

Utjecaj brzine vrtnje PBT miješala na sorpciju bakra na zeolitu

BuntiĆ, Karla

Undergraduate thesis / Završni rad

2021

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Split, Faculty of Chemistry and Technology / Sveučilište u Splitu, Kemijsko-tehnološki fakultet**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:167:970710>

Rights / Prava: [In copyright](#) / [Zaštićeno autorskim pravom.](#)

Download date / Datum preuzimanja: **2024-05-04**

Repository / Repozitorij:

[Repository of the Faculty of chemistry and technology - University of Split](#)



UNIVERSITY OF SPLIT



DIGITALNI AKADEMSKI ARHIVI I REPOZITORIJ

SVEUČILIŠTE U SPLITU
KEMIJSKO–TEHNOLOŠKI FAKULTET

**UTJECAJ BRZINE VRTNJE PBT MIJEŠALA NA SORPCIJU BAKRA NA
ZEOLITU**

ZAVRŠNI RAD

KARLA BUNTIĆ

Matični broj: 1278

Split, rujan 2021.

SVEUČILIŠTE U SPLITU
KEMIJSKO–TEHNOLOŠKI FAKULTET
PREDDIPLOMSKI SVEUČILIŠNI STUDIJ KEMIJSKE TEHNOLOGIJE
KEMIJSKO INŽENJERSTVO

**UTJECAJ BRZINE VRTNJE PBT MIJEŠALA NA SORPCIJU BAKRA NA
ZEOLITU**

ZAVRŠNI RAD

KARLA BUNTIĆ

Matični broj: 1278

Split, rujan 2021.

UNIVERSITY OF SPLIT
FACULTY OF CHEMISTRY AND TECHNOLOGY
UNDERGRADUATE UNIVERSITY STUDY OF CHEMICAL TECHNOLOGY
CHEMICAL ENGINEERING

IMPACT OF PBT IMPELLER SPEED ON COPPER SORPTION ON ZEOLITE

BACHELOR THESIS

KARLA BUNTIĆ

Parent number: 1278

Split, September 2021.

TEMELJNA DOKUMENTACIJSKA KARTICA

ZAVRŠNI RAD

Sveučilište u Splitu

Kemijsko-tehnološki fakultet u Splitu

Preddiplomski sveučilišni studij kemijske tehnologije, smjer: Kemijsko inženjerstvo

Znanstveno područje: Tehničke znanosti

Znanstveno polje: Kemijsko inženjerstvo

Tema rada je prihvaćena na 6. sjednici Fakultetskog vijeća Kemijsko-tehnološkog fakulteta

Mentor: prof. dr. sc. Sandra Svilović

Pomoć pri izradi: Anita Bašić, dipl. ing.

UTJECAJ BRZINE VRTNJE PBT MIJEŠALA NA SORPCIJU BAKRA NA ZEOLITU

Karla Buntić, 1278

Sažetak:

U radu je proučena i ispitana kinetika sorpcije bakra na NaX zeolitu te utrošak snage miješanja za ispitivani proces. Eksperimenti su provedeni u staklenom kotlastom reaktoru opremljenom s razbijalima virova. Miješanje je provedeno uz korištenje turbinskog miješala s ravnim lopaticama nagnutim pod kutom od 45° (PBT) pri četiri različite brzine vrtnje u izotermnim uvjetima. Kinetička analiza eksperimentalnih podataka Weber-Morrisovim i Blanchardovim kinetičkim modelima pokazala je da je ispitivana reakcija sorpcije bakra na površini NaX zeolita reakcija drugog reda i da se proces odvija u kinetičkom području.

Ključne riječi: PBT miješalo, sorpcija, zeolit NaX, kinetika

Rad sadrži: 34 stranica, 24 slike, 2 tablice, 51 literaturnih referenci

Jezik izvornika: hrvatski

Sastav Povjerenika za obranu:

- | | |
|-------------------------------------|---------------|
| 1. Doc. dr. sc. Mario Nikola Mužek | - predsjednik |
| 2. Dr. sc. Jelena Jakić, znan. sur. | - član |
| 3. Prof. dr. sc. Sandra Svilović | - član-mentor |

Datum obrane: 22. rujna 2021.

Rad je u tiskanom i elektroničkom (pdf format) obliku pohranjen u knjižnici Kemijsko-tehnološkog fakulteta Split, Ruđera Boškovića, 35.

BASIC DOCUMENTATION CARD

BACHELOR THESIS

University of Split

Faculty of Chemistry and Technology Split

Undergraduate university study of Chemical Technology, Orientation: Chemical Engineering

Scientific area: Technical Sciences

Scientific field: Chemical Engineering

Thesis subject was approved by Faculty Council of Faculty of Chemistry and Technology, session no. 6

Mentor: PhD Sandra Svilović, full prof.

Technical assistance: Anita Bašić, mag. ing. chem. ing.

IMPACT OF PBT IMPELLER SPEED ON COPPER SORPTION ON ZEOLITE

Karla Buntić, 1278

Abstract:

The kinetics of copper sorption on NaX zeolite and the mixing power consumption for the investigated process were monitored and investigated. The experiments were performed in a glass batch reactor equipped with baffles. Mixing was performed using a turbine impeller with flat blades inclined at an angle of 45° (PBT) at four different speeds in isothermal conditions. Kinetics analysis of experimental data by Weber-Morris and Blanchard kinetics models showed that the investigated copper sorption reaction on the surface of NaX zeolite is a second order reaction and that the process takes place in the kinetic region.

Keywords: PBT impeller, sorption, NaX zeolite, kinetics

Thesis contains: 35 pages, 24 figures, 2 tables, 51 references

Original in: Croatian

Defence committee:

- | | |
|--|----------------|
| 1. Mario Nikola Mužek – PhD, assistant prof. | - chair person |
| 2. Jelena Jakić – PhD, research associate | - member |
| 3. Sandra Svilović – PhD, full prof. | - supervisor |

Defence date: 22 September 2021

Printed and electronic (pdf format) version of thesis is deposited in Library of Faculty of Chemistry and Technology, Split, Ruđera Boškovića 35.

Završni rad je izrađen u Zavodu za kemijsko inženjerstvo, Kemijsko-tehnološkog fakulteta u Splitu pod mentorstvom prof. dr. sc. Sandre Svilović.

Zahvaljujem se mentorici prof. dr. sc. Sandri Svilović i asistentici Aniti Bašić dipl. ing. koje su mi prije svega pružile veliku čast omogućivši izradu ovog rada pod svojim vodstvom. Hvala na svom prenesenom znanju, savjetima i pomoći prilikom izvedbe eksperimentalnog dijela i izrade ovog završnog rada kao i na beskrajno ugodnoj atmosferi.

Hvala mojim prijateljima koji su uvijek bili tu za mene, pružajući mi ljubav, podršku i motivaciju.

I na kraju, jedno veliko hvala mojoj obitelji, a posebno mojim roditeljima na pružanju bezuvjetne ljubavi kao i vječne vjere u mene i ostvarenje mojih snova.

„Sve mogu u Onome koji me jača!”

(Fil 4, 13)

ZADATAK ZAVRŠNOG RADA

- Pripremiti otopinu bakrovog(II) nitrata trihidrata poznate množinske koncentracije
- Odrediti kritičnu brzinu vrtnje turbinskog miješala s ravnim lopaticama nagnutim pod kutom od 45° pri kojoj su sve čestice zeolita suspendirane (N_{JS})
- Odrediti utrošak snage miješanja pri određenoj kritičnoj brzini vrtnje miješala te brzinama koje odgovaraju 70%, 90% i 120% njene vrijednosti
- Provesti proces sorpcije iona bakra na zeolitu NaX u kotlastom reaktoru opremljenom PBT miješalom i razbijalima virova pri brzinama vrtnje miješala koje odgovaraju 70%, 90%, 100% i 120% N_{JS} uz uzorkovanje reakcijske smjese tijekom dva sata u odgovarajućim vremenskim intervalima
- Korištenjem Weber-Morrisovog i Blanchardovog modela provesti kinetičku analizu eksperimentalno dobivenih kinetičkih podataka.

SAŽETAK

U radu je praćena i ispitana kinetika sorpcije bakra na NaX zeolitu te utrošak snage miješanja za ispitivani proces. Eksperimenti su provedeni u staklenom kotlastom reaktoru opremljenom s razbijalima virova. Miješanje je provedeno uz korištenje turbinskog miješala s ravnim lopaticama nagnutim pod kutom od 45° (PBT) pri četiri različite brzine vrtnje u izotermnim uvjetima. Kinetička analiza eksperimentalnih podataka Weber-Morrisovim i Blanchardovim kinetičkim modelima pokazala je da je ispitivana reakcija sorpcije bakra na površini NaX zeolita reakcija drugog reda i da se proces odvija u kinetičkom području.

Ključne riječi: PBT miješalo, sorpcija, zeolit NaX, kinetika

SUMMARY

The kinetics of copper sorption on NaX zeolite and the mixing power consumption for the investigated process were monitored and investigated. The experiments were performed in a glass batch reactor equipped with baffles. Mixing was performed using a turbine impeller with flat blades inclined at an angle of 45° (PBT) at four different speeds in isothermal conditions. Kinetics analysis of experimental data by Weber-Morris and Blanchard kinetics models showed that the investigated copper sorption reaction on the surface of NaX zeolite is a second order reaction and that the process takes place in the kinetic region.

