

SVEUČILIŠTE U SPLITU
KEMIJSKO-TEHNOLOŠKI FAKULTET

UTJECAJ PROMJERA RADIJALNOG SBT MIJEŠALA NA STANJE
POTPUNE SUSPENZIJE ZEOLITA

ZAVRŠNI RAD

IRIS MILANOVIĆ

Matični broj: 803

Split, rujan 2017.

SVEUČILIŠTE U SPLITU
KEMIJSKO-TEHNOLOŠKI FAKULTET
PREDDIPLOMSKI STUDIJE KEMIJSKE TEHNOLOGIJE
KEMIJSKO INŽENJERSTVO

UTJECAJ PROMJERA RADIJALNOG SBT MIJEŠALA NA STANJE
POTPUNE SUSPENZIJE ZEOLITA

ZAVRŠNI RAD

IRIS MILANOVIĆ

Matični broj: 803

Split, rujan 2017.

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

**INFLUENCE OF RADIAL SBT IMPELLER DIAMETER ON THE
STATE OF COMPLETE SUSPENSION OF ZEOLITE**

BACHELOR THESIS

IRIS MILANOVIĆ,
Parent number: 803

Split, September 2017

TEMELJNA DOKUMENTACIJSKA KARTICA

ZAVRŠNI RAD

Sveučilište u Splitu

Kemijsko-tehnološki fakultet u Splitu

Preddiplomski studij kemijske tehnologije, smjer: Kemijsko inženjerstvo

Znanstveno područje: Tehničke znanosti

Znanstveno polje: Kemijsko inženjerstvo

Tema rada je prihvaćena na 21. sjednici Fakultetskog vijeća Kemijsko tehnološkog fakulteta u Splitu

Mentor: doc. dr. sc. Marija Ćosić

Pomoć pri izradi: dr. sc. Antonija Čelan

UTJECAJ PROMJERA RADIJALNOG SBT MIJEŠALA NA STANJE POTPUNE SUSPENZIJE ZEOLITA

Iris Milanović, 803

Sažetak: Postizanje stanja potpune suspenzije čestica zeolita u reaktoru s mehaničkim miješanjem može značajno ovisiti geometrijskim karakteristikama reaktora, posebice miješala. U ovom radu sagledan je utjecaj promjera radijalnog turbinskog miješala s četiri ravne lopatice (tzv. SBT miješalo) na postizanje stanja potpune suspenzije zeolita NaX u otopini bakrovog(II) nitrata.

Ispitivanja su provedena u reaktoru promjera $d_T = 0,014$ m u kojem su bila postavljena četiri razbijala virova. Omjer visine stupca kapljevine i promjera reaktora, (H/d_T) , iznosio je 1,0, omjer udaljenosti miješala od dna posude i visine stupca kapljevine (C/H) , iznosio je 0,33, dok je u svrhu ispitivanja promjera miješala na promatrani proces, omjer promjera miješala i promjera reaktora, (D/d_T) , mijenjan u području od 0,46 do 0,68. Za svaki ispitivani promjer SBT miješala određena je brzina vrtnje miješala potrebna za postizanje stanja potpune suspenzije, N_{JS} , pri četiri različite masene koncentracije zeolita, γ , u području od 4,91 do 8,59 g/dm³. U cilju pronalaženja optimalne konfiguracije miješalice za suspendiranje zeolita u radu je također sagledavan i utrošak snage miješala pri ispitivanim promjerima miješala i masama zeolita. Na osnovu eksperimentalnih ispitivanja utvrđeno je da se s povećanjem promjera miješala smanjuje kritična brzina vrtnje miješala. Također je uočeno da se kritična brzina miješanja smanjuje i sa smanjenjem koncentracije zeolita, međutim ovaj utjecaj je znatno manje izražen od utjecaja promjera miješala. Utrošak snage miješanja smanjuje se s povećanjem veličine miješala, te je minimalan pri najvećem promjeru miješala ($D/d_T = 0,68$) i najmanjoj korištenoj koncentraciji zeolita. Međutim, da bi se mogla predložiti optimalna konfiguracija miješalice osim stanja potpune suspenzije zeolita trebalo bi također sagledati i koncentraciju izmijenjenih Na^+ na primijenjenom zeolitu pri ovom stanju.

Ključne riječi: suspendiranje, promjer miješala, snaga miješanja, zeolit

Rad sadrži: 49 stranica, 17 slika, 3 tablica, 32 priloga, 28 literaturnih referenci

Jezik izvornika: hrvatski

Sastav povjerenstva za obranu:

1. Izv. prof. dr. sc. Sandra Svilović - predsjednik
2. Dr. sc. Ivona Nuić - član
3. Doc. dr. sc. Marija Ćosić, - član mentor

Datum obrane: 29. rujna 2017.

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

BASIC DOCUMENTATION CARD

BACHELOR THESIS

University of Split

Faculty of Chemistry and Technology in Split

Undergraduate 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. 21.

Mentor: Marija Ćosić – PhD, assistant prof.

Technical assistance: Antonija Čelan - PhD, postdoctoral researcher

INFLUENCE OF RADIAL SBT IMPELLER DIAMETER ON THE STATE OF COMPLETE SUSPENSION OF ZEOLITE

Iris Milanović, 803

Abstract: The state of the complete suspension of the zeolite particles in a mechanical agitated system may be significantly dependent on the geometric characteristics of the reactor, in particular, the impeller geometry. This research work focuses on the influence of the radial impeller diameter of straight blade turbine (abbrev. SBT impeller) on the state of complete suspension of zeolite NaX in copper(II) nitrate solution. The experiments were carried out in a glass reactor with a diameter of 0.14 m. Liquid height to vessel diameter ratio H/d_T was 1.0, and the impeller off-bottom clearance to liquid height ratio, C/H , was 0.33. During the experiment, the diameter of the reactor, D/d_T , was varied in the range of 0.46 - 0.68. For each SBT diameter tested, a specific impeller speed was required to achieve the state of complete suspension, N_{JS} , at four different zeolite concentration masses, γ , ranged from 4.91 - 8.59 g/dm³. To find the optimum configuration for zeolite suspension, the energy used by the impeller when testing the diameters and zeolite masses was also applied. In conclusion, it was found that an increase of impeller diameter reduces the critical impeller speed. Additionally, it was discovered that the critical impeller speed decreases with a reduction of zeolite concentration, however, this effect is considerably less pronounced than the aforementioned relationship. Power consumption decreases with an increase of impeller diameter and is minimal at the largest diameter used ($D/d_T = 0.68$). However, in order to suggest the optimum configuration, not only the state of complete suspension of zeolite, but also the concentration of Na ions exchanged on the applied zeolite should be investigated as well.

