-cel u količini od 2 g/dm<sup>3</sup> OVE.*

Sredstva za obradu metala (SOM) su materijali koji optimizuju procese obrade metala rashlađivanjem i podmazivanjem alata i metala koji se obrađuje [1]. Pored ove dve osnovne funkcije, SOM obezbeđuju korozionu zaštitu alata i metala koji se obrađuje i pomažu u odstranjivanju metalnih opiljaka sa mesta obrade. Ona imaju široku primenu u metalno-prerađivačkoj industriji, a procenjuje se da je njihova godišnja svetska potrošnja veća od  $2 \times 10^9$  litara [2]. Svojim funkcijama, SOM poboljšavaju dejstvo alata i produžuju vek njihovog trajanja [3]. Sastav SOM zavisi od vrste primene, ali su glavne komponente: prenosilac toplote (voda), podmazivači (mineralna, biljna ili sintetička ulja), površinski aktivne supstance (anjonski ili nejonski), antikorozivna sredstva, stabilizatori, biocidi i antipenušavci [4]. I pored pozitivnih efekata na proces obrade metala, na SOM se poslednjih godina gleda kao na opasne materije i potencijalne zagađivače radne i životne sredine, pogotovo u slučaju neodgovornog odnosa prema njima.

U toku duge upotrebe SOM, kao rezultat delovanja fizičkih, termičkih, hemijskih i bioloških faktora, dolazi do smanjenja koncentracije komponenata ili do nestanka nekih od njih. Efikasnost SOM smanjuje se promenom u njegovom sastavu, tako da ga je potrebno zameniti novom količinom [5,6]. Zbog male koncentracije ulja, što je posledica njegove mikrobiološke razgradnje u toku upotrebe vodenih emulzija, njegova regeneracija se ne preporučuje.

Iscrpljene otpadne vodene emulzije (OVM) iz procesa obrade metala sadrže ulja i masti, organska jedinjenja (najviše teško razgradljive ugljovodonike), kao i sekundarna ulja, antikorozivna sredstva, jone metala i

drugo. Njihove količine više nego desetostruko prevazilaze potrošnju SOM [2]. Pošto mogu imati negativan efekat na životnu sredinu zbog velikog organskog opterećenja uzrokovanog uglavnom rezidualnim uljem, OVE se moraju bezbedno sakupljati i obraditi pre ispuštanja u kanalizaciju ili u vodotokove. Kao rezultat velike zapremine i specifičnog sastava OVE, ekološki i ekonomski značaj njihove obrade je veliki zbog njihovog uticaja na konvencionalne sisteme obrade otpadnih voda [7].

Za prečišćavanje OVE koriste se hemijske, fizičke i biološke metode [2]. Najčešće se primenjuju: uparavanje [3], membranska separacija [3,7] i hemijsko [7,8] i biološko [9] prečišćavanje. Treba istaći da se razvijaju nove metode za obradu otpadnih zauljanih voda, kao, na primer, naizmeničnim hlađenjem i zagrevanjem [10] i mirkotalasnim zračenjem [11].

Hemijsko prečišćavanje, zbog relativno niskih operativnih troškova, malih kapitalnih ulaganja i jednostavnosti [12], prihvatljiva je metoda prečišćavanja OVE. Složenost i promena sastava OVE sa vremenom, tj. od šarže do šarže uzrokuje velike teškoće u njihovoj hemijskoj obradi, tako da se ona obično izvodi u šaržnom reaktoru i uz prethodno određivanje potrebnih doza hemikalija za svaku šaržu u laboratorijskim uslovima [13]. Razgradnja OVE hemijskom metodom zasniva se na destabilizaciji emulzije ulja dodatkom hemijskog agensa (koagulacija) i stvaranju aglomerata koji dalje rastu do veličine kada se lako izdvajaju iz suspenzije (flokulacija) [3,14,15].

Projektovanje hemijskog postupka prečišćavanja OVE je otežano zbog nedostatka potrebnih hemijsko-inženjerskih podataka, kao što su: vrsta i koncentracija koagulantna i flokulanta optimalnih za razgradnju emulzije, uslovi taloženja flokulisanih čestica, uslovi filtracije i dehidratacije zgušnjene suspenzije (mulja), potreba za primenom adsorpcije ili oksidacije, izdvajanje jona metala, itd. Za hemijsku razgradnju OVE iz procesa

Autor za prepisku: V. B. Veljković, Tehnološki fakultet, Bulevar oslobođenja 124, 16000 Leskovac, Srbija.

E-pošta: veljkovicvb@yahoo.com

Rad primljen: 1. avgust 2010.

Rad prihvaćen: 20. septembar 2010.

obrade obojenih metala dodatkom aluminijum(III)-sulfata i hidratisanog kreča ranije su utvrđeni optimalni uslovi koagulacije i flokulacije [16]. Pod primenjenim uslovima koagulacije stvara se suspenzija flokulisanih čestica, koje su po sastavu, pre svega, aluminijum(III)-hidroksid. Bistrenje i filtracija suspenzije, posle dodatka aluminijum(III)-sulfata i hidratisanog kreča, zavise od sastava polazne otpadne vodene emulzije, pH (tj. količine hidratisanog kreča), temperature i vrste i koncentracije pomoćnog filtracionog sredstva (PFS). Uticaj sastava OVE je teško ispitati, ali se on može isključiti pri ispitivanju uticaja ostalih faktora tako što se u skupu eksperimenata koristi ista OVE.

Kao nastavak ranijih istraživanja [16], u ovom radu je istraživana uticaja uslova koagulacije/flokulacije (količina hidratisanog kreča, tj. pH i vrsta i količina PFS) na bistrenje i filtraciju suspenzije flokulisanih čestica dobijene obradom OVE iz procesa obrade obojenih metala, dodatkom aluminijum(III)-sulfata i hidratisanog kreča. Cilj rada je bio da se definišu optimalni uslovi bistrenja i filtracije, u ukupnom postupku hemijskog prečišćavanja OVE.