Keywords: PBT impeller, sorption, NaX zeolite, kinetics

Sadržaj

UVOD.....	1
1. OPĆI DIO	2
1.1. ZEOLITI.....	3
1.1.1. Struktura zeolita	3
1.1.2. Svojstva i primjena zeolita	4
1.1.3. Prirodni zeoliti	5
1.1.4. Sintentski zeoliti.....	6
1.1.4.1. NaX zeolit.....	7
1.2. ADSORPCIJA I IONSKA IZMJENA	8
1.3. MIJEŠANJE.....	9
1.3.1. Dizajn sustava za miješanje	10
1.3.2. Vrste miješala	10
1.3.3. Snaga miješanja	12
1.3.4. Suspendiranje.....	13
1.4. KINETIČKI MODELI	14
1.4.1. Weber-Morrisov model	14
1.4.2. Blanchardov model	15
2. EKSPERIMENTALNI DIO.....	16
2.1. MATERIJALI I APARATURA	17
2.1.1. Materijali	17
2.1.2. Aparatura	17
2.1.3. Postupak rada.....	19
3. REZULTATI I RASPRAVA	21
3.1. ODREĐIVANJE UTROŠKA SNAGE	22
3.2. EKSPERIMENTALNI KINETIČKI PODATCI.....	23
3.3. ANALIZA KINETIČKIH PODATAKA	24

4.	ZAKLJUČAK	28
5.	LITERATURA.....	30

UVOD

Zeoliti, poznati i kao molekulska sita, kristalni su alumosilikati karakteristične trodimenzionalne strukture koji zbog svojih fizikalno – kemijskih svojstava pronalaze široku primjenu u različitim područjima.

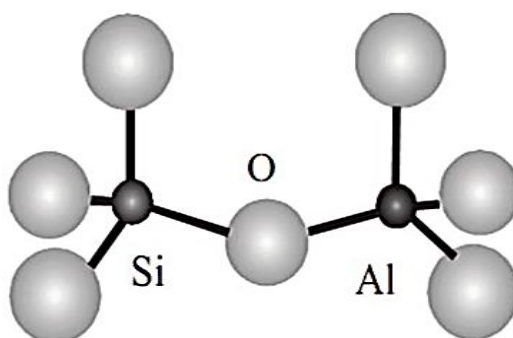
Cilj ovog rada bio je pratiti i ispitati kinetiku sorpcije iona bakra na zeolitu NaX potpomognutu operacijom suspendiranja čestica zeolita u otopini iona bakra u kotlastom reaktoru uz turbinsko miješalo s četiri ravne lopatice nagnute pod kutom od 45° , tzv. PBT miješalo, i razbijala virova. Kinetika je ispitana pri različitim brzinama vrtnje miješala, a dobiveni eksperimentalni podaci analizirani su Weber-Morrisovim i Blanchardovim modelima.

Određen je i utrošak snage miješanja.

1. OPĆI DIO

1.1. ZEOLITI

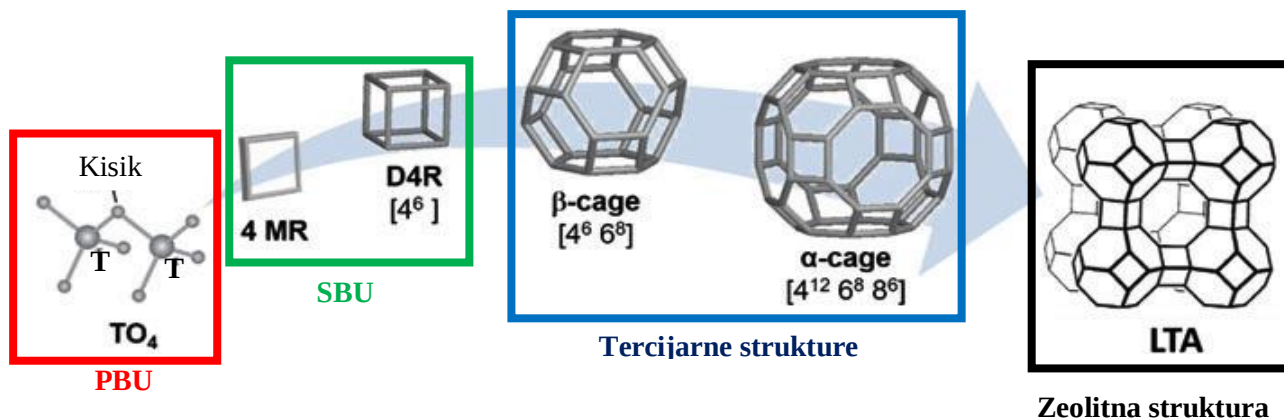
Zeoliti su mikroporozni alumosilikati kristalne građe koje je 1756. otkrio švedski kemičar Axel Cronsted. Budući da se uslijed zagrijavanja zeoliti ponašaju kao da vriju, Cronsted ih je nazvao „kipućim kamenjem” (grč. *zeo* - kipjeti, *lithos* - stijena).¹ Njihovu specifičnu i jedinstvenu prostorno - mrežnu strukturu izgrađuju $[\text{SiO}_4]$ i $[\text{AlO}_4]^-$ tetraedri povezani preko zajedničkih atoma kisika (slika 1).² Nastaju u prirodi djelovanjem vulkana, međutim mogu se sintetizirati u laboratoriju. Do sada je nađeno 229 različitih struktura zeolita.¹



Slika 1. $[\text{SiO}_4]$ i $[\text{AlO}_4]^-$ tetraedri povezani preko zajedničkih atoma kisika³

1.1.1. Struktura zeolita

Specifičnost strukture zeolita manifestira se u postojanju strukturnih šupljina i pora međusobno povezanih kanalima.⁴ Primarne strukturne jedinice (*engl. Primary Building Units*, PBU) predstavljaju $[\text{SiO}_4]$ i $[\text{AlO}_4]^-$ tetraedri. Povezivanjem PBU jedinica preko kisikovog atoma nastaju veće, sekundarne strukturne jedinice (*engl. Secondary Building Units*, SBU) čijom kombinacijom nastaju poliedri koji predstavljaju tercijarne strukture zeolita. Povezivanjem tercijarne strukture zeolita formiraju se trodimenzionalne, mrežaste strukture karakteristične za zeolite (slika 2).^{4,5}



Slika 2. Strukturne jedinice zeolita⁶

Negativni naboj alumosilikatne strukture, koji je posljedica izomorfne zamjene Si^{4+} iona s ionima Al^{3+} neutralizira se ugradnjom hidratiziranih kationa alkalijskih i zemnoalkalijskih metala u strukturnu rešetku.²

Opća formula zeolita je:

$$M'M''_{0.5}[(Al_2O_3)_x(SiO_2)_y(H_2O)_z] \quad (1)$$

gdje su:

- M' i M'' kationi alkalijskih ili zemnoalkalijskih metala
- x i y oksidne varijable
- z broj molekula vode.⁵

1.1.2. Svojstva i primjena zeolita

Zbog specifične strukture zeolita, zeolite karakterizira:

- mala gustoća
- velika poroznost
- visok stupanj hidratacije i kristalnosti
- selektivnost oblika i reverzibilna ionska izmjena
- sposobnost sorbiranja
- koncentriranja ugljikovodika
- termostabilnost

- postojanje kiselih mjesta pri izmjeni iona s protonima.^{7,8}

Zeoliti se ubrajaju među najvažnije materijale u zaštiti okoliša. Veliku primjenu imaju u pročišćavanju voda, kako otpadnih tako i pitkih; površinskih i podzemnih. Procesi pročišćavanja temelje se na procesima ionske izmjene ili adsorpcije na površinu zeolita uslijed čega dolazi do stvaranja stabilnih kompleksa. Danas se zeoliti često koriste u građevini i industriji cementa.⁸

Katalitičko djelovanje zeolita posljedica je karakteristične geometrije i ugrađenih kationa. Unutrašnjost kanala zeolita predstavlja katalitički aktivnu površinu, a kiseli centri katalitički aktivna mjesta. Kao katalizatori prvi put upotrijebljeni su 1962. u procesima krekiranja i hidrokreiranja. Zeoliti kao katalizatori nisu otrovni i štetni za okoliš. Karakteriziraju ih pore određenih dimenzija i velike unutarnje površine kanala te selektivnost prema obliku molekule reaktanta, obliku molekule produkta te obliku molekule u prijelaznom stanju.⁹

1.1.3. Prirodni zeoliti

Prirodni zeoliti su zeoliti nastali uslijed hidrotermalne kristalizacije te djelovanjem vulkanskog pepela u kontaktu s vodom pri temperaturama nižim od 250°C i tlakovima manjim od 200 MPa. Njihova glavna prednost leži u tome što se nalaze u neiscrpnim izvorima kao i njihova ekonomski prihvatljiva eksploatacija.¹⁰ Šest najzastupljenijih zeolitnih minerala prisutnih u sedimentnim naslagama prikazani su slikom 3.



a) habazit



b) klinoptiolit



c) modernit



d) erionit



e) hojlandit



f) filipsit

*Slika 3. Prirodni zeolitni minerali*¹¹⁻¹⁶

1.1.4. Sintetski zeoliti

Sintetski zeoliti su zeoliti dobiveni u laboratoriju koji se zbog čistoće kristalnog proizvoda, ujednačenosti veličina čestica, znatno veće veličine pora i toplinske stabilnosti danas komercijalno češće koriste u odnosu na prirodne zeolite.¹⁷

Sinteza zeolita uključuje hidrotermalnu kristalizaciju alumosilikatnih gelova (nastalih miješanjem otopine aluminata i silicijevog dioksida u prisustvu alkalnih hidroksida i/ili organskih baza) ili otopina u bazičnom okruženju.¹⁷

Tijekom sinteze zeolita može se regulirati omjer silicija i aluminija. Zeoliti s niskim omjerom Si/Al su mnogo polarniji što za posljedicu ima jače sorpcijske sposobnosti. Zeoliti s visokim udjelom silicija odlikuju se većom snagom aktivnih centara odnosno katalitički su aktivniji te posjeduju hidrofobna svojstva.⁷