Keywords: complete suspension, impeller diameter, power consumption, zeolite

Thesis contains: 49 pages, 17 pictures, 3 tables, 32 contributions, 28 literary references

Original in: Croatian

Defence Committee:

- | | |
|--|--------------|
| 1. Sandra Svilović - PhD, associate prof. | chair person |
| 2. Ivona Nuić - PhD, postdoctoral researcher | member |
| 3. Marija Ćosić – PhD, assistant prof. | supervisor |

Defence date: 29 September 2017

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

Završni rad izrađen je u Zavodu za kemijsko inženjerstvo, Kemijsko-tehnološkog fakulteta u Splitu pod mentorstvom doc. dr. sc. Marije Čosić, u razdoblju od 6. travnja do 30. travnja 2017. godine.

Ispitivanja u ovom radu sastavni su dio projekta HETMIX (8959) kojeg financira Hrvatska zaklada za znanost.

Zahvaljujem se mentorici doc. dr.sc. Mariji Čosić na pomoći i izdvojenom vremenu pri izradi ovog završnog rada. Također izražavam zahvalnost dr. sc. Antoniji Čelan na pomoći pri ekperimentalnom dijelu završnog rada te svojoj obitelji i prijateljima.

Iris Milanović

ZADATAK ZAVRŠNOG RADA

1. Izvršiti postupak suspendiranja čestica zeolita NaX u miješalici primjenom radijalnog turbinskog miješala s četiri ravne lopatice (tzv. SBT miješalo).
2. Sagledati utjecaj promjera radijalnog miješala na minimalnu brzinu vrtnje potrebnu za postizanje stanja potpune suspenzije zeolita pri različitim masenim koncentracijama suspenzije.
3. Usporediti eksperimentalno određene minimalne brzine vrtnje potrebne za postizanje stanja potpune suspenzije s onima dobivenim primjenom Zwieteringove korelacije.
4. Sagledati utjecaj promjera radijalnog SBT miješala na utrošak snage miješanja pri stanjima potpune suspenzije čestica zeolita.
5. Na temelju provedenih ispitivanja izvršiti analizu djelotvornosti upotrijebljenih konfiguracija pri suspendiranju čestica zeolita.

SAŽETAK

Postizanje stanja potpune suspenzije čestica zeolita u reaktoru s mehaničkim miješanjem može značajno ovisiti geometrijskim karakteristikama reaktora, posebice miješala. U ovom radu sagledan je utjecaj promjera radijalnog turbinskog miješala s četiri ravne lopatice (tzv. SBT miješalo) na postizanje stanja potpune suspenzije zeolita NaX u otopini bakrovog(II) nitrata.

Ispitivanja su provedena u reaktoru promjera $d_T = 0,014$ m u kojem su bila postavljena četiri razbijala virova. Omjer visine stupca kapljevine i promjera reaktora, H/d_T , iznosio je 1,0, omjer udaljenosti miješala od dna posude i visine stupca kapljevine C/H iznosio je 0,33, dok je u svrhu ispitivanja promjera miješala na promatrani proces, omjer promjera miješala i promjera reaktora, D/d_T , mijenjan u području od 0,46 do 0,68.

Za svaki ispitivani promjer SBT miješala određena je brzina vrtnje miješala potrebna za postizanje stanja potpune suspenzije, N_{JS} , pri četiri različite masene koncentracije zeolita, γ , u području od 4,91 do 8,59 g/dm³. U cilju pronalaženja optimalne konfiguracije miješalice za suspendiranje zeolita u radu je također sagledavan i utrošak snage miješala pri ispitivanim promjerima miješala i masama zeolita.

Na osnovu eksperimentalnih ispitivanja utvrđeno je da se s povećanjem promjera miješala smanjuje kritična brzina vrtnje miješala. Također je uočeno da se kritična brzina miješanja smanjuje i sa smanjenjem koncentracije zeolita, međutim ovaj utjecaj je znatno manje izražen od utjecaja promjera miješala. Utrošak snage miješanja smanjuje se s povećanjem veličine miješala, te je minimalan pri najvećem promjeru miješala ($D/d_T = 0,68$) i najmanjoj korištenoj koncentraciji zeolita. Međutim, da bi se mogla predložiti optimalna konfiguracija miješalice osima stanja potpune suspenzije zeolita trebalo bi također sagledati i koncentraciju izmijenjenih Na⁺ na primijenjenom zeolitu pri ovom stanju.

Ključne riječi: suspendiranje, promjer miješala, snaga miješanja, zeolit

SUMMARY

The state of the complete suspension of the zeolite particles in a mechanical agitated system may be significantly dependent on the geometric characteristics of the reactor, in particular, the impeller geometry. This research work focuses on the influence of the radial impeller diameter of straight blade turbine (abbrev. SBT impeller) on the state of complete suspension of zeolite NaX in copper(II) nitrate solution.

The experiments were carried out in a glass reactor with a diameter of 0.14 m. Liquid height to vessel diameter ratio H/d_T was 1.0, and the impeller off-bottom clearance to liquid height ratio, C/H , was 0.33. During the experiment, the diameter of the reactor, D/d_T , was varied in the range of 0.46 - 0.68.

For each SBT diameter tested, a specific impeller speed was required to achieve the state of complete suspension, N_{JS} , at four different zeolite concentration masses, γ , ranged from 4.91 - 8.59 g/dm³. To find the optimum configuration for zeolite suspension, the energy used by the impeller when testing the diameters and zeolite masses was also applied.

In conclusion, it was found that an increase of impeller diameter reduces the critical impeller speed. Additionally, it was discovered that the critical impeller speed decreases with a reduction of zeolite concentration, however, this effect is considerably less pronounced than the aforementioned relationship. Power consumption decreases with an increase of impeller diameter and is minimal at the largest diameter used, ($D/d_T = 0.68$) However, in order to suggest the optimum configuration, not only the state of complete suspension of zeolite, but also the concentration of Na ions exchanged on the applied zeolite should be investigated as well.