## EKSPERIMENTALNI DEO

### Materijali

*Hemikalije.* Kao koagulant korišćen je aluminijum(III)-sulfat tehničkog kvaliteta (Marking, Užice, Srbija), kao baza za podešavanje pH i taložno sredstvo – hidratisani kreč ("Veljko Dugošević", Kučevo, Srbija), a kao PFS – infuzorijske zemlje različite krupnoće: Celite filter-cel, Celite Standard super-cel i Celite 512 (Celite Corp., Lompoc, SAD). Aluminijum(III)-sulfat je korišćen u obliku koncentrovanog rastvora ( $500 \text{ g/dm}^3$ ;  $0,75 \text{ mol/dm}^3$ ). U nekim eksperimentima pH je podešavan rastvorom natrijum-hidroksida („Zorka“, Šabac, Srbija), koncentracije  $1,0 \text{ mol/dm}^3$ .

*Otpadna vodena emulzija.* U istraživanjima je korišćena OVE iz procesa obrade obojenih metala, koja je uzeta iz „jame“ za sakupljanje OVE u krugu „Fabrike obojenih metala“ u Prokuplju. U procesu obrade obojenih metala u ovom preduzeću koriste se vodene emulzije mineralnih ulja FESOL 05 i 09 (FAM, Kruševac). Osnovne karakteristike ovih mineralnih ulja mogu se naći u literaturi [10]. Sekundarno ulje, koje pliva po površini OVE, odvojeno je dekantovanjem.

### Sudovi za koagulaciju i flokulaciju

Koagulacija i flokulacija su izvođene: a) u staklenim čašama, zapremine  $1,0 \text{ dm}^3$ , aparata „jar-test“ (Velp C6F, Italija), sa 6 lopatastih mešalica, svaka sa po dve ravne lopatice (reaktor A), b) u plastičnom sudu, zapremine  $5,0 \text{ dm}^3$ , sa propelerskom mešalicom (Tehnica, Železniki, Slovenija) (reaktor B), i c) u industrijskom sudu, zapremine  $1000 \text{ dm}^3$ , sa propelerskom mešalicom

(reaktor C). Radna zapremina reaktora A, B i C bila je, redom:  $0,5$ ,  $3,0$  i  $800 \text{ dm}^3$ . Brzine mešanja u reaktorima A i C u fazi koagulacije bile su, redom,  $200$  i  $180 \text{ o/min}$ , a u fazi flokulacije  $30$  i  $45 \text{ o/min}$ . Brzina mešanja u reaktoru B podešavana je postavljanjem regulatora brzine na položaje „intenzivno“ ili „umereno“ i nije merena zbog tehničkih nedostataka, s tim što je mešanje bilo intenzivno u fazi koagulacije i umereno u fazi flokulacije.

### Metode

*Koagulacija i flokulacija.* U sud za koagulaciju i flokulaciju sipana je OVE, a zatim su, uz intenzivno mešanje, dodati rastvor aluminijum(III)-sulfata i čvrsti hidratisani kreč. Početne koncentracije aluminijum(III)-sulfata i hidratisanog kreča bile su, redom,  $1,0$  i  $3,6 \text{ g/dm}^3$ ; količina hidratisanog kreča varirana je u nekim eksperimentima radi podešavanja pH. Pri ispitivanju uticaja PFS na bistrenje suspenzije flokulisanih čestica, zajedno sa aluminijum(III)-sulfatoma i hidratisanim krečom davano je PFS. Produženo je sa intenzivnim mešanjem  $5 \text{ min}$  (faza koagulacije), a zatim sa umerenim mešanjem još  $30 \text{ min}$  (faza flokulacije).

*Bistrenje.* Suspenzija flokulisanih čestica je prebačena u graduisani sud ( $500 \text{ cm}^3$ ), radi određivanja brzine bistrenja. U toku bistrenja, tj. taloženja flokulisanih čestica u graduisanom sudu, merena je visina zone bistrine tečnosti,  $h_{CL}$ . Brzina bistrenja,  $dh_{CL}/dt$ , izračunavana je diferenciranjem zavisnosti visine bistrine zone od vremena (kriva bistrenja).

*Uticaj vrste i količine PFS na bistrenje suspenzije.* Koagulacija i flokulacija su izvođene u reaktoru B, a bistrenje u graduisanom sudu. Kada je ispitivan uticaj vrste PFS, po  $500 \text{ cm}^3$  suspenzije je sipano u tri čaše ( $1000 \text{ cm}^3$ ) i u svaku je dodato po  $0,5 \text{ g}$  infuzorijske zemlje Celite filter-cel, Celite Standard super-cel i Celite 512, tako da je njihova početna koncentracija bila  $1,0 \text{ g/dm}^3$ . Kada je ispitivan uticaj količine PFS, po  $500 \text{ cm}^3$  suspenzije je sipano u tri čaše ( $1000 \text{ cm}^3$ ) i u njih su dodate različite količine infuzorijske zemlje Celite Standard super-cel, tako da je njena početna koncentracija bila  $0,4$ ,  $1,0$  ili  $2,0 \text{ g/dm}^3$ .

*Uticaj pH na bistrenje suspenzije.* Koagulacija i flokulacija su izvođene u reaktoru A, a bistrenje u graduisanim sudovima. Podešavanje pH suspenzije flokulisanih čestica vršeno je hidratisanim krečom. Po  $500 \text{ cm}^3$  OVE sipano je u četiri čaše i u njih su dodate različite količine hidratisanog kreča u opsegu od  $1,2$  do  $3,6 \text{ g/dm}^3$ , tako da je pH suspenzije bio u opsegu od  $7,8$  do  $10,7$ . Posle faze flokulacije, suspenzije su prebačene u graduisane sudove radi određivanja brzine bistrenja.