1.1.4.1. NaX zeolit

Sintetski analog prirodnog zeolita faujasita (slika 4) je NaX zeolit (slika 5).¹⁸



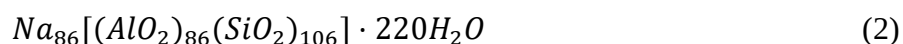
Slika 4. Mineral prirodnog zeolita faujasita¹⁹



Slika 5. Sintetski zeolit NaX

NaX zeolit formira se povezivanjem β -rešetki preko dvostrukog šesteročlanog prstena. Njegova jedinična ćelija sastavljena je od osam okruglih šupljina, osam β -rešetki, šesnaest heksagonalnih prizmi i 192 TO_4 tetraedra.²⁰

Empirijska formula NaX zeolita je:

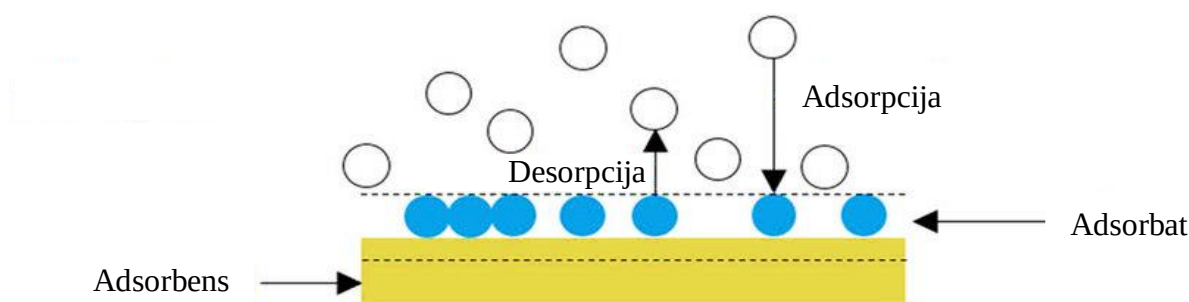


gdje količina aluminija varira od 76 do 96, a voda može reverzibilno napustiti strukturu zeolita.²⁰

NaX zeolit se uglavnom koristi kao adsorbens, ionski izmjenjivač ili katalizator u kemijskoj industriji, plinskoj industriji i preradi nafte. Osim navedenog, primjenu pronalazi i u pročišćavanju prirodnog plina iz spojeva sumpora, za sušenje ulja i plinova, u odvajanju smjese ugljikovodika, itd.¹⁸

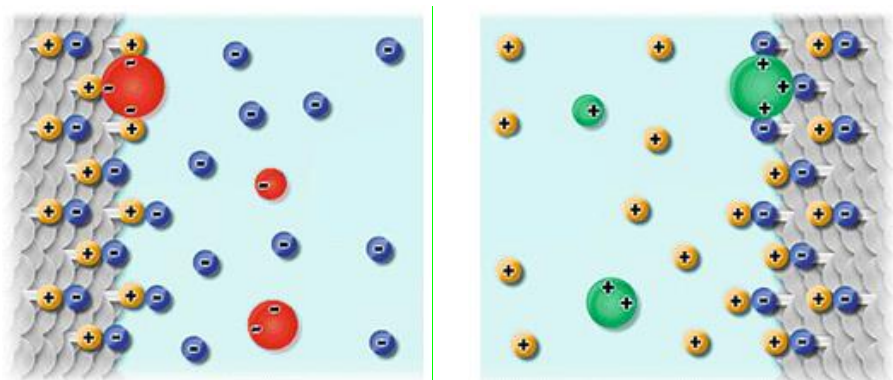
1.2. ADSORPCIJA I IONSKA IZMJENA

Adsorpcija je proces nakupljanja odnosno akumuliranja molekula, atoma ili iona na graničnoj površini dviju faza (slika 6). Posljedica je privlačnih sila koje vladaju između površine adsorbensa i molekula u plinu ili otopini koje se adsorbiraju (adsorbat) te je često popraćena oslobađanjem topline.²¹ Često se koristi za pročišćavanje plinova i otopina, razdvajanje plinovitih smjesa, kromatografiju i ionsku izmjenu.²²



Slika 6. Ilustracijski prikaz procesa adsorpcije²³

Prema novom sustavu klasifikacije za (bio)sorpcijske mehanizme teških metala ionska izmjena pripada adsorpcijskim procesima.²⁴ Ionska izmjena predstavlja proces u kojem se ioni iz otopine zamjenjuju s ekvivalentnom količinom iona iz krutog ionskog izmjenjivača.²⁵ Ovisno o vrsti iona koji se izmjenjuju, razlikuje se kationski i anionski ionski izmjenjivači (slika 7). S obzirom na stupanj disociranosti aktivne grupe, kationski izmjenjivači mogu biti neutralni, slabo i jako kiseli ionski izmjenjivači, dok anionski mogu biti slabo bazni i jako bazni ionski izmjenjivači.²⁶

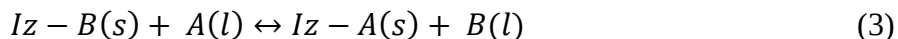


a) Anionski ionski izmjenjivač

b) Kationski ionski

Slika 7. Ionski izmjenjivači²⁷

Opća jednadžba ionske izmjene otopljenih iona (A) s ionima (B) koji su vezani na ionski izmjenjivač (Iz) je:



gdje s predstavlja kruto stanje, a l otopljeno stanje iona.²⁵

Osnovna svojstva svih ionskih izmjenjivača su veličina zrna, stupanj umreženosti, adsorpcija neutralnih soli, sposobnost bubrenja, kapacitet izmjene, selektivnost te brzina izmjene iona.²⁶

Zeoliti predstavljaju najvažnije anorganske kationske izmjenjivače. Pokretljivost kationa i mogućnost njihove zamjene s kationima iz otopine posljedica je slabih elektrostatskih veza. Količina izmjenjivih kationa uvelike ovisi o sastavu i strukturi zeolita. Prijenos iona iz jedne u drugu fazu reguliran je koncentracijom iona i selektivnošću, a uvjetovan je održavanjem elektroneutralnosti.²⁸

1.3. MIJEŠANJE

Jedna od najzastupljenijih operacija u kemijskoj industriji je operacija miješanja, operacija koja se provodi mehaničkim uzgibavanjem fluida. Rezultat operacije miješanja je mehanička, koncentracijska i temperaturna ujednačenost sustava što kao posljedicu ima bolje uvjete za prijenos tvari i topline odnosno provedbu kemijskih reakcija, otapanja, ekstrakcije i dr. Pokretačka sila operacije miješanja je mehanička energija dovedena miješalom, a otpori gibanju ističu se kroz viskoznost kapljevine.^{29,30}

S obzirom na broj faza u sustavu, razlikuje se miješanje u jednofaznim npr. homogeniziranje mješljivih tekućina i miješanje u višefaznim sustavima npr. operacija suspendiranja odnosno miješanje u sustavima čvrsto/kapljevito.³¹

Ovisno o režimu strujanja u sustavu, a koji ovisi o vrsti miješala, brzini miješanja i viskoznosti fluida koji se miješa, razlikuje se operacija miješanja u laminarnom ili turbulentnom području.³⁰

1.3.1. Dizajn sustava za miješanje

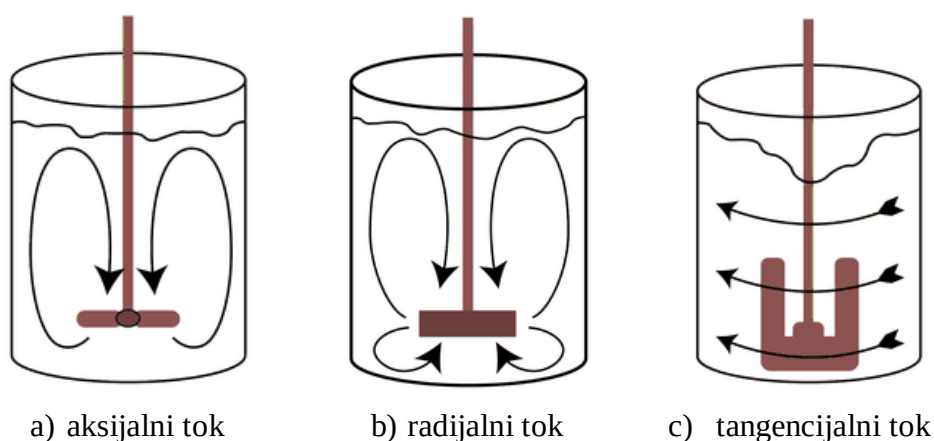
Da bi se ispravno dimenzionirao procesni sustav za operaciju miješanja potrebno je najprije definirati sve geometrijske karakteristike sustava, ispravno odabrati vrstu posude, zatim tip i položaj miješala u sustavu, brzinu vrtnje miješala te snagu potrebnu za postizanje ciljane izmiješanosti u sustavu bez ili s razbijalima virova.²⁹

Operacije miješanja najčešće se izvode u cilindričnim posudama zaobljenog ili ravnog dna u kojima se uslijed intenzivnog miješanja kapljevine često razvijaju vrtlozi koji smanjuju stupanj izmiješanosti sustava budući da uzrokuju površinsku aeraciju. Razvoj vira u sustavu sprječava se korištenjem razbijala virova te postavljanjem miješala pod kutom ili izvan centra posude.³⁰

1.3.2. Vrste miješala

Ovisno o karakteristikama suspenzija ili fluida koje se miješaju, vrsti i namjeni procesa te mjerilu operacije bira se tip miješala koje će se koristiti.³²

Različiti tipovi miješala, različitih geometrijskih karakteristika, razvijaju različite tokove fluida u sustavu koji se miješa – aksijalni, radijalni i tangencijalni (slika 8).³³



Slika 8. Ilustracija tokova fluida³⁴

Tok fluida karakterističan po tome da je paralelan s osovinom tijekom operacije miješanja naziva se aksijalni tok (slika 8a). Fluid se kreće od miješala prema dnu reaktorske posude, nakon toga ide prema njenom vrhu uz stijenke reaktorske posude pa opet prema miješalu.