Keywords: suspension, impeller diameter, power consumption, zeolite

SADRŽAJ

UVOD.....	1
1. OPĆI DIO.....	3
1.1. MIJEŠANJE U PROCESNOM INŽENJERSTVU.....	4
1.1.1. Provedba operacije miješanja.....	5
1.1.2. Snaga miješanja.....	7
1.2. SUSPENDIRANJE.....	10
1.2.1. Stanje potpune suspenzije.....	12
1.2.2. Stanje nepotpune suspenzije.....	14
1.2.3. Stanje homogene suspenzije.....	14
1.2.4. Stanje intermedijalne suspenzije.....	14
1.3. ZEOLITI.....	15
1.3.1. Zeolit NaX.....	16
1.3.2. Primjena zeolita.....	16
1.5. IONSKA IZMJENA.....	17
2. EKSPERIMENTALNI DIO.....	19
2.1. METODIKA.....	20
2.1.1. Aparatura za provedbu eksperimenta.....	20
2.1.2. Provedba ekperimenta.....	22
3. REZULTATI RADA.....	24
3.1. Utjecaj promjera radijalnog SBT miješala na minimalnu brzinu vrtnje potrebnu za suspendiranje zeolita NaX.....	25
3.2. Usporedba ekperimentalnih i teorijski izračunatih vrijednosti minimalne brzine vrtnje za postizanje stanja potpune suspenzije zeolita.....	29
3.3. Određivanje zakretnog momenta miješala pri stanju potpune suspenzije zeolita.....	31
3.4. Određivanje utroška snage miješanja pri stanju potpune suspenzije.....	35
4. RASPRAVA.....	36
5. ZAKLJUČAK.....	42
6. LITERATURA.....	44
7. PRILOZI.....	47
7.1. SIMBOLI.....	48

UVOD

Brojne operacije u kemijskoj industriji uključuju postupak suspendiranja čvrstih čestica u kapljevitom stanju. Poznato je da se suspendiranje primjenjuje u slučajevima kada se želi postići ravnomjernija raspodjela čvrstih čestica u korištenom reaktorskom sustavu te ubrzati postupak otapanja ili nastajanja određenog produkta. Pri tome, čvrsta faza može biti prisutna u sustavu kao element koji ne sudjeluje direktno u reakciji (npr. katalizator), ali isto tako postoji cijeli niz operacija u kojima su čvrste čestice direktno podvrgnute određenim fizikalnim i/ili kemijskim promjenama. U većini procesa gustoća čvrste čestice je veća od gustoće kontinuirane, kapljevite faze s kojom su čestice u kontaktu. Suspendiranjem se tada ostvaruje podizanje čestica s dna reaktora i njihova ugradnja u osnovnu masu kapljevine. Geometrija miješalice u kojoj će se provoditi suspendiranje može značajno utjecati na ovaj postupak, a posebice geometrija miješala.

U ovom radu izvršeno je suspendiranje čestica zeolita NaX. Zeoliti ili molekulska sита su hidratizirani prirodni i/ili sintetski alumosilikatni spojevi jedinstvene prostorno-mrežne strukture sastavljene od SiO_4 i AlO_4 tetraedara spojenih preko zajedničkih kisikovih atoma. Različitim prostornim povezivanjem sekundarnih strukturnih jedinica nastaju poliedri koji čine tercijarne strukture, a njihovim povezivanjem nastaju prostorno mrežaste strukture karakteristične za zeolite. Zeoliti se koriste kao ionski izmjenjivači koji vlastite ione izmjenjuju s ionima iz kapljevine. Upravo zbog ovog svojstva vrlo često se koriste za pročišćavanje voda od teških metala, kao pročišćivači zraka, pri obradi radioaktivnog otpada itd.

U slučaju kada se ionska izmjena na zeolitima provodi u suspenziji, miješanjem je potrebno ostvariti visoki koeficijent prijenosa tvari. Naime, koeficijent prijenosa tvari naglo raste s povećanjem brzine vrtnje miješala sve dok ona ne postigne vrijednost koja će osigurati postizanje stanja potpune suspenzije. Daljnjim povećanjem brzine vrtnje miješala koeficijent prijenosa tvari se može povećati najviše za 50%, dok će istodobno povećanje utroška snage miješanja biti deseterostruko veće. Iz ovog razloga optimalni uvjeti često se postižu upravo pri stanju potpune suspenzije.

Cilj ovog rada je ispitati utjecaj promjera radijalnog turbinskog miješala na stanje potpune suspenzije čestica zeolita NaX te snagu miješanja koju je pri tom stanju potrebno

privedi sustavu. Ova ispitivanja predstavljaju dio istraživanja kojima se nastoje odrediti optimalni uvjeti miješanja za provedbu procesa ionske izmjene na zeolitu NaX iz otopine bakrovog(II) nitrata.

1. OPĆI DIO

1.1. MIJEŠANJE U PROCESNOM INŽENJERSTVU

Miješanje se može definirati kao gibanje fluida i/ili čestica kako bi se postigao odgovarajući procesni rezultat, obično homogenost u koncentracijskom ili temperaturnom smislu. U pravilu ta se operacija koristi uvijek u heterogenim sustavima, tj. kada se želi ubrzati kemijska reakcija, proces otapanja, pospješiti kristalizacija, ubrzati prijenos topline kroz stijenke posude i slično.⁽¹⁾

Miješanje se smatra najzastupljenijom jediničnom operacijom kemijske industrije jer omogućuje postizanje dobre izmiješanosti i/ili kontakt dviju faza. S obzirom na faze koje sudjeluju u miješanju, miješanje se može odvijati u homogenim i heterogenim sustavima dviju ili više faza.

Primjer miješanja u jednofaznim sustavima je homogenizacija mješljivih kapljevina. Ovakvo miješanje se odvija s ciljem postizanja zadovoljavajućeg stupnja izmiješanosti u prihvatljivom vremenu miješanja. Kritični parametri za dizajn miješalica za ovakve sustave su broj kapljevina i njihov volumen, fizičke karakteristike kapljevina, oblik posude, vrijeme miješanja kod šaržnih operacija ili vrijeme zadržavanja kod kontinuiranog miješanja. Ovaj relativno jednostavan problem ujednačavanja postaje složen u slučajevima veće razlike u viskoznosti i gustoći kapljevina te ukoliko je prisutna kemijska reakcija.