*Filtracija.* Filtracija je vršena pomoću vakuum nuč-filtra (prečnik:  $50 \text{ mm}$ ; samo pri ispitivanju zgušnjivosti suspenzije flokulisanih čestica korišćen je vakuum nuč-filter prečnika  $110 \text{ mm}$ ) sa filtracionim medijumom FibrFi AF71, pri konstantnoj razlici pritiska od  $50$ – $60 \text{ kPa}$ . Brzina filtracije je određivana merenjem zapremine

filtrata koji se sakupi za određeno vreme u baždarenoj vakuum-boci.

Kinetika filtracije se opisuje opštom jednačinom filtracije [17]:

$$\frac{1}{A} \frac{dV}{dt} = \frac{\Delta p}{\frac{\mu \alpha G}{A} (V + V_c)} \quad (1)$$

gde je:  $\Delta p$  – ukupni pad pritiska u filtracionom uređaju,  $A$  – površina filtracione pogače,  $G$  – masa čvrstih čestica po jedinici zapremine tečnosti,  $\mu$  – viskoznost tečnosti,  $V$  – zapremina filtrata,  $\alpha$  – specifični otpor pogače,  $V_c$  – ekvivalentna zapremina filtrata i  $t$  – vreme.

Integralni oblik jednačine (1) je:

$$t = \frac{K_c}{2} V^2 + \frac{1}{q_0} V \quad (2)$$

ili u linearizovanom obliku:

$$\frac{t}{V} = \frac{K_c}{2} V + \frac{1}{q_0} \quad (3)$$

gde je:  $K_c$  – konstanta brzine filtracije ( $\mu \alpha G / A^2 \Delta p$ ), a  $q_0$  – početna brzina filtracije ( $1 / (K_c V_c)$ ). Nagib i odsečak jednačine (3) izračunavani su metodom linearne regresije pomoću računarskog programa.

*Uticao vrste i količine PFS na brzinu filtracije.* Koagulacija i flokulacija su izvođene u reaktoru B. Posle završenog taloženja, bistra tečnost je odlivena, tako da zapremina zgušnjene suspenzije (mulja) bude  $600 \text{ cm}^3$ . Mulj je podeljen na tri dela po  $200 \text{ cm}^3$ . Kada je ispitivan uticaj vrste PFS, mulju je dodato 0,2 g infuzorijske zemlje Celite filter-cel, Celite Standard super-cel ili Celite 512, tako da je njihova početna koncentracija  $1,0 \text{ g/dm}^3$ . Kada je ispitivan uticaj količine PFS, mulju su

dodate različite količine infuzorijske zemlje Celite Standard super-cel, tako da je njena početna koncentracija  $1,0, 2,0$  ili  $3,0 \text{ g/dm}^3$ . Suspenzije su filtrirane pod vakuumom.

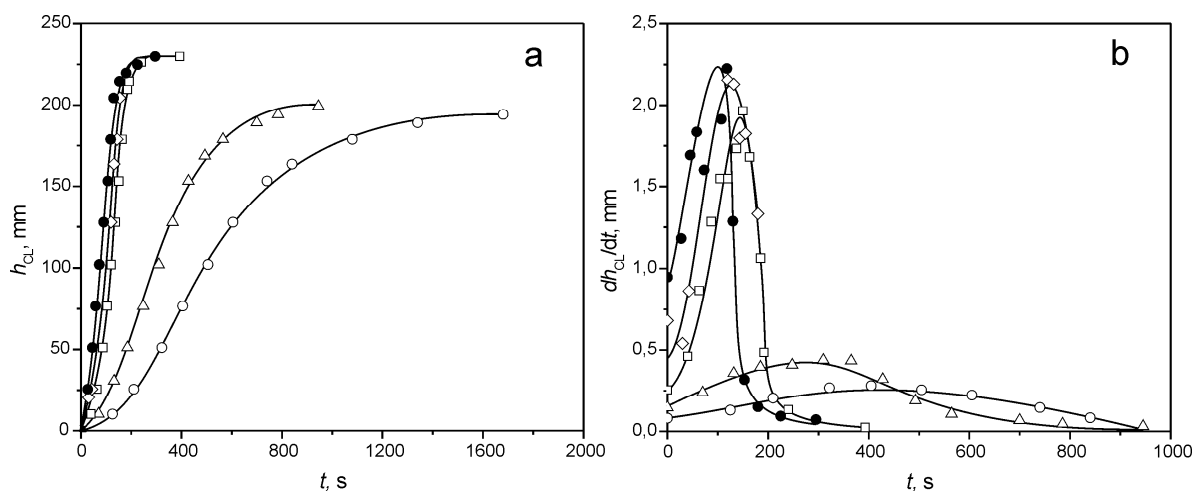
*Uticao pH na brzinu filtracije.* Koagulacija i flokulacija su izvođene u četiri čaše aparata "jar test" (reaktor A). Početni pH je menjan dodatkom različitih količina hidratisanog kreča ( $1,2, 1,8, 2,4$  i  $3,0 \text{ g/dm}^3$ ). Posle završenog taloženja, bistra tečnost je odlivena, tako da zapremina mulja bude  $150 \text{ cm}^3$ . Mulju je dodato PFS (Celite standard super-cel,  $1,0 \text{ g/dm}^3$ , računato na zapreminu originalne suspenzije), a zatim je vršena filtracija pod vakuumom.