Karakterističan je za turbinska miješala čije su lopatice nagnute pod kutom manjim od 90° (slika 9) i propelerska miješala (slika 10).³⁵



*Slika 9. PBT miješalo*³⁶

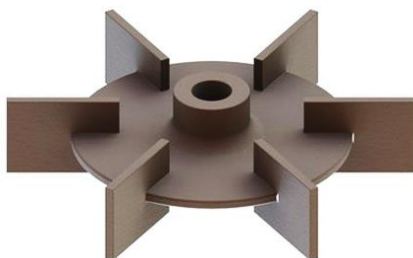


*Slika 10. Propelersko miješalo*³⁷

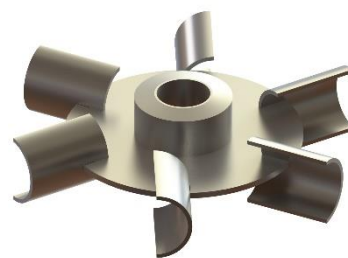
Radijalni tok fluida (slika 8b) je tok karakterističan po tome da je okomit na smjer rotacije miješala. Fluid se kreće paralelno s dnom reaktorske posude prema njenim zidovima otkud se razdvaja u dvije struje; struju usmjerenu prema površini i struju usmjerenu prema dnu reaktorske posude otkud nastavljaju s gibanjem uz osovinu prema miješalu. Karakterističan je za miješala s ravnim lopaticama (slika 11) te disk miješala s ravnim (slika 12) i zakrivljenim lopaticama (slika 13).³⁵



*Slika 11. Miješalo s ravnim lopaticama*³⁸



*Slika 12. Disk miješalo s ravnim lopaticama*³⁹

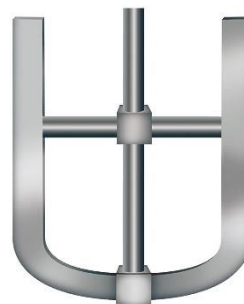


*Slika 13. Disk miješalo sa zakrivljenim lopaticama*⁴⁰

Za spiralna (slika 14) i sidrasta miješala (slika 15) karakterističan je tangencijalni tok (slika 8c).³⁵



Slika 14. Spiralno miješalo⁴¹



Slika 15. Sidrasto miješalo⁴²

1.3.3. Snaga miješanja

Snaga miješanja, odnosno količina energije koju je potrebno utrošiti da se ostvari gibanje fluida u reaktoru ovisi o brzini vrtnje, N (min^{-1}) i promjeru korištenog miješala, D (m), o dinamičkoj viskoznosti, μ ($\text{m}^2 \text{s}^{-1}$) i gustoći fluida, ρ (kg m^{-3}) te o gravitacijskoj akceleraciji, (m s^{-2}). Određuje se iz odnosa modificirane Eulerove značajke koju nazivamo i značajkom snage, N_p , Reynoldsove, Re i Froudeove bezdimenzijske značajke, Fr prema izrazu

$$N_p = kRe^m Fr^n \quad (4)$$

gdje je:

- k konstanta koja ovisi o geometrijskim karakteristikama sustava
- a m i n koeficijenti kriterijalne jednadžbe.⁴³

Raspisivanjem izraza (4) dobiva se izraz

$$\frac{P}{D^5 N^3 \rho} = k \left(\frac{D^2 N \rho}{\mu} \right)^m \left(\frac{DN^2}{g} \right)^n \quad (5)$$

Dijeljenjem značajke snage s modificiranom Froudeovom značajkom dobiva se funkcija snage, Φ definirana izrazom

$$\Phi = \frac{N_p}{Fr^n} = kRe^m \quad (6)$$

U sustavima s razbijalima virova te sustavima u kojima je prisutno laminarno strujanje funkcija snage jednaka je modificiranoj Eulerovoj značajci budući da je $Fr = 1$ jer je $n = 0$. U sustavima u kojima se razvijaju vrtlozi Froudeova značajka je različita od jedinice odnosno njen eksponent se ne zanemaruje i funkcija snage nije jednaka modificiranoj Eulerovoj značajci, odnosno značajci snage.⁴³

1.3.4. Suspendiranje

Suspendiranje predstavlja operaciju miješanja u sustavu s čvrstom i kapljevitom fazom, a kojom se postiže ravnomjerna raspodjela čvrstih čestica u kapljevini, ubrzava kemijska reakcija i proces dobivanja određenog produkta te poboljšava proces otapanja.⁴⁴ U operacijama suspendiranja najčešće se koriste miješala koja razvijaju aksijalan tok fluida i reaktorske posude čije je dno zaobljeno, a visina kapljevine odgovara promjeru posude.³⁰

Ovisno o stanju suspendiranih čestica, odnosno stupnju homogenosti suspenzije razlikuju se stanje nepotpune, potpune, intermedijalne i homogene suspenzije.⁴⁴

Stanje nepotpune suspenzije je stanje koje zbog mirujuće nakupine čestica prisutnih na dnu reaktorske posude karakterizira sporiji prijenos mase. Ako se sve čestice gibaju tj. ne zadržavaju se na dnu reaktorske posude dulje od 2 sekunde kaže se da je ostvareno stanje potpune suspenzije. Najmanja brzina vrtnje miješala kod koje je ostvareno stanje potpune suspenzije naziva se kritična brzina miješanja, N_{JS} (engl. *just suspended impeller speed*). Povećanjem brzine vrtnje miješala suspenzija iz stanja potpune suspenzije prelazi najprije u stanje intermedijalne, a potom u stanje homogene suspenzije. U stanju intermedijalne suspenzije čvrste čestice se ne zadržavaju na dnu reaktorske posude, dok su u stanju homogene suspenzije jednoliko raspodijeljene u cijelom volumenu kapljevine.⁴⁴

1.4. KINETIČKI MODELI

Matematička jednačba u kojoj je brzina reakcije proporcionalna reakcijskim veličinama stanja i parametrima naziva se kinetički model. Usklađivanjem hipotetičkih matematičkih izraza numeričkim metodama linearne i nelinearne regresije i optimiranja s eksperimentalnim podacima dolazi se do kinetičkog modela. Uvijek se bira onaj kinetički model koji najbolje zadovoljava postavljene uvjete.⁴⁵

U ovom radu korišteni su Weber-Morrisov i Blanchardov kinetički model.

1.4.1. Weber-Morrisov model

Weber-Morrisov kinetički model dan je sljedećim izrazom:

$$q_t = k_d t^{\frac{1}{2}} + I \quad (7)$$

gdje je:

- I odsječak na ordinati (mmol g^{-1})
- q_t količina uklonjenog metala po masi zeolita u vremenu t (mmol g^{-1})
- k_d konstanta brzine difuzije ($\text{mmol g}^{-1} \text{ min}^{-1/2}$)
- t vrijeme (min).⁴⁶

Prikazani model 1963. predstavili su Weber i Morris kao grafičku metodu koja se temelji na linearnoj ovisnosti količine uklonjenog metala s drugim korijenom vremena. Metoda se primjenjuje za računanje parametra koji određuje brzinu difuzije, a koristi se da bi se dokazalo jesu li brzina difuzije kroz česticu ili film najsporiji stupanj reakcije.⁴⁶ Ukoliko je $I = 0$, difuzija kroz česticu je najsporiji stupanj reakcije, a ako je $I > 0$ i difuzija kroz film i kroz česticu smatraju se stupnjevima koji ograničavaju ukupnu brzinu reakcije.⁴⁷

Weber-Morrisovim modelom može se izračunati i parametar koji određuje brzinu difuzije tzv. efektivni koeficijent difuzije prema izrazu

$$D_e = \pi \left(\frac{d_p k_d}{12 q_e} \right)^2 \quad (8)$$

gdje je:

- D_e efektivni koeficijent difuzije ($\text{m}^2 \text{ min}^{-1}$)

- d_p promjer čestice (m).⁴⁶

1.4.2. Blanchardov model

Blanchardov kinetički model je model prema kojemu je reakcija sorpcije iona na površini reakcija drugog reda. Brzina te reakcije je odgovorna za kinetiku uklanjanja teških metala.⁴⁸ Blanchardov kinetički model dan je izrazom:

$$\frac{dn}{dt} = K(n_0 - n)^2 \quad (9)$$

integracijom kojeg se dobiva

$$\frac{1}{n_0 - n} - \alpha = Kt \quad (10)$$

gdje je

- n količina M^{2+} iona koja se vezala ili otpustila u svakom trenutku (mmol g^{-1})
- n_0 kapacitet izmjene (mmol g^{-1})
- K konstanta brzine reakcije drugog reda ($\text{g mmol}^{-1} \text{min}^{-1}$).⁴⁸

Za $n = 0$ i $t = 0$ proizlazi da je $\alpha = \frac{1}{n_0}$ te izraz (10) poprima sljedeći oblik:⁴⁹

$$n_0 = \frac{n^2 + Kt}{1 + Knt} \quad (11)$$

Za $n_0 = q_t$, $n = q_e$ i $k_2 = K$, izraz (11) se može napisati kao:

$$q_t = \frac{q_e^2 k_2 t}{1 + k_2 q_e t} \quad (12)$$

gdje je:

- k_2 konstanta brzine reakcije drugog reda ($\text{g mmol}^{-1} \text{min}^{-1}$)
- q_e količina uklonjenog metala po masi adsorbensa u ravnoteži (mmol g^{-1})
- q_t količina uklonjenog metala po masi adsorbensa u vremena t (mmol g^{-1}).⁴⁹

2. EKSPERIMENTALNI DIO

2.1. MATERIJALI I APARATURA

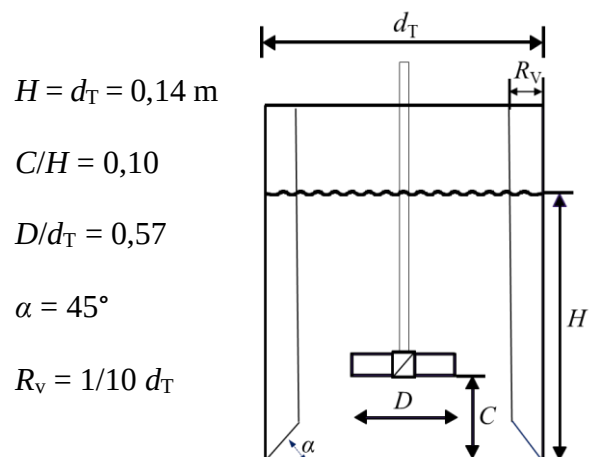
2.1.1. Materijali

U svim eksperimentima korišten je:

- zeolit NaX veličine čestica 0,063 - 0,090 mm, Sigma Aldrich
- otopina bakrovog(II) nitrata trihidrata, $\text{Cu}(\text{NO}_3)_2 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ p.a., Kemika

2.1.2. Aparatura

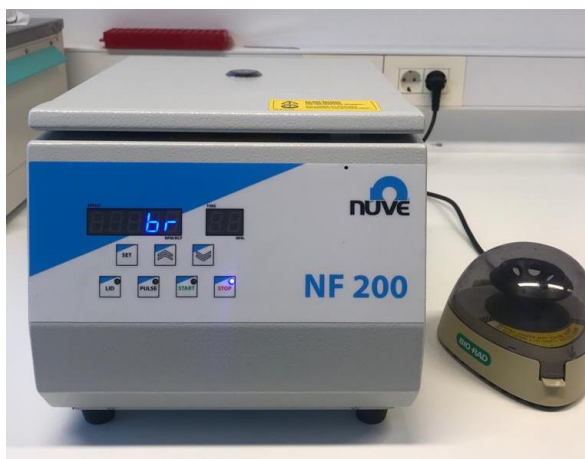
- Kotlasti reaktor



Slika 16. Kotlasti reaktor u termostatiranoj kupelji

Eksperiment se izvodio u staklenom kolastom reaktoru (engl. *Batch Reactor*) ravnog dna i unutarnjeg promjera 0,14 m pri izotermnim uvjetima ($T = 27^\circ\text{C}$). S ciljem suspendiranja čestica zeolita NaX u otopini iona bakra korišteno je turbinsko miješalo s ravnim lopaticama nagnutim pod kutom od 45° , PBT miješalo (engl. *Pitched Blade Turbine*). Da bi spriječili nastajanje "mrtvih zona" i neučinkovito miješanje u reaktor su postavljena razbijala virova standardnih dimenzija ($R_v = 1/10 d_T$) okomito na stijenku reaktora i koja s dnom reaktora zatvaraju kut od 45° .

- Centrifuga



Slika 17. Centrifuga

Centrifuga je uređaj koji se koristi za odvajanje, pripremu i pročišćavanje različitih uzoraka. Princip rada centrifuge temelji se na korištenju centrifugalne sile koju generira rotirajući rotor za odjeljivanje tvari različitih gustoća i različitih veličina čestica u suspenziji ili emulziji, ili za analizu instrumenata pri razdvajanju.⁵⁰

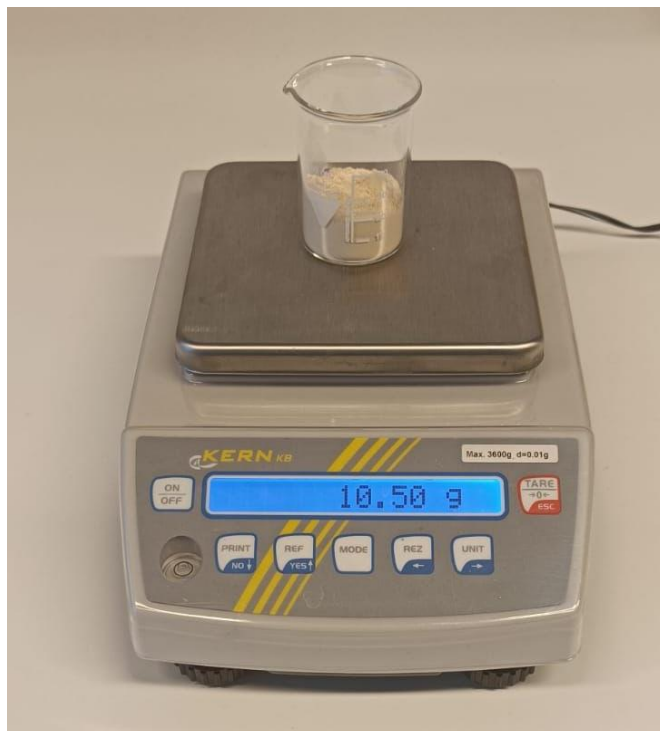
- UV/Vis spektrofotometar



Slika 18. Perkin Elmer Lambda 25 UV/Vis spektrofotometar

UV/Vis spektrofotometar je uređaj koji se primjenjuje za kvantitativno određivanje prijelaznih metala i organskih komponenti u otopini korištenjem ultraljubičastog i vidljivog dijela spektra kako bi se izmjerila kemijska koncentracija tvari u otopini. Sastoji se od izvora zračenja, detektora, monokromatora i uzorka.⁵¹

- Vaga



Slika 19. Vaga

2.1.3. Postupak rada

Kritična brzina vrtnje PBT miješala, odnosno brzina pri kojoj se sve čestice u sustavu kreću, N_{JS} , a koja ovisi o geometrijskim karakteristikama sustava i svojstvima tvari koja se suspendira određena je u prvom dijelu eksperimenta vizualnom, Zwieteringovom metodom u suspenziji 10,50 g zeolita NaX i 2,1 L destilirane vode. Omjer promjera miješala i promjera reaktora, D/d_T , u eksperimentu je iznosio 0,57, dok je omjer udaljenosti miješala od dna reaktora i visine suspenzije, C/H , iznosio 0,10. Stanje suspenzije, odnosno dno reaktora osvijetljeno lampom, promatrano je kroz prozirnu stijenku staklenog reaktora u zrcalu. Brzina vrtnje PBT miješala podizana je do brzine

kod koje se sve čestice u sustavu kreću tj. niti jedna čestica zeolita NaX se ne zadržava na dnu reaktora dulje od jedne do dvije sekunde. Mjerenja su ponovljena 10 puta, a izračunata srednja vrijednost brzine vrtnje miješala te njene postotne vrijednosti uzete su kao brzine za izvođenje kinetičkih eksperimenata.

Pri određenoj kritičnoj brzini vrtnje PBT miješala te pri brzinama vrtnje miješala koje odgovaraju 70%, 90% i 120% njene vrijednosti izmjeren je zakretni moment, τ (N cm). Vrijednost zakretnog momenta iskorištena je za računanje utroška snage miješanja, P (W) za definirane brzine vrtnje miješala, N (min^{-1}) prema izrazu:

$$P = 2 \cdot \pi \cdot \tau \cdot N \quad (13)$$

Provedeni su kinetički eksperimenti u trajanju od 2 sata za eksperimentalno određenu i izračunate brzine vrtnje miješala, pri 27 °C, u suspenziji 2,1 L otopine iona bakra početne koncentracije 5,65 mmol L⁻¹ i 10,50 g NaX zeolita. Uzorci reakcijske smjese uzeti su prije dodatka zeolita u sustav te u prethodno definiranim minutama eksperimenta. Uzorci su nakon uzorkovanja centrifugirani, potom filtrirani i na kraju analizirani UV/Vis spektrofotometrom. Količina bakra na zeolitu izračunata je iz eksperimentalno dobivenih vrijednosti koncentracije iona bakra u otopini prema izrazu:

$$q_t = \frac{(c_0 - c_t) \cdot V}{m} \quad (14)$$

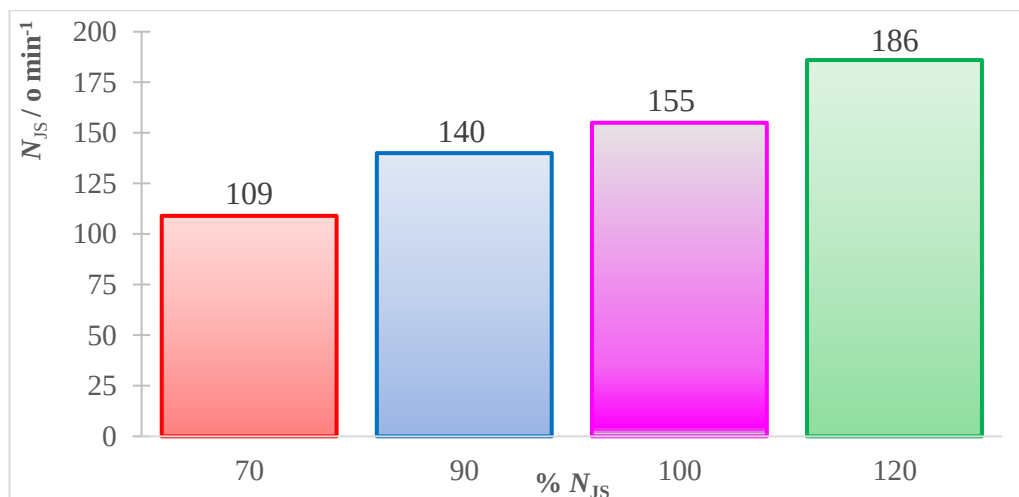
gdje je:

- c_0 koncentracija otopine u trenutku $t = 0$ (mmol L⁻¹)
- c_t koncentracija otopine metala u trenutku t (mmol L⁻¹)
- V volumen otopine iona metala (L).