Primjer miješanja u dvofaznim sustavima je miješanje čvrstih čestica u kapljevini, tzv. suspendiranje. Miješanje u ovom slučaju sprječava stvaranje nakupina čestica kao i sedimentaciju ili plutanje. Osim suspendiranja u kemijskoj industriji se često može susresti miješanje u sustavima plin-kapljevina ali i miješanje dviju nemješljivih kapljevina.

Miješanje u trofaznim sustavima još uvijek nije dovoljno ispitano i trenutno predstavlja veliki interes znanstvenih istraživanja.⁽²⁾

Miješanje mješljivih kapljevina najjednostavniji je slučaj, koji je i u najvećoj mjeri zastupljen u literaturi, te je najviše istraženo područje. Dok je miješanje suspenzija (čvrsto-kapljevito) nešto manje zastupljeno, a najstarija saznanja potječu od Zwieteringa, 1958. godine. Potom slijedi miješanje u sustavu plin-kapljevina koje mora osigurati disperziju plinske faze u kapljevini uz maksimalno moguću površinu izmjene tvari.

1.1.1. Provedba operacije miješanja

Miješanje je mehanička operacija koja se najčešće provodi mehaničkim uzgibavanjem u posebno dimenzioniranim posudama, tzv. miješalicama. Poznavanje i razumijevanje toka mase koja se miješa osnova je za izbor i dimenzioniranje opreme.

Različiti oblici gibanja čine tzv. mehanizam miješanja. Mehanizmi miješanja se prikazuju u odnosu na laminarni i turbulentni režim strujanja. Međutim, potrebno je voditi računa i o postojanju prijelaznog područja koje ima karakteristike i laminarnog i turbulentnog strujanja.

Laminarni režim strujanja obično se povezuje s vrlo viskozim kapljevina u kojima interakcijske sile brzo nestaju. Zbog toga miješalo mora zauzeti veći dio posude ukoliko se želi uspostaviti odgovarajuće gibanje ukupne mase. Uz površinu koja rotira stvara se veliki gradijent brzina, a smična naprezanja nastoje elemente kapljevine istegnuti i deformirati, pri čemu se oni kontinuirano stanjuju i izdužuju. Na taj način dolazi do smanjenja razlike koncentracije uslijed molekularne difuzije.

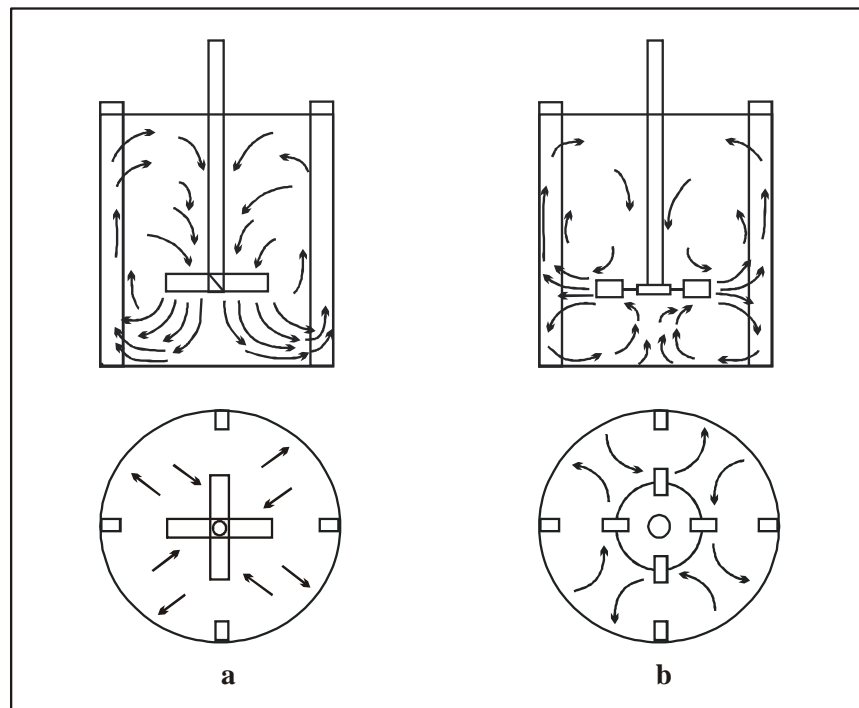
Međutim, u većini slučajeva tok ukupne mase kapljevine uzrokovan rotacijom miješala u posudi za miješanje je turbulentnog karaktera. To se posebno odnosi na sustave čija je viskoznost manja od 10 mPas. Inercijske sile omogućuju cirkulaciju kapljevine u posudi, a neposredno uz miješalo se postiže maksimalna vrtložna difuzija. U ovom slučaju miješanjem se stvaraju znatno veće brzine strujanja kapljevine nego pri laminarnom strujanju. Kako je i molekularna difuzija tada brža nego kod viskoznih fluida, cjelokupni proces je sve do molekularne razine brži nego pri laminarnom strujanju.⁽³⁾

Uspješnost operacije miješanja ovisi o nekoliko čimbenika. Prvi od njih je oblik posude u kojoj se provodi miješanje. Geometrija posude i njezine dimenzije mogu znatno utjecati na samu operaciju. U svakom slučaju posuda mora imati takav oblik da osigurava najpovoljnije strujanje tvari koja se miješa. Tim oblikom se nastoji spriječiti stvaranje, tzv. "mrtvih zona", odnosno područja u kojima će se efekt miješanja znatno smanjiti. Pri intenzivnom miješanju dolazi do stvaranja vira u masi koja se miješa, što dovodi do površinske aeracije koja umanjuje učinkovitost miješanja. Zbog toga se u unutrašnjost posude za miješanje uz samu stijenku ugrađuju razbijala virova. Njihova uobičajena

širina, R_V , u odnosu na promjer posude, d_T , je $R_V = (0,1 - 0,2) d_T$. Posebnu pozornost potrebno je usmjeriti na izvedbu dijela razbijala koji se nalazi u blizini dna posude. Nepravilna izvedba tog dijela mogla bi značajno remetiti cirkulaciju kapljevine.

Jedan od najznačajnijih zadataka pri izvedbi uređaja za miješanje je pravilan odabir miješala. U samoj aparaturi za miješanje razlikujemo sustave sa mehaničkim miješanjem i sustave bez mehaničkog miješanja.