*Uticao zgušnjivosti suspenzije flokulisanih čestica na brzinu filtracije.* Koagulacija i flokulacija su izvođene u reaktoru B. Deo originalne suspenzije flokulisanih čestica ( $500 \text{ cm}^3$ ) je izdvojen, dodato mu je PFS (Celite standard super-cel,  $1,0 \text{ g/dm}^3$ ) i izvršena filtracija pod vakuumom. Ostatak suspenzije ( $500 \text{ cm}^3$ ) ostavljen je da stoji, da bi se staložile flokulisane čestice. Posle završenog taloženja, bistra tečnost je odlivena, tako da je zapremina zgušnjene suspenzije flokulisanih čestica (mulj) svedena na  $500 \text{ cm}^3$ . Mulju je dodato PFS (Celite standard super-cel,  $1,0 \text{ g/dm}^3$ , računato na zapreminu originalne suspenzije), a zatim je vršena filtracija.

## REZULTATI I DISKUSIJA

### Bistrenje suspenzije flokulisanih čestica

*Uticao pH na bistrenje suspenzije flokulisanih čestica.* Na slici 1 prikazana je zavisnost visine bistre tečnosti od vremena pri različitim vrednostima pH. Ona ilustruje uticaj pH, odnosno mase hidratisanog kreča dodate OVE u fazi koagulacije na bistrenje suspenzije flokulisanih čestica. Povećanje pH dodatkom hidratisanog kreča pogodovalo je stvaranju čestica aluminijum(III)-



Slika 1. Uticaj količine hidratisanog kreča na bistrenje suspenzije flokulisanih čestica: a) visina bistre tečnosti,  $h_{CL}$ , i b) brzina bistrenja,  $dh_{CL}/dt$  (hidratirani kreč,  $\text{g/dm}^3$ : 1,2 –  $\circ$ , 1,8 –  $\Delta$ , 2,4 –  $\square$ , 3,0 –  $\diamond$ , 3,6 –  $\bullet$ ).

Figure 1. Effects of lime on the clarification of flocculated particle suspension: a) clear liquid height,  $h_{CL}$ , and b) clarification rate,  $dh_{CL}/dt$  (lime,  $\text{g/dm}^3$ : 1.2 –  $\circ$ , 1.8 –  $\Delta$ , 2.4 –  $\square$ , 3.0 –  $\diamond$ , 3.6 –  $\bullet$ ).

Tabela 1. Uticaj količine hidratisanog kreča na maksimalnu brzinu bistrenja suspenzije flokulisanih čestica  
Table 1 Effects of lime on the maximum clarification rate of flocculated particle suspension

Hidratirani kreč, g/cm <sup>3</sup>	pH	Maksimalna brzina bistrenja, mm/s	Udeo mulja, %	Vreme trajanja bistrenja, min
1,2	7,8	0,28	24	25
1,8	8,3	0,44	22	16
2,4	9,9	1,97	10	6
3,0	10,7	2,16	<7	4
3,6	11,5	2,23	<7	4

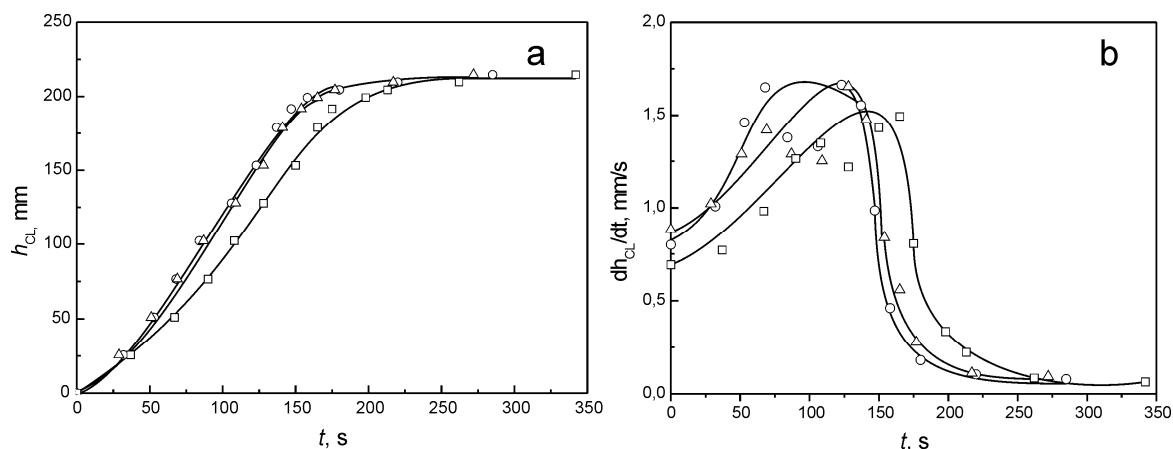
-hidroksida sa dobrom sposobnošću taloženja, što je uslovalo povećanje brzine bistrenja i skraćanje vremena njegovog trajanja (tabela 1). Povećanjem pH od 7,8 na 9,9 maksimalna brzina bistrenja se povećava oko 7 puta, dok dalje povećanje pH na 10,7 neznatno ubrzava bistrenje suspenzije flokulisanih čestica (tabela 1). Ovaj pozitivan efekat pH na bistrenje suspenzije flokulisanih čestica rezultat je uticaja pH na strukturu formiranog aluminijum(III)-hidroksida. Poznato je da se čestice aluminijum(III)-hidroksida sa najboljom sposobnošću taloženja formiraju pri pH 8,5 do 9,0, kada se formira aluminijum(III)-hidroksid kristalne strukture [18,19]. Sprovedena istraživanja pokazuju da pH veći od 10 obezbeđuje maksimalnu brzinu bistrenja veću od 2,0 mm/s. Ova razlika u vrednosti pH u odnosu na publikovane vrednosti može se pripisati odigravanju drugih reakcija u ispitivanom sistemu. Hidratirani kreč, kao taložno sredstvo, potpomaže precipitaciju jona nekih metala, kao što su cink i bakar, prisutnih u OVE u koncentracijama od 5,5 i 12,9 mg/dm<sup>3</sup> u obliku hidroksida [16], kao i sulfata, koji su prisutni u koncentraciji od 42,0 mg/dm<sup>3</sup> u obliku vrlo slabo rastvornog kalcijum-sulfata [16].