3. REZULTATI I RASPRAVA

3.1. ODREĐIVANJE UTROŠKA SNAGE

Eksperimentalno određena vrijednost kritične brzina vrtnje PBT miješala za suspenziju 10,5 g zeolita NaX čestica promjera 0,063 - 0,090 mm i 2,1 L otopine iona bakra uz razbijala virova i pri $D/d_T = 0,57$ i $C/H = 0,10$ te njene izračunate postotne vrijednosti prikazani su slikom 20.



Slika 20. Grafički prikaz ovisnosti brzine vrtnje miješala o postotnom odstupanju od vrijednosti N_{JS}

Vrijednosti izmjerenog zakretnog momenta za kritičnu brzinu vrtnje PBT miješala i njene izračunate postotne vrijednosti te izračunate vrijednosti utroška snage za pripadne brzine miješanja dani su u tablici 1.

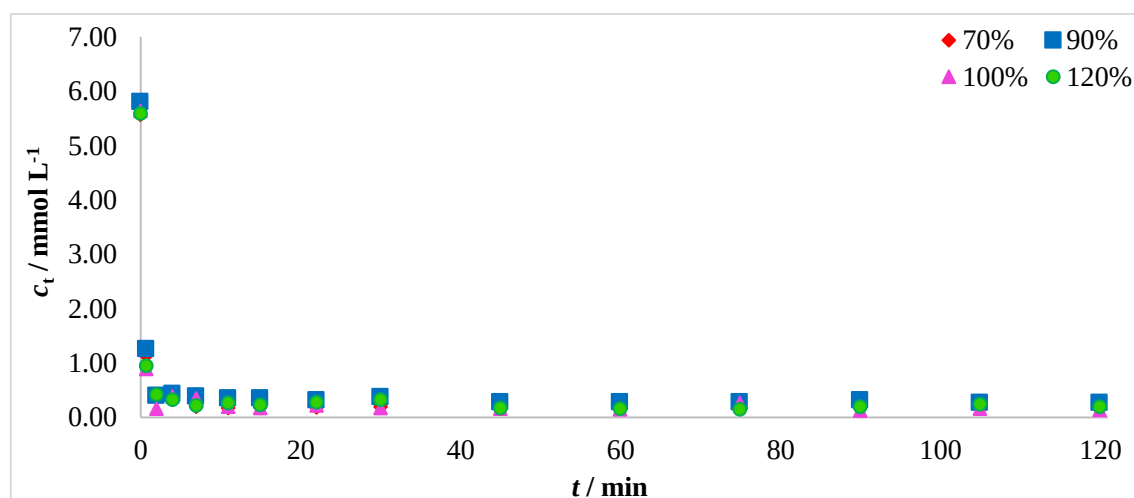
Tablica 1. Vrijednosti izmjerenog zakretnog momenta i izračunatog utroška snage za pripadne brzine vrtnje miješala

% N_{JS}	N , o min^{-1}	τ , N m	P , W
70	109	0,01	0,1141
90	140	0,01	0,2931
100	155	0,01	0,3245
120	186	0,02	0,3894

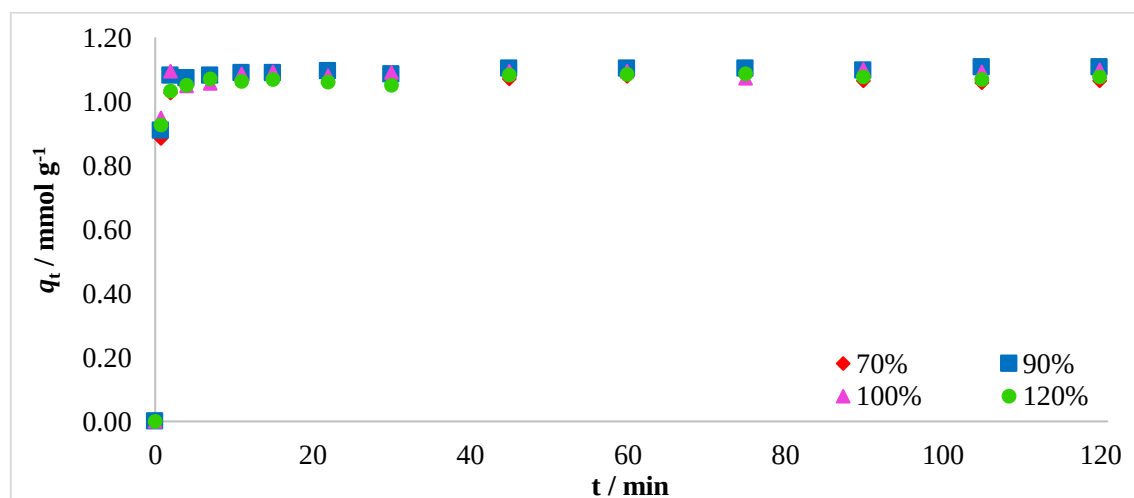
Iz rezultata prikazanih u tablici 1 može se zaključiti da utrošak snage potrebne za provođenje operacije miješanja raste kako raste brzina vrtnje miješala. Dobiveno potvrđuje teorijsku pretpostavku izraza (13) da su utrošak snage miješanja i brzina vrtnje miješala proporcionalni.

3.2. EKSPERIMENTALNI KINETIČKI PODATCI

Slikama 21 i 22 prikazani su dobiveni eksperimentalni kinetički podatci.



Slika 21. Grafički prikaz ovisnosti koncentracije iona bakra u otopini o vremenu pri kritičnoj brzini miješanja i 70%, 90% te 120% njene vrijednosti



Slika 22. Grafički prikaz ovisnosti količine izmijenjenih iona bakra na zeolitu o vremenu pri kritičnoj brzini miješanja i 70%, 90% te 120% njene vrijednosti

Uočava se smanjenje koncentracije iona bakra u otopini s vremenom smanjuje (slika 21), dok količina iona bakra koji se vežu na zeolit NaX s vremenom raste (slika 22). Pad koncentracije iona bakra u otopini, odnosno rast količine iona vezanih na zeolitu NaX tijekom procesa sorpcije u prvih nekoliko minuta procesa (do 4. minute) je brz, nakon čega usporava do uspostave ravnoteže, za sve odabrane brzine vrtnje miješala pri definiranim eksperimentalnim uvjetima. Može se zaključiti kako, pri definiranim eksperimentalnim uvjetima, odstupanje od kritične brzine vrtnje miješala nema značajan utjecaj na količinu sorbiranih iona bakra na zeolitu NaX budući da se dobiveni eksperimentalni podaci skoro preklapaju za sve brzine vrtnje miješala.

3.3. ANALIZA KINETIČKIH PODATAKA

Kako bi se pronašao kinetički model koji najpreciznije opisuje dobivene eksperimentalne kinetičke podatke isti su analizirani matematičkim programskim paketom MATCHAD 15. U radu su korištene metoda linearne regresije za Weber-Morrisov model i metoda nelinearne regresije za Blanchardov model.

Slaganje dobivenih eksperimentalnih kinetičkih podataka i podataka dobivenih korištenim modelima procijenjeno je iz izračunatog korijena srednjeg kvadrata pogreške, odnosno RSME vrijednosti (engl. *Root Mean Square Error*) prema izrazu:

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n-2} \sum_{i=1}^n (y_e - y_t)^2} \quad (15)$$

gdje je:

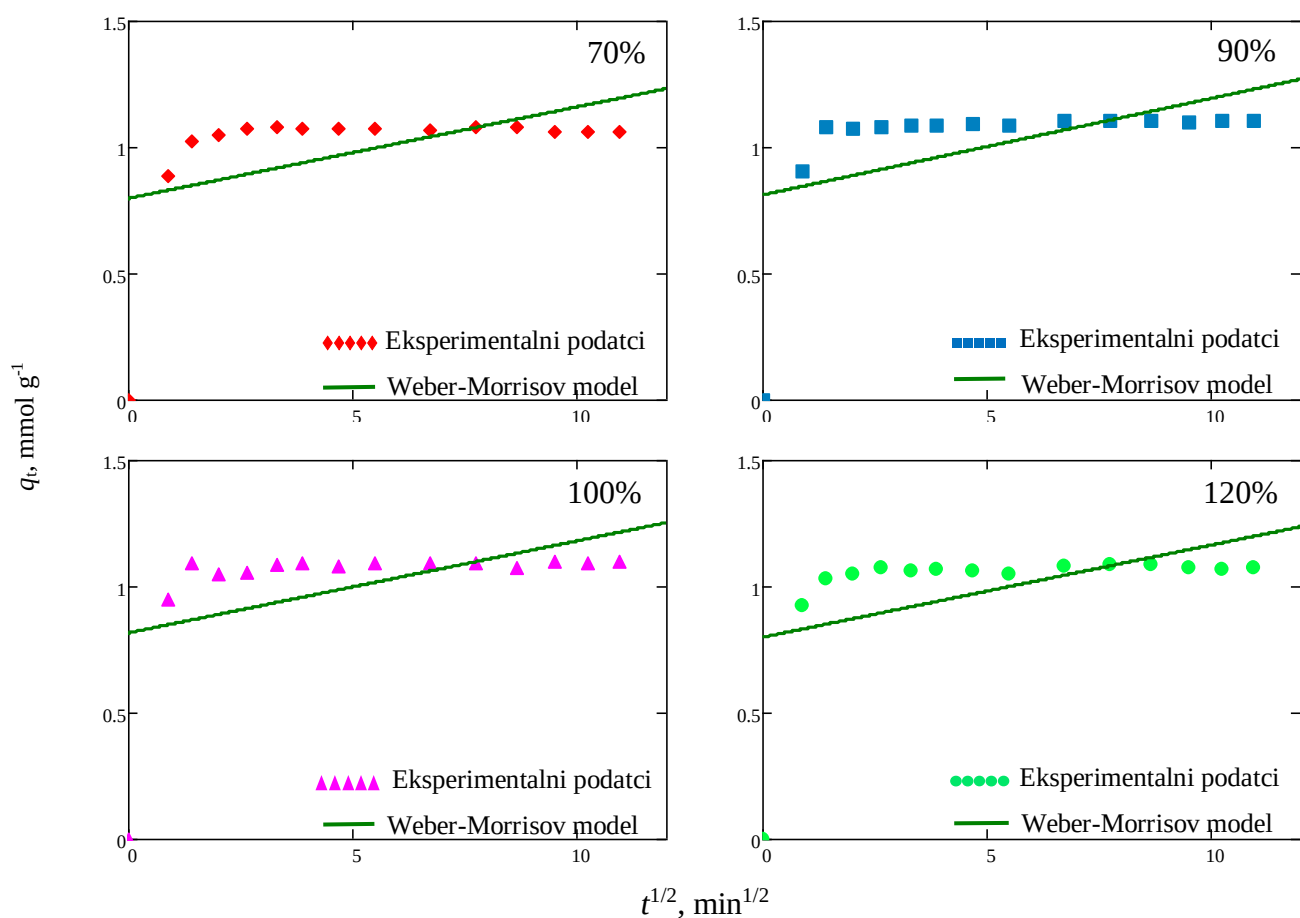
- n broj eksperimentalnih točaka
- y_e eksperimentalni podatak
- y_t vrijednost dobivena modelom.³⁴

Tablicom 2 prikazani su rezultati modeliranja eksperimentalnih podataka s odabranim kinetičkim modelima i procijenjeni parametri modela.

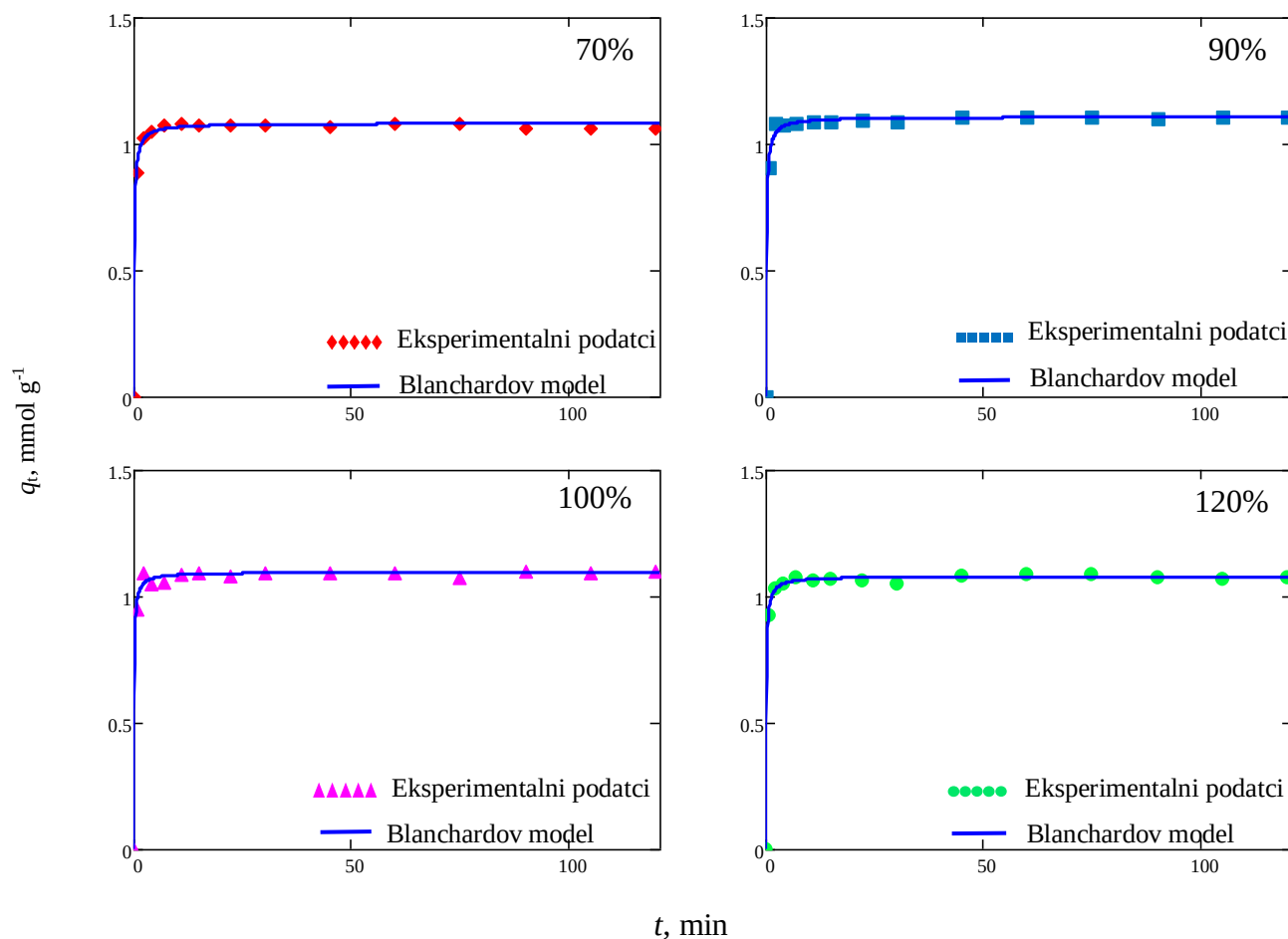
Tablica 2. Parametri kinetičkih modela za dobivene eksperimentalne podatke

$C/H = 0,1$	Parametar	$N, \text{ o min}^{-1}$			
		109	140	155	186
	$q_e, \text{ mmol g}^{-1}$	1,066	1,107	1,099	1,077
Weber-Morrisov model	$k_d, \text{ mmol g}^{-1} \text{ min}^{-1/2}$	0,036	0,038	0,036	0,037
	$I, \text{ mmol g}^{-1}$	0,796	0,810	0,815	0,797
	RMSE	0,254	0,257	0,258	0,252
Blanchardov model	$q_{e_exp}, \text{ mmol g}^{-1}$	1,081	1,106	1,095	1,079
	$k, \text{ mmol g}^{-1} \text{ min}^{-1}$	6,195	6,372	9,138	7,995
	RMSE	0,013	0,016	0,018	0,010

Na slikama 23 i 24 prikazano je slaganje podataka dobivenih kinetičkom analizom dobivenim eksperimentalnim podacima.



Slika 23. Grafički prikaz usporedbe eksperimentalnih podataka s Weber-Morrisovim modelom za različite brzine miješanja



Slika 24. Grafički prikaz usporedbe eksperimentalnih podataka s Blanchardovim modelom za različite brzine miješanja

Iz grafičkog prikaza slaganja dobivenih eksperimentalnih kinetičkih podataka s korištenim modelima vidi se znatno bolje slaganje istih s Blanchardovim modelom. Blanchardov model pretpostavlja da je brzina sorpcije iona koja se događa na površini odgovorna za ukupnu brzinu procesa, a sama sorpcija je reakcija drugog reda tijekom koje se ion bakra iz otopine zamjenjuje se s dva iona natrija iz zeolita. Izračunate RMSE vrijednosti za Blanchardov model su manje od RMSE vrijednosti izračunatih za Weber-Morrisov kinetički model. Navedeno također potvrđuje bolje slaganje Blanchardovog modela s dobivenim eksperimentalnim kinetičkim podacima. Može se zaključiti da kinetika sorpcije iona bakra na zeolitu NaX pri definiranim eksperimentalnim uvjetima prati kinetiku drugoga reda, pri čemu niti međufazna niti unutarčestična difuzija nemaju znatan utjecaj na ukupnu brzinu procesa, odnosno proces sorpcije se odvija u kinetičkom području.

Iz izračunatih vrijednosti konstanti brzine za Blanchardov model može se zaključiti da brzina reakcije ovisi o brzini vrtnje miješala. Reakcija se odvija brže pri većim brzinama vrtnje miješala, a najbrže pri kritičnoj brzini vrtnje miješala, N_{JS} .

4. ZAKLJUČAK

Nakon provedenih eksperimenata i iz dobivenih eksperimentalnih podataka koji se odnose na sorpciju iona bakra na NaX zeolitu s česticama reda veličine 0,063 - 0,090 mm pri izotermnim uvjetima ($T = 27^{\circ}\text{C}$), i pri različitim brzinama vrtnje PBT miješala, mogu se donijeti sljedeći zaključci:

1. Za sve primijenjene brzine miješanja, kemijska reakcija je najsporiji stupanj.
2. Reakcija sorpcije bakra na zeolitu je reakcija drugog reda i odvija se u kinetičkom području.
3. Rast količine iona vezanih na NaX zeolitu je brz prve četiri minute procesa nakon čega usporava do uspostave ravnoteže.
4. Reakcija sorpcije se najbrže odvija pri kritičnoj brzini vrtnje miješala odnosno pri 155 o min^{-1} .
5. Utrošak snage se povećava s porastom brzine vrtnje miješala; najveći je pri brzini vrtnje miješala od $120\% N_{JS}$.