Također razlikujemo dva osnovna tipa cirkulacije kapljevine u posudi za miješanje - aksijalno i radijalno. Miješala koja uvjetuju aksijalno strujanje (*Slika 1a*) stvaraju tok kapljevine paralelan s osovinom. Naime, dio mase kapljevine struji niz osovinu miješala, dok uzlazni dio struji uz stijenku posude. Takvi tipovi miješala primjenjuju se u sustavima gdje se zahtjeva intenzivna cirkulacija fluida. Miješala s radijalnom dobavom (*Slika 1b*) "izbacuju" kapljevinu velikom brzinom prema stjenci gdje se tok dijeli na dvije struje. Jedan dio kapljevine struji prema površini, dok drugi prema dnu posude, odakle dospijevaju u os vrtnje.



Slika 1. Aksijalan (a) i radijalan (b) tok kapljevine u posudi za miješanje.

Aksijalnim i radijalnim strujanjem kapljevine odvija se tzv. makroskopsko miješanje. Makroskopsko miješanje je bitno za dobivanje homogenih smjesa mješljivih kapljevina, a mikroskopsko je odlučujuće za prijenosne pojave kontrolirane unutarnjim trenjem fluida. Izbor tipa miješala ovisi prvenstveno o vrsti traženog miješanja, veličini posude i viskoznosti kapljevine.

1.1.2. Snaga miješanja

Jedan od osnovnih parametara pri konstrukciji i izboru uređaja za miješanje je utrošak snage miješala, tzv. snaga miješanja. Eksperimentalno je utvrđeno da snaga miješanja ovisi o sljedećim varijablama: brzini vrtnje miješala, N , promjeru mješala, D , gustoći kapljevine, ρ_L , viskoznosti, μ_L , i gravitacijskom ubrzanju, g .^(4, 5) Stoga se snaga miješanja može prikazati kao funkcija tih varijabli: $P = f(N, D, \mu_L, \rho_L, g)$, a određuje se iz odnosa bezdimenzijskih značajki:

$$\frac{P}{D^5 N^3 \rho} = k \left(\frac{D^2 N \rho}{\mu} \right)^m \left(\frac{DN^2}{g} \right)^n \quad (1)$$

$$N_p = k Re^m Fr^n \quad (2)$$

gdje su:

$$N_p = \frac{P}{D^5 N^3 \rho}, \quad (3)$$

tj. $\frac{\Delta p}{\rho v^2} = \frac{\text{silna tlaka}}{\text{silna inercije}} \rightarrow$ modificirana Eulerova značajka; značajka snage,

$$Re = \frac{D^2 N \rho}{\mu}, \quad (4)$$

što predstavlja modificiranu Reynoldsovu značajku,

$$Fr = \frac{DN^2}{g} \quad (5)$$

tj. $Fr = \frac{v^2}{dg} = \frac{\text{silna inercije}}{\text{silna gravitacije}} \rightarrow$ modificirana Froudova značajka.

Dalje, izraz (3) se može pisati kao:

$$N_p = kRe^m Fr^n \rightarrow \frac{N_p}{Fr^n} = KRe^m \rightarrow \phi = KRe^m, \quad (6)$$

gdje ϕ predstavlja funkciju snage.

Za sustave u kojima ne dolazi do stvaranja vira:

- $n = 0$, $Fr=1$ (miješalice s razbijalima virova ili u laminarnom području):

$$\phi = N_p = KRe^m \quad (7)$$

Za sustave bez pregrada u kojima dolazi do stvaranja vrtloga ne zanemaruje se Froudova značajka jer se jedan dio kapljevine diže iznad ravnotežnog položaja nasuprot djelovanju sile teže, pa se u izrazu mora uzeti u obzir Froudova značajka:

$$\phi = \frac{N_p}{Fr^n} = KRe^m. \quad (8)$$

Eksponent u Fr-značajci:

$$n = \frac{a - \log Re}{b}, \quad (9)$$

gdje su konstante a i b različite za svaki geometrijski tip miješala.

- Laminarno područje, $Re \sim 10$

$$N_p = K_L Re^{-1} \rightarrow \frac{P}{D^5 N \rho} = K_L \frac{\mu}{D^2 N \rho} \quad (10)$$

$$P = K_L D^3 N^2 \mu \quad (11)$$

gdje je: K_L - konstanta za laminarno područje

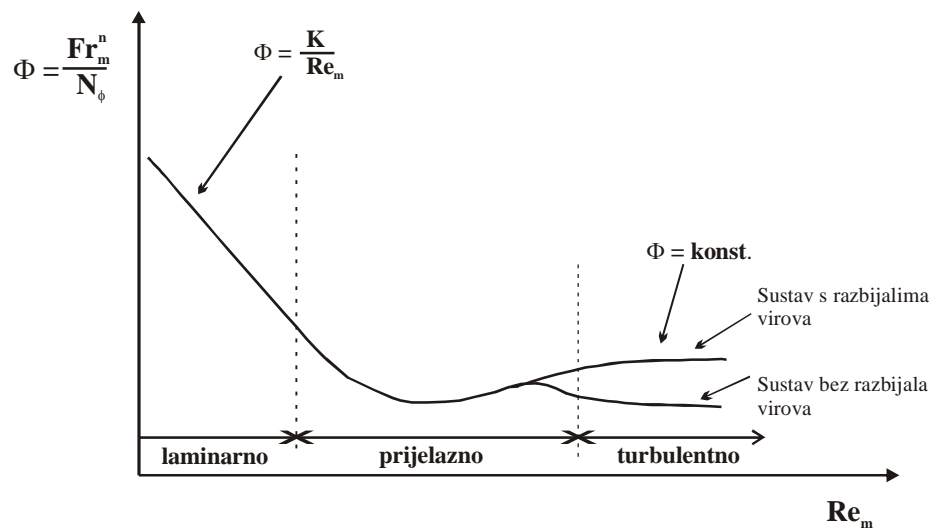
- Turbulentno područje, $Re > 10\,000$

$$N_p = K_T \rightarrow \frac{P}{D^5 N^3 \rho} = K_T \quad (12)$$

$$P = K_T D^5 N^3 \rho \quad (13)$$

gdje je: K_T - konstanta za turbulentno područje.

Za miješalice bez pregrada u prijelaznom i turbulentnom području krivulje se ne mogu aproksimirati pravcima.



Slika 2. Primjer krivulje snage.