Tabela 1 jasno pokazuje da se zapremina mulja na kraju taloženja smanjuje sa povećanjem pH na kojoj se vrši koagulacija, što se pripisuje kristalnoj strukturi aluminijum(III)-hidroksida [18]. Zapremina mulja je posebno važna zbog otežane dehidracije mulja filtraci-

jom. Aluminijum(III)-sulfat, u kombinaciji sa hidratiranim krečom, smanjuje sile adhezije, čime se olakšava dehidracija mulja pri većim vrednostima pH [20,21].

*Uticaj PFS na bistrenje suspenzije flokulisanih čestica.* Da bi se poboljšala propustljivosti filtracionih pogaa koje nastaju filtracijom suspenzije flokulisanih čestica, obično se PFS dodaje suspenziji pre filtracije. U postupku hemijske obrade OVE, PFS se može dodati zajedno sa aluminijum(III)-hidroksidom i hidratiranim krečom ili posle završene flokulacije, što će zavisi od njegovog uticaja na brzinu bistrenja. Zbog toga je izvršeno istraživanje uticaja vrste i količine PFS tipa infuzorijske zemlje na bistrenje suspenzije flokulisanih čestica kada se ona, zajedno sa aluminijum(III)-hidroksidom i hidratiranim krečom, doda OVE.

Slika 2 pokazuje da vrsta PFS nema značajniji uticaj na brzinu bistrenja suspenzije flokulisanih čestica, ali je ona manja nego u odsustvu PFS (tabela 2). Od korišćenih PFS, infuzorijske zemlje Celite standard super-cel i Celite 512 omogućavaju nešto veću brzinu bistrenja suspenzije (1,65 mm/s) nego infuzorijska zemlja Celite filter-cel (1,35 mm/s). U slučaju infuzorijske zemlje Celite standard super-cel, brzina bistrenja suspenzije se smanjuje sa povećanjem količine infuzorijske zemlje dodate OVE (slika 3 i tabela 2). Zapremina mulja ne zavisi od vrste i količine infuzorijske zemlje i iznosi oko 16% od zapremine suspenzije (slike 2 i 3).

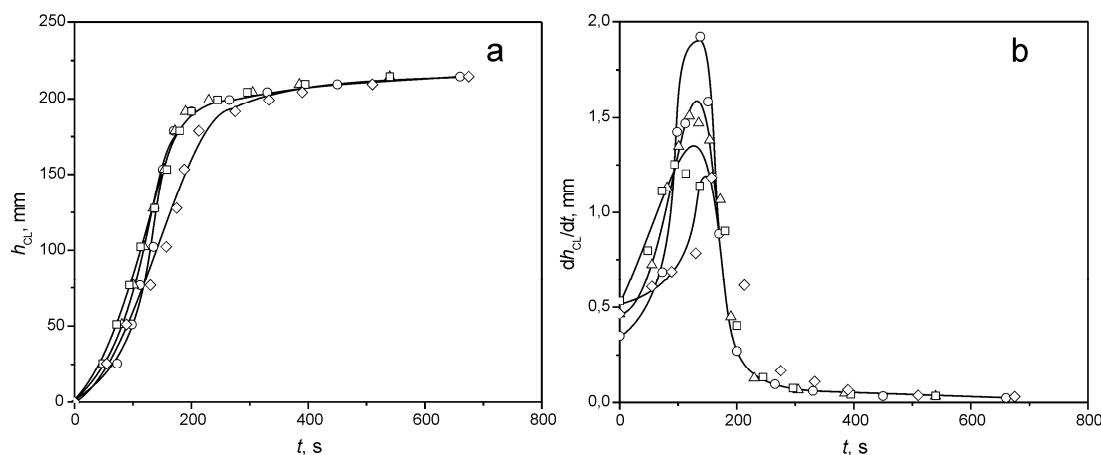


Slika 2 Uticaj vrste PFS na bistrenje suspenzije flokulisanih čestica: a) visina bistre tečnosti,  $h_{CL}$ , i b) brzina bistrenja,  $dh_{CL}/dt$  (1,0 g/dm<sup>3</sup>; Celite standard super-cel – ○, Celite filter-cel – Δ, Celite 512 – □).

Figure 2. Effect of type of filter aid on the clarification of flocculated particle suspension: a) clear liquid height,  $h_{CL}$ , and b) clarification rate,  $dh_{CL}/dt$  (1.0 g/dm<sup>3</sup>; Celite standard super-cel – ○, Celite filter-cel – Δ, Celite 512 – □).

Tabela 2. Uticaj koncentracije Celite standard super-cel na maksimalnu brzinu bistrenja suspenzije flokulisanih čestica  
Table 2. Effect of filter aid (Celite standard super-cel) amount on the maximum clarification rate

PFS, g/dm <sup>3</sup>	Maksimalna brzina bistrenja, mm/s
0,0	1,92
0,4	1,55
1,0	1,33
2,0	1,15



Slika 3. Uticaj količine Celite standard super-cel na bistrenje suspenzije flokulisanih čestica: a) visina bistre tečnosti,  $h_{CL}$ , i b) brzina bistrenja,  $dh_{CL}/dt$  ( $g/dm^3$ , računato na zapreminu originalne suspenzije: 0 – ○, 0,4 – Δ, 1,0 – □, 2,0 – ◇).

Figure 3. Effect of amount of Celite standard super-cel on the filtration rate: a) clear liquid height,  $h_{CL}$ , and b) clarification rate,  $dh_{CL}/dt$  ( $g/dm^3$ , based on original suspension volume: 0 – ○, 0,4 – Δ, 1,0 – □, 2,0 – ◇).