5. LITERATURA

1. B. M. Weckhuysen, J. Yu, Recent advances in zeolite chemistry and catalysis, Chem. Soc. Rev. **44** (2015) 7022-7024, doi:10.1039/c5cs90100f.
2. B. Subotić, J. Bronić, A. Čizmek, T. Antonić, C. Kosanović, Zeoliti: Svojstva, uporaba, istraživanje, Kem. Ind. **43(12)** (1994) 475-487.
3. <https://www.researchgate.net/publication/328345714/figure/fig2/AS:682790731399169@1539801404206/Diagram-of-the-assembly-of-SiO-4-and-AlO-4-tetrahedra.ppm> (26.8.2021.).
4. P. Čerina, UV stabilnost termokromne boje, Završni rad, Grafički fakultet, Zagreb, 2014.
5. T. Kovačić, B. Andričić, Kataliza (skripta), Kemijsko-tehnološki fakultet, Split, 2010, str. 120-123.
6. <https://www.researchgate.net/profile/Anderson-Schwanke/publication/322987622/figure/fig2/AS:591402228518920@1518012687879/Tetrahedral-primary-units-TO-4-forming-the-secondary-building-units-SBUs-and-their.png> (4.8.2021).
7. M. Król, Natural vs. Synthetic Zeolites, Crystals **10** (2020) 622; doi:10.3390/cryst10070622.
8. B. Vojnović, K. Margeta, M. Šiljeg, Š. Cerjan Stefanović, Lj. Bokić, Primjena prirodnih zeolita u zaštiti okoliša, Sigurnost **55(3)** (2013) 209-218.
9. V. Marić, Optimizacija veličine i brzine okretaja SBT miješala za uklanjanje bakra iz otopine, Završni rad, Kemijsko-tehnološki fakultet, Split, 2017.
10. I. Nuić, Istraživanje procesa u koloni s nepomičnim slojem u sustavu prirodni zeolit-vodena otopina olovova i cinkova nitrata, Doktorski rad, Kemijsko-tehnološki fakultet, Split, 2013.
11. <https://www.mineralienatlas.de/VIEWmaxFULL.php/param/1154499489-Chabasit-Ca.jpg> (3.6.2021.).
12. <https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/2/2e/Clinoptilolite-Na-269082.jpg/260px-Clinoptilolite-Na-269082.jpg> (3.6.2021.).
13. <https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/9/9a/Mordenite-178958.jpg/260px-Mordenite-178958.jpg> (3.6.2021.).

14. <https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/d/d9/Erionite-161794.jpg>
(3.6.2021.).
15. <https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/2/2c/Heulandite-160733.jpg>
(3.6.2021.).
16. <https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/a/a0/Phillipsite-180014.jpg/220px-Phillipsite-180014.jpg> (3.6.2021.).
17. *B. Bognadov, D. Georgiev, I. Markovska, Y. Hristov*, Synthetic Zeolites: Structure, Clasification, Current Trends in Zeolite Synthesis Review, International Science Conference, 2009.
18. *D. Georgiev, B. Bogdanov, I. Markovska*, A study on the synthesis and structure of Zeolite NaX, Journal of Chemical Technology and Metallurgy, **48 (2)** (2013) 168-173.
19. <https://www.mineralienatlas.de/VIEWmax.php?param=1358432206&width=320>
(12.8.2021.).
20. *S. Svilović*, Studij kinetike ionske izmjene bakra na zeolitu NaX, Disertacija, Kemijsko-tehnološki fakultet, Split, 2009.
21. *M. Tadić*, Adsorpcija albendazola na aktivni ugljen, Završni rad, Fakultet kemijskog inženjerstva i tehnologije, Zagreb, 2016.
22. *M. Velcl*, Određivanje mehanizma adsorpcije na adsorbensu pripremljenom od ljuske lješnjaka, Završni rad, Veleučilište u Požegi, Požega, 2018.
23. https://www.researchgate.net/profile/Abolhasan-Ameri/publication/346849698/figure/fig6/AS:981980644638720@1611133838469/The-general-mechanism-of-the-adsorption-process_W640.jpg (4.8.2020.).
24. *A. Robalds, G. M. Naja, M. Klavins*, Highlighting inconsistencies regarding metal biosorption, J. Hazard. Mater. **304** (2016) 553–556., doi:10.1016/j.jhazmat.2015.10.
25. *I. Mijatović, M. Matošić*, Tehnologija vode, Interna skripta, Prehrambeno-biotehnološki fakultet, Zagreb, 2009.
26. *P. Dabić*, Tehnološki procesi anorganske industrije (skripta), Kemijsko-tehnološki fakultet, Split, 2020, str. 341-345.

27. <https://www.assignmentexpert.com/image?k=ffb1fa414d69d7f491bbfe73b6eed994> (4.8.2021.).
28. *M. Rožić, Z. Bolanča, Š. Cerjan-Stefanović*, Prirodni zeoliti i mogućnost njihove primjene u kontroli polutanata grafičke industrije, *Kem. Ind.* **53 (10)** (2004) 449-458.
29. *Procesi prijenosa i separacija*, Zavod za mehaničko i toplinsko procesno inženjerstvo, Fakultet kemijskog inženjerstva i tehnologije, Zagreb, 2020.
30. *G. Matijašić*, Jedinične operacije u ekoinženjerstvu, skripta-2. dio, Fakultet kemijskog inženjerstva i tehnologije, Zagreb, 2016.
31. *A. Čović-Stanić*, Utjecaj tipa miješala na karakteristike raspršenja plina u kapljevini, Diplomski rad, Kemijsko-tehnološki fakultet, Split, 2021.
32. *Kazemzadeh, F. Ein-Mozaffari, A. Lohi*, Effect of impeller type on mixing of highly concentrated slurries od large particles, *Particuology* **50** (2020) 88-99, doi:10.1016/j.partic.2019.07.0.
33. *M. Čosić*, Priručnik za laboratorijske vježbe iz kolegija "Tehnološke operacije", Kemijsko-tehnološki fakultet, Split, 2012.
34. https://cdn.shopify.com/s/files/1/1092/8246/files/Feature_Image_Flow_Pattern_grande.png?v=1547827151(4.8.2021.).
35. *M. Hraste*, Mehaničko procesno inženjerstvo, HINUS, Zagreb, (2003.) 120-134.
36. https://www.indco.com/images/default-source/product-images/accessories/pl-ati-12_a.jpg?sfvrsn=c6ccb0d1_0 (28.8.2021.).
37. https://fusionfluid.com/images/Mixing_Impellers/Marine_Prop_PR3/gallery/Marine%20Prop%20Top%20View.jpg (28.8.2021.).
38. <https://ibcresource.com/wp-content/uploads/2018/12/straight-turbines-4-225x225.jpg> (28.8.2021.).
39. <https://4.imimg.com/data4/KR/YW/MY-6907292/rushton-turbine-500x500.jpg> (28.8.2021.).
40. https://fusionfluid.com/images/Mixing_Impellers/Smith_Turbine/gallery/Smith%20Top%20View.jpg (28.8.2021.).
41. https://asset.conrad.com/media10/isa/160267/c1/-/hr/1716315_BB_01_LO/image.jpg?x=600&y=600 (28.8.2021.).

42. <https://www.nov.com/-/media/nov/images/products/caps/process-and-flow-technologies/anchor-impeller/anchor-impeller-render.jpg?h=1080&la=en-us&w=1920&cropregion=0,0,1920,1080&hash=508B6FE9184C0B110951EE2FBBCFCF15> (28.8.2021.).
43. *M. Ćosić*, Predlošci za predavanja iz Tehnoloških operacija, Kemijsko-tehnološki fakultet, Split, 2020.
44. *I. Milanović*, Utjecaj promjera radijalnog SBT miješala na stanje potpune suspenzije zeolita, Završni rad, Kemijsko-tehnološki fakultet, Split, 2017.
45. *V. Kosar*, Kemijsko reakcijsko inženjerstvo (nastavni tekstovi), Fakultet kemijskog inženjerstva i tehnologije, Zagreb, 2017.
46. *S. Svilović*, Vježbe iz Kemijskih reaktora, Kemijsko-tehnološki fakultet, Split, 2017, str. 16-26.
47. *A. Bašić, S. Svilović*, Effect of geometrical and operating mixing parameters on copper adsorption on zeolite NaX, *Desalination Water Treat.*, **209** (2021) 197-203. doi:10.5004/dwt.2021.26524.
48. *W. Plazinski, W. Rudzinski, A. Plazinska*, Theoretical models of sorption kinetics including a surface reaction mechanism: A review, *Advances in Colloid and Interface Science* **152** (2009) 2-13, doi:10.1016/j.cis.2009.07.009.
49. *H. N. Tran, S. You, A. Hosseini-Bandegharai, H. Chao*, Mistakes and inconsistencies regarding adsorption of contaminants from aqueous solutions: A critical review, *Water Res.* **120** (2017) 88-116, doi:10.1016/j.watres.2017.04.014.
50. <http://m.hr.lifescientz1989.com/info/laboratory-centrifuge-principle-and-application-30043012.html> (18.8.2021.).
51. *A. Ćeranić*, Izbor membranskih filtara za mjerenje otopljenog organskog ugljika, Završni rad, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2016.