1.2. SUSPENDIRANJE

Suspendiranje čvrstih čestica u kapljevitoj fazi sastavni je dio mnogih procesa u kemijskoj industriji. Taj postupak obično se primjenjuje kada se želi postići što ravnomjernija raspodjela čvrstih čestica u nekom reaktorskom sustavu, ubrzati kemijska reakcija te pospješiti postupak otapanja ili nastajanja određenog produkta. Dakle, čvrsta faza može biti prisutna u suspendiranom sastavu kao element koji ne sudjeluje izravno u reakciji (npr. katalitičke čestice), ali isto tako postoji cijeli niz procesa u kojima su čvrste čestice izravno podvrgnute određenim fizikalnim i/ili kemijskim promjenama. Suspendiranje u kemijskoj industriji ima veliki značaj.⁽⁶⁾

Suspendiranje se obično provodi mehaničkim miješanjem u posudama bez obzira da li je čestice potrebno podići u kapljevini ili ih potopiti. Većina industrijskih procesa sa suspendiranim česticama odnosi se na sedimentirajuće čestice, odnosno čestice čija je gustoća znatno veća od gustoće kontinuirane faze. Tada se procesa miješanja zahtijeva "ugradnja" tih čestica u osnovnu masu kapljevine s ciljem što potpunije homogenizacije sustava. Taj, specifičan slučaj suspendiranja susreće se u prehrambenoj, farmaceutskoj industriji, raznim biotehnološkim procesima, postupcima obrade voda, ruda i slično. Bez obzira na njegovu neospornu važnost, on je rijetko bio predmetom znanstvenog istraživanja. Dostupni literaturni podaci o ovoj problematici vrlo su skromni, pogotovo ako se usporede s onima koji se odnose na sedimentirajuće čestice. Dakle, u prvom slučaju osnovni zadatak je podizanje čestica s dna posude za miješanje i njihovo gibanje, dok se u drugom slučaju nastoji miješanjem ugraditi čestice s površine u masu kapljevine, tzv. kontinuiranu fazu.⁽⁷⁾

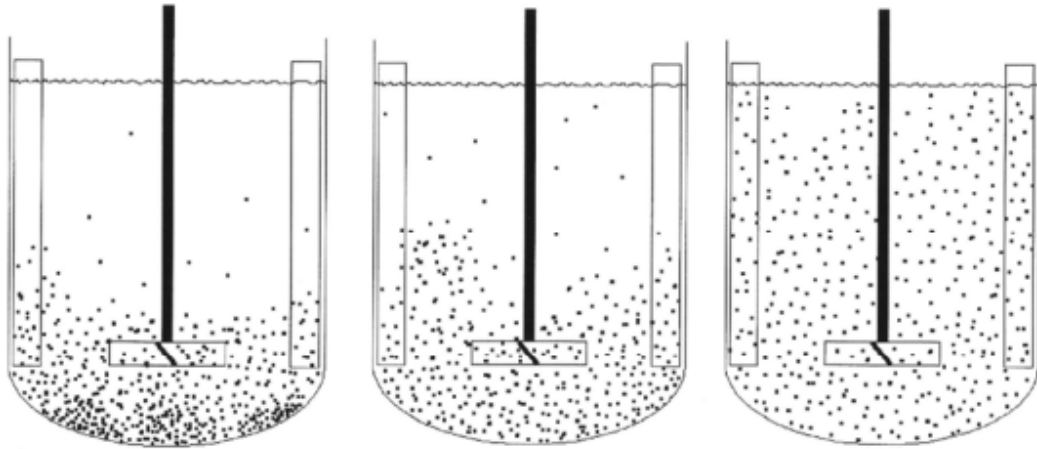
Pri suspendiranju se primjenjuju miješalice raznih geometrija, ali se ipak najučinkovitijom pokazala Rashtonova. Kod nje je visina stupca kapljevine jednaka promjeru posude za miješanje ($H = d_T$), a sama posuda sadrži četiri razbijala virova kako bi se pospješio vertikalni tok kapljevine te spriječila aeracija. Dno posude mora omogućavati povoljno strujanje suspenzije, a obično je polukružno ili zdjelasto. Također i sama razbijala virova su oblikom prilagođena dnu posude kako bi se izbjeglo stvaranje nakupina čestica u toj zoni. Kao miješala koriste se ona koja uzrokuju aksijalni tok kapljevine, i to usmjeren prema dnu posude, ostvarujući pri tome dobru cirkulaciju

suspenzije. Promjer miješala koji se preporuča je jednak $1/3$ promjera posude za miješanje.⁽⁷⁻¹⁰⁾

Različite operacije zahtijevaju i različite stupnjeve homogenosti, ali u većini slučajeva zadovoljavajuće je da su sve čestice suspendirane u kapljevine, tj. da je ostvaren dobar kontakt kapljevine i čestica.

Ovisno o stanju suspendiranih čestica razlikuju se:

- stanje potpune suspenzije (*eng.* Off-Bottom Suspension)
- stanje nepotpune suspenzije
- stanje homogene suspenzije (*eng.* Uniform Suspension) i
- stanje intermedijalne suspenzije.



Slika 3. Stanja suspenzije.

1.2.1. Stanje potpune suspenzije

Stanje potpune suspenzije se postiže kada se sve čestice gibaju i ne zadržavaju na dnu posude dulje od 1 do 2 sekunde, a plutajuće su uklonjene s površine kontinuirane faze te se i jedne i druge nalaze u stanju gibanja. To stanje odgovara brzini miješanja, N_{JS} , pri kojoj je cjelokupna čestica u kontaktu s kapljevinom.

Eksperimentalno je dokazano da brzina prijenosa tvari u ovakvim sustavima raste relativno brzo s porastom brzine miješanja, ali samo do točke koja odgovara stanju potpune suspenzije. Daljnjim povećanjem brzine miješanja, brzina prijenosa tvari neznatno raste, dok je utrošena snaga veća. Takav proces nije ekonomičan, i zato je bitno prepoznati stanje potpune suspenzije.