### Filtracija suspenzije flokulisanih čestica

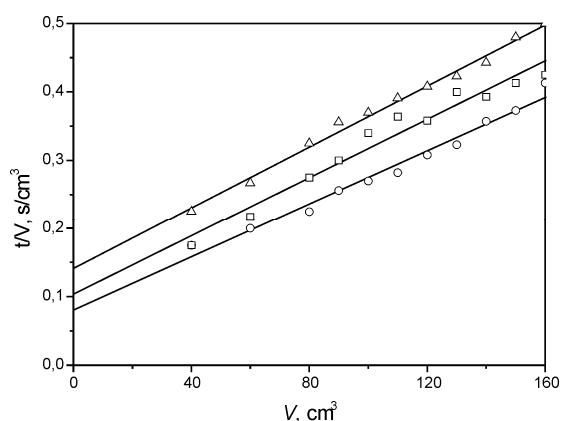
Kao što je već rečeno, pri filtraciji suspenzija flokulisanih čestica, s ciljem njenog ubrzanja, PFS se često koriste ili kao predsoj koji se formira na filtracionom medjumu ili suspendovan u suspenziji [22,23]. Predsoj PFS sprečava ili smanjuje zapušavanje filtracionog medijuma u početnoj fazi filtracije, dok suspendovan PFS povećava poroznost filtracione pogače i čini je nestišljivom. Prethodna istraživanja su pokazala da drugi način primene obezbeđuje bržu filtraciju nego prvi [24]. Zbog toga je usvojeno da se PFS najpre doda suspenziji flokulisanih čestica, suspenzija homogenizuje mešanjem i zatim filtrira.

Uticaj vrste i količine PMF na brzinu filtracije. Na slici 4 prikazana je zavisnost  $t/V$  od  $V$  za tri vrste infuzorijske zemlje: Celite filter-cel, Celite standard super-cel i Celite 512, dok su u tabeli 3 date vrednosti konstante brzine filtracije,  $K_c$ , i početne brzine filtracije  $q_0$ . Vrsta infuzorijske zemlje ima uticaj na karakteristike filtracione pogače i brzinu filtracije. Linearni oblik zavisnosti  $t/V$  od  $V$  za sve tri infuzorijske zemlje ukazuje da je filtraciona pogača nestišljiva, sa konstantnim specifičnim otporom. Najpogodnije PFS je infuzorijska zemlja Celite standard super-cel, koja obezbeđuje naj-

veću brzinu filtracije (najmanju vrednost konstante brzine filtracije i najveću početnu brzinu filtracije).

Rezultati ispitivanja uticaja količine infuzorijske zemlje Celite standard super-cel na brzinu filtracije u opsegu koncentracije do 3,0 g/dm<sup>3</sup> (računato na zapreminu originalne suspenzije) prikazani su u tabeli 4. Propustljivost filtracione pogače zavisi od količine infuzorijske zemlje koja se dodaje mulju. Povećanjem količine infuzorijske zemlje od 1,0 na 2,0 g/dm<sup>3</sup> brzina filtracije se povećava, kao rezultat veće poroznosti filtracione po-

gače koja dovodi do smanjenja vrednosti specifičnog otpora pogače i konstante brzine filtracije  $K_c$ . Daljim povećanjem količine infuzorijske zemlje (na 3,0 g/dm<sup>3</sup>) smanjuje se brzina filtracije zbog povećanja debljine filtracione pogače.



Slika 4. Uticaj vrste pomoćnog filtracionog sredstva na brzinu filtracije (infuzorijska zemlja, 1 g/dm<sup>3</sup>, računato na originalnu suspenziju: Celite standard super-cel – ○, Celite filter-cel – Δ, Celite 512 – □).

Figure 4. Effect of type of filter aid on the filtration rate (diatomaceous earth, 1 g/dm<sup>3</sup>, based on original suspension volume: Celite standard super-cel – ○, Celite filter-cel – Δ, Celite 512 – □).

Tabela 4. Uticaj količine infuzorijske zemlje Celite standard super-cel na  $K_c$  i  $q_0$  ( $\Delta p = 56$  kPa)  
 Table 4. Effect of filter aid (Celite standard super-cel) amount on  $K_c$  and  $q_0$  ( $\Delta p = 56$  kPa)

Pomoćno filtraciono sredstvo <sup>a</sup> , g/dm <sup>3</sup>	$K_c / s \text{ cm}^{-6}$	$q_0 / \text{cm}^3 \text{ s}^{-1}$	$r^2$
1,0	0,0257	1,2	0,986
2,0	0,0122	0,9	0,979
3,0	0,0154	1,0	0,990

<sup>a</sup>Računato na zapreminu originalne suspenzije

Uticaj pH na filtraciju suspenzije flokulisanih čestica. U tabeli 5 date su vrednosti konstante brzine filtracije  $K_c$  za suspenzije flokulisanih čestica dobijene pri različitim vrednostima pH (u opsegu 7,8 do 10,7). Ova tabela ukazuje na veliki uticaj pH na karakteristike filtracione pogače i brzinu filtracije. Kao što je već naglašeno, karakteristike filtracione pogače se poboljšavaju povećanjem pH, odnosno dodavanjem veće količine hidratisanog kreča OVE [21]. Vrednost konstante brzine filtracije suspenzija flokulisanih čestica čiji je pH > 10 je oko 4 puta manja od vrednosti konstante brzine filtracije suspenzija čiji je pH < 8,3. Ovo se može objasniti promenom hemijskog oblika aluminijum(III)-hidroksida (prelaz iz amorfno u kristalni) pri većem pH, tako da čestice postaju rigidnije i filtraciona pogača propusljivija.

Tabela 5. Uticaj pH na  $K_c$  i  $q_0$  ( $\Delta p = 60$  kPa)  
 Table 5. Effect of pH on  $K_c$  and  $q_0$  ( $\Delta p = 60$  kPa)

Hidratirani kreč <sup>a</sup> , g/dm <sup>3</sup>	pH	$K_c / s \text{ cm}^{-6}$	$q_0^{-1} / s \text{ cm}^{-3}$	$r^2$
1,2	7,8	0,1250	0	0,970
1,8	8,3	0,1278	0	0,999
2,4	9,9	0,0320	0	0,998
3,0	10,7	0,0286	0	0,993

<sup>a</sup>Računato na zapreminu originalne suspenzije

Uticaj zgušnjivosti suspenzije flokulisanih čestica na filtraciju. Filtracione pogače koje se dobijaju filtracijom originalne i petostruko zgušnjene suspenzije flokulisanih čestica su, po svojoj prirodi, nestišljive, pošto je zavisnost  $t/V$  od  $V$  u oba slučaja linearna. Vrednosti konstante brzine filtracije  $K_c$ , koje iznose za originalnu i zgušnjenu suspenziju, redom, 0,0142 i 0,1989 s/cm<sup>6</sup>, pokazuju da je brzina filtracije originalne suspenzije oko 14 puta veća od brzine filtracije zgušnjene suspenzije. Uprkos tome, zgušnjavanje suspenzije flokulisanih čestica je poželjno, jer se na taj način smanjuje zapremina tečnosti koja treba da prođe kroz filtracioni medijum i time skraćuje vreme trajanja filtracije. Ovo se može potvrditi sledećim proračunom. U industrijskim uslovima (reaktor C) zapremina suspenzije flokulisanih čestica je 800 dm<sup>3</sup>, a vreme trajanja njene filtracije pri konstantnom pritisku  $\Delta p = 300$  kPa i kroz filtracionu površinu 0,24 m<sup>2</sup> iznosi oko 3,5 h, dok filtracija zgušnjene suspenzije flokulisanih čestica (15 vol.%, zapremina 120 dm<sup>3</sup>), pod istim uslovima, traje samo jedan sat.

## ZAKLJUČAK

S ciljem razvoja tehnološkog postupka hemijskog prečišćavanja OVE mineralnih ulja FESOL 05 i 09 iz procesa obrade obojenih metala, ispitane su faze bistrenja i filtracije suspenzije flokulisanih čestica koja nastaje posle dodatka aluminijum(III)-sulfata i hidratisanog kreča OVE. Analiziran je uticaj količine hidratisanog kreča, tj. pH pri kome se vrši koagulacija, i PFS koje se dodaje suspenziji flokulisanih čestica na brzinu bistrenja i filtracije suspenzije flokulisanih čestica. Pokazano je da pH iznad 10 ubrzava bistrenje i filtraciju suspenzije flokulisanih čestica, kao i da smanjuje krajnju zapreminu zgušnjene suspenzije (mulja) posle bistrenja, dok prisustvo PFS negativno utiče na brzinu bistrenja. Zgušnjavanje suspenzije flokulisanih čestica je

poželjno, jer se na taj način smanjuje zapremina tečnosti koju treba filtrirati i skraćuje vreme trajanja filtracije. Preporuka je da se PFS dodaje zgušnjenju suspenziji flokulisanih čestica neposredno pre filtracije. Najpogodnije PFS je infuzorijska zemlja Celite standard super-cel, koja obezbeđuje najveću brzinu filtracije, a optimalna količina je 2,0 g/dm<sup>3</sup>.

## Spisak korišćenih simbola

- $A$  – površina filtracione pogače, m<sup>2</sup>
- $G$  – masa čvrstih čestica po jedinici zapremine tečnosti, kg/m<sup>3</sup>
- $h_{CL}$  – visina bistre tečnosti, m
- $K_c$  – konstanta brzine filtracije, s/m<sup>6</sup>
- $\Delta p$  – ukupni pad pritiska u filtracionom uređaju, Pa
- $q_0$  – početna brzina filtracije, m<sup>3</sup>/s
- $t$  – vreme, s
- $V$  – zapremina filtrata, m<sup>3</sup>
- $V_e$  – ekvivalentna zapremina filtrata, m<sup>3</sup>

**Grčki simboli**

- $\alpha$  – specifični otpor pogače, m/kg  
 $\mu$  – viskoznost tečnosti, Pa s