Za definiranje ovog stanja postoje različiti kriteriji. Bilo je mnogo eksperimentalnih studija i teorijskih analiza, a najpoznatiji je Zwieteringov kriterij (1958.). On je izveo korelacije iz dimenzijske analize i procijenio eksponente iz dobivenih rezultata. On smatra da je stanje potpune suspenzije postignuto kada se nijedna čestica ne zadrži na dnu posude duže od 1 do 2 sekunde (tzv. kriterij "1s" ili "2s").⁽¹¹⁾ Na osnovu eksperimentalnih ispitivanja i dimenzijske analize dani su sljedeći analitički izrazi:

$$Re_{imp}^{0.1} Fr^{0.45} \left(\frac{D}{d_p}\right)^{0.2} X^{0.13} = S \quad (14)$$

- gdje je: X masena koncentracija čestica, a S funkcija koja ovisi o geometrijskim karakteristikama sustava i potrebno ju je eksperimentalno odrediti.

Korelacija je nadalje preoblikovana u izraz:

$$N_{JS} = Sv^{0.1} \left(\frac{g_c(\rho_s - \rho_L)}{\rho_L}\right)^{0.45} X^{0.13} d_p^{0.2} D^{-0.85} \quad (15)$$

gdje je:

- ν - kinematička viskoznost (m^2/s)
- g - gravitacijska akceleracija (konstanta; $9,81 \text{ m}^2/\text{s}$)
- X - masena koncentracija
- d_p - promjer čestice (m)
- D - promjer miješala (m)
- ρ_c - gustoća čestice (kg/m^3)
- ρ_L - gustoća kapljevine (kg/m^3).

Osnovni nedostatak ovog kriterija je njegovo ograničenje na promatranje samo dna posude, bez utvrđivanja stanja u ostalim dijelovima posude. Stoga Eienkel i Mersmann predlažu metodu mjerenja visine suspendiranog sloja, tj. visine međupovršine kapljevina-suspenzija. U ovom slučaju stanje potpune suspenzije postiže se ako je visina međupovršine jednaka $0,9 H$.⁽¹²⁾

Pored vizualnih metoda koriste se i razne instrumentalne tehnike kao što su konduktometrijske, optičke te uzorkovanje. Sve one se temelje na određivanju brzine miješanja, N_{JS} . Utvrđivanje ove brzine uključuje mjerenje lokalne koncentracije u masi ili uzimanje uzoraka čvrstih čestica kroz stijenku reaktorskog sustava.^(13,14)

1.2.2. Stanje nepotpune suspenzije

Ovo stanje karakterizira prisutnost mirujućih nakupina čestica, ili pak nakupina koje se periodički obnavljaju na dnu posude za miješanje. Važno je da sadržaj tih nakupina ne raste s vremenom. Kada prijenos tvari u sustavu čvrsto-kapljevito nije kontrolirajući, te ukoliko reakcija nije egzotermna stanje nepotpune suspenzije može biti značajno s praktičnog stanovišta.⁽¹⁵⁾ Naime, u takvim situacijama nepotpuno suspendiranje značajno može umanjiti utrošak energije pri miješanju.

1.2.3. Stanje homogene suspenzije

Homogena suspenzija karakterizirana je jednolikom koncentracijom čvrstih čestica u cijelom volumenu kapljevine. Suspenzija se može smatrati homogenom ukoliko su koncentracija i raspodjela veličina čestica konstantne u cijelom prostoru posude za miješanje. Brzina miješanja, N_{JH} , znatno je veća od N_{JS} , pa je i utrošak snage veći. Dakle, radi se o граниčnom stanju, kojeg je teško ostvariti. Takvo stanje zahtijeva se kod kontinuiranih procesa gdje koncentracija i raspodjela veličine čestica u miješalici i u izlaznom toku mora biti ista.⁽¹⁶⁾

1.2.4. Stanje intermedijalne suspenzije

Ukoliko se sedimentirajuće čestice ne zadržavaju na dnu posude, a plutajuće na površini kontinuirane faze čak ni u periodu stanja potpune suspenzije, tada se radi o stanju intermedijalne suspenzije. Takvo stanje po svom karakteru možemo svrstati između stanja potpune i homogene suspenzije. U praksi se takvi uvjeti zahtijevaju u procesima gdje postoji izražena mogućnost aglomeracije čestica.

1.3. ZEOLITI

Naziv zeolit potječe od grčkog naziva *zeolithos* što znači kamenje koje vrije, zbog vizualnog efekta primjećenog kod zagrijanog zeolita. Prvi prirodni mineral zeolita otkrio je Axel Frederick Cronstedt 1756. godine. Sintetski zeoliti se proizvode od 1943. godine prije čega su smatrani običnim mineraloškim kuriozitetima. Poznato je oko 40 vrsta prirodnih i preko 180 vrsta sintetskih zeolita. Zeoliti čine više od 90% mnogih sedimentnih stijena vulkanskog podrijetla. Nalaze se urasli u šupljinama mladih efuzivnih stijena i njihovih tufova, a rašireni su i u starim eruptivnim stijenama i kristalnim škrljčima.⁽¹⁷⁾

Zeoliti ili molekulska sita su hidratizirani prirodni ili sintetski alumosilikatni spojevi jedinstvene prostorno-mrežne strukture sastavljene od SiO_4 i AlO_4 tetraedara koji su povezani preko kisikovih atoma u veće sekundarne jedinice.

Različitim prostornim povezivanjem sekundarnih strukturnih jedinica nastaju poliedri koji čine tercijarne prostorno mrežaste strukture karakteristične za zeolite. Poliedri su povezani tako da tvore kanale različitih dimenzija, tj. kaveze. Zeoliti se razlikuju po geometriji kanala, a sami ulazi u kanale su otvori formirani s 6, 8, 10 ili 12 prstenova. Mogu djelovati kao katalizatori, a katalitički aktivnu površinu čini unutrašnjost kanala, tj. kiseli centri.⁽¹⁸⁾

Opća formula zeolita je:



gdje je:

- M - kation alkalijskih ili zemnoalkalijskih metala
- N - nabojni broj kationa M
- x, y - ovisno o tipu zeolita uz uvjet da je $x \geq 2$.⁽¹⁹⁾

1.3.1. Zeolit NaX

Zeolit X je sintetski oblik u prirodi pronađenog alumosilikatnog minerala faujasita. Izgrađen je iz β -rešetke, (PerBU), koja se sastoji od 24 TO_4 tetraedra. Zeolit X nastaje povezivanjem β -rešetki preko dvostrukog šesteročlanog prstena. Jedinična ćelija zeolita X sastoji se od osam okruglih šupljina, osam β -rešetki i šesnaest heksagonalnih prizmi te sadrži 192 TO_4 tetraedra.⁽²⁰⁾