**LITERATURA**

- [1] J. S. McCoy, Introduction: Tracing the Hystorical Development of Metalworking Fluids, in: J. P. Byers, (Ed.), *Metalworking Fluids* Marcel Dekker, New York, 1994, pp. 1–23.
- [2] C. Cheng, D. Phipps, R.M. Alkhattar, Treatment of spent metalworking fluids, *Water Res.* **39** (2005) 4051–4063.
- [3] J.M. Benito, A. Cambiella, A. Lobo, G. Gutierrez, J. Coca, C. Pazos, Formulation, characterization and treatment of metalworking oil-in-water emulsions, *Clean Technol. Environ. Polut.* **12** (2010) 31–41.
- [4] J.R. Portela, J. Sanchez-Oneto, M.B. Garcia-Jarana, E. Nebot Sanz, E.J. Martinez de la Ossa, Comparison of different hydrothermal processes for the elimination of cutting fluid wastes, *Chem. Eng. Transact.* **17** (2009) 245–250.
- [5] J.M. Burke, Waste treatment of metalworking fluids, a comparison of three common methods, *Lubrication Eng.* **47** (1991) 238–246.
- [6] M. Greeley, N. Rajagopalan, Impact of environmental contaminant on machining properties of metalworking fluids, *Tribol. Int.* **37** (2004) 327–332.
- [7] N. Hilal, G. Busca, F. Talens-Alession, B. P. Atkin, Treatment of waste coolants by coagulation and membrane filtration, *Chem. Eng. Proc.* **43** (2004) 811–821.
- [8] D. Deepak, S.G. Roy, K. Raghavan, S. Mukherjee, Effect of ferric chloride on the separation of miscible from waste water. *Indian J. Environ. Health* **1** (1988) 43–51.
- [9] C. Cheng, D. Phipps, R.M. Alkhattar, Thermophilic aerobic wastewater treatment of waste metalworking fluids, *Wat. Environ. J.* **20** (2006) 227–232.
- [10] V.N. Rajaković, D. Skala, Demulzifikacija naizmeničnim hlađenjem i zagevanjem, *Hem. Ind.* **58** (2004) 343–350.
- [11] V.N. Rajaković, D. Skala, Separation of oil-in-water emulsions by freeze/thaw method and microwave radiation, *Sep. Purif. Technol.* **49** (2006) 192–196.
- [12] Fact Sheet – Ten Ways to Reduce Machine Coolant Costs, Environmental Services Division, Michigan Departments of Commerce and Natural Resources, Lansing, 1994 (<http://www.p2pays.org/ref/03/02945.pdf>).
- [13] P.M. Sutton, P. N. Mishra, Waste Treatment, in: J.P. Byers, (Ed.), *Metalworking Fluids* Marcel Dekker, New York, 1994, pp. 367–391.
- [14] J.M. Benito, G. Rios, E. Ortea, E. Fernhdez, A. Cambiella, C. Pazos, J. Coca, Design and construction of a modular pilot plant for the treatment of oil-containing wastewaters, *Desalination* **147** (2002) 5–10.
- [15] J. W. Patterson, *Industrial Wastewater Treatment Technology*, 2<sup>nd</sup> Edition, Butterworth Publishers, Boston, 1985, pp.273–297.
- [16] V.B. Veljković, V.B. Kovačević, M.L. Lazić, D.S. Savić, D.U. Skala, Treatment of used oil-in-water emulsions from a non-ferrous metalworking plant, II Regional Symposium “Chemistry and the Environment”, Proceedings, Kruševac, 2003, pp. 263–264.
- [17] D. Simonović, D. Vuković, S. Cvijović, S. Končar-Đurđević, Tehnološke operacije: Mehaničke operacije, Tehnološko-metalurški fakultet, Beograd, 1987, str. 247–267.
- [18] J.W. Olver, W.C. Kreye, R. Roberts, H.C. Sutton, Anodizing Wastewater Treatment and Sludge Disposal: A Total Systems Design, Third Annual Conference on Treatment and Disposal of Industrial Wastewaters and Residues, Houston, TX, 1978, pp. 94–101.
- [19] L. Wangen, J. Williams, Control by Alkaline Neutralization of Trace Elements in Acidic Coal Cleaning Waste Leachates, *J. Water Poll. Control. Fed.* **54** (1982) 1302–1310.
- [20] W. Fresenius, W. Schneider, B. Boehnke, K. Poeppinghaus, *Waste Water Tecnology: Origin, Collection, Treatment and Analysis of Waste Water*, Springer-Verlag, Berlin, 1989.
- [21] F. Saunders, M. Sezgin, J. Medero, Segregated Neutralization for Treatment of Concentrated Aluminum Finishing Wastes, Proceedings of the 4th Conference on Advanced Pollution Control for the Metal Finishing Industry, USEPA 600/9-82-022, 1982.
- [22] C.W. Cain, Filter-Aid Filtration, in: P.A. Schweitzer, (Ed.), *Handbook of Separation Techniques for Chemical Engineers*, 2<sup>nd</sup> ed., McGraw-Hill, New York, 1988, pp. 4.1–4.9.
- [23] C.W. Cain, Filtration Theory, in: P.A. Schweitzer, (Ed.), *Handbook of Separation Techniques for Chemical Engineers*, 2<sup>nd</sup> ed., McGraw-Hill, New York, 1988, str. 4.9–4.14.
- [24] V. Kovačević, Prečišćavanje otpadne vodene emulzije iz procesa obrade metala, Magistarski rad, Tehnološki fakultet, Leskovac, 2003.

**SUMMARY****CLARIFICATION AND FILTRATION OF THE FLOCCULATED PARTICLE SUSPENSION FROM A CHEMICAL TREATMENT OF WASTE OIL-IN-WATER EMULSIONS FROM A NON-FERROUS METALWORKING PLANT**Vesna B. Lazarević<sup>1</sup>, Ivan M. Krstić<sup>2</sup>, Ljiljana M. Takić<sup>3</sup>, Miodrag L. Lazić<sup>3</sup>, Vlada B. Veljković<sup>3</sup><sup>1</sup>Institute for Preventive Medical Protection, Niš, Serbia<sup>2</sup>Faculty of Occupational Protection, University of Niš, Niš, Serbia<sup>3</sup>Faculty of Technology, University of Niš, Leskovac, Serbia

(Scientific paper)

The effects of the coagulation/flocculation conditions on clarification and filtration of the flocculated particle suspension obtained by the chemical treatment of the waste oil-in-water emulsion (OWE) from a non-ferrous metalworking plant were studied. The treatment involved the addition of aluminum(III) sulfate and lime to the OWE. The main goal was to define the optimum conditions for clarification and filtration of the flocculated particle suspension. The factors involved were amounts lime (i.e. pH) and filter aid added the OWE on clarification and filtration rates. At pH>10, the clarification rate was increased and the final volume of the concentrated suspension (sludge) was reduced, while filter aid affected negatively the clarification rate. The filtration rate was also increased when the coagulation was carried out at pH>10. The flocculated particle suspension should be concentrated before filtration in order to decrease the filtration duration. The most efficient filter aid was Celite standard supercel, its optimum initial concentration being found to be 2 g/dm<sup>3</sup>.

Ključne reči: Otpadna vodena emulzija • Bistrenje • Filtracija • Hemijsko prečišćavanje • Aluminijum(III)-sulfat • Hidratizani kreč

Key words: Waste oil-in-water emulsions • Clarification • Filtration • Chemical treatment • Aluminum(III) sulphate • Lime