1.3.2. Primjena zeolita

Široka industrijska primjena zeolita zasniva se na njihova tri osnovna svojstva:

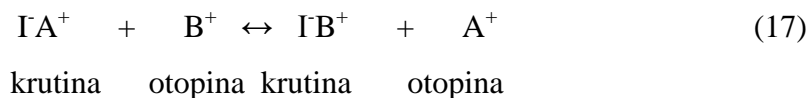
- postojanju hidratiziranih kationa koji uravnotežuju razliku u naboju nastalu izomorfnom zamjenom silicija aluminijem,
- postojanju strukturnih šupljina međusobno povezanih strukturnim kanalima,
- postojanju jakih kiselih i aktivnih mjesta za reakcije katalizirane metalima.⁽²¹⁾

Zbog nabrojanih svojstava zeoliti su upotrebljivi za:

- sušenje prirodnih i tehničkih plinova, adsorpciju freona u hladnjacima, uklanjanje CO_2 iz prirodnog plina,
- ionsku izmjenu (uklanjanje teških metala iz otpadnih voda, uklanjanje amonijaka iz gradskih i industrijskih voda, radioaktivnih izotopa iz radioaktivnih tekućina),
- doziranje mikroelemenata u poljoprivredna zemljišta i životinjsku hranu,
- kao katalizatori u kemijskoj i petrokemijskoj industriji u procesima hidrogenacije, dehidrogenacije, dehidracije, konverziji ugljikohidrata.⁽²¹⁾

1.5. IONSKA IZMJENA

Ionska izmjena je povratljiv proces zamjene iona između krute (ionski izmjenjivač) i kapljevite faze (otopina) u kojoj je izmjenjivač netopljiv:



gdje su:

- I - izmjenjivač,
- A i B - izmjenjivi ioni.

Ionski izmjenjivači su čvrsti u vodi netopljivi makromolekularni polielektroliti koji pokazuju sposobnost izmjene iona, tj. iz otopine mogu primiti pozitivne ili negativne ione i zamijeniti ih ekvivalentnom količinom vlastitih iona. Osnovna struktura sastoji se od trodimenzionalnog kostura na kojem su čvrstom kemijskom vezom vezane aktivne grupe koje disociraju. Ion vezan za aktivnu grupu ionskom vezom zove se protuion. Protuioni su pokretljivi unutar rešetke, tako da se mogu lako otpustiti ili zamijeniti drugim protuionom istog predznaka iz otopine pri čemu se osnovna struktura ne mijenja.⁽²²⁾

Izmjenjivači mogu biti prirodni i sintetski. Prirodni ionski izmjenjivači su zeoliti ili permutiti, dok su umjetni najčešće organski dobiveni procesima polimerizacije ili polikondenzacije.

Ionske izmjenjivače karakterizira:

- veličina zrna,
- stupanj umreženja - o njemu ovise gustoća ionskog izmjenjivača, selektivnost te bubrenje i kapacitet izmjene,
- adsorpcija neutralnih soli,
- sposobnost bubrenja - promjene volumena ionskog izmjenjivača pri prijelazu iz jednog medija u drugi
- kapacitet izmjene - kvantitativni podatak o iznosu iona koje je ionski izmjenjivač sposoban izmijeniti po jedinici svoje mase ili volumena,
- selektivnost - svojstvo odabira pojedinih ionskih vrsta pri njihovoj zamjeni,

- brzina izmjene iona - ovisi o koncentraciji izmjenjivih iona u vodi, njihovom ionskom radijusu, površini kao i difuziji te obliku zrna izmjenjivača.⁽²³⁾

S obzirom na način djelovanja ionskih izmjenjivača razlikuju se kationski i anionski izmjenjivači. Kationski izmjenjivači izmjenjuju kation sa svojih aktivnih grupa s kationom iz otopine (neutralni Na-izmjenjivač, slabo i jako kiseli izmjenjivač), dok anionski izmjenjuju svoj anion s anionom iz otopine elektrolita koji nastaje nakon kationske izmjene (slabo i jako bazni ionski izmjenjivači).⁽²³⁾

Kada se ionski izmjenjivač zasiti, može se povratom ravnoteže u lijevo ponovno aktivirati za proces izmjene, tj. regenerirati.

Regeneracija svih vrsta ionskih izmjenjivača provodi se kroz tri osnovne faze:

- faza rahljenja,
- faza regeneracije,
- faza ispiranja ionske mase.

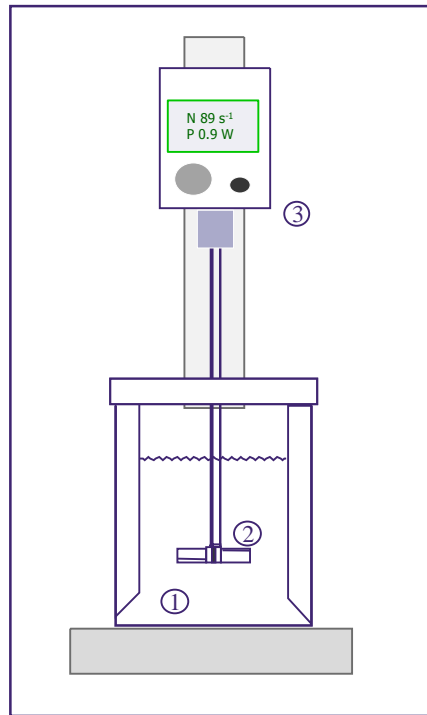
Nakon regeneracije potrebno je potpuno odstraniti višak sredstva za regeneraciju što se postiže ispiranjem. Ispiranje se vrši običnom, destiliranom ili omekšanom vodom odozgo prema dolje, uz brzinu protoka kao pri regeneraciji. Jako kisele ionske mase regeneriraju se s 5-7% HCl uz 250-350% višak, slabo bazne s 2-3% NaOH uz 120-200% višak, a jako bazne s 5% NaOH uz 250-350% višak.⁽²³⁾

2. EKSPERIMENTALNI DIO

2.1. METODIKA

2.1.1. Aparatura za provedbu eksperimenta

Aparatura za suspendiranje sedimentirajućih čestica zeolita u kapljevitoj fazi kao i za određivanje utroška snage miješanja prikazana je na *Slici 4*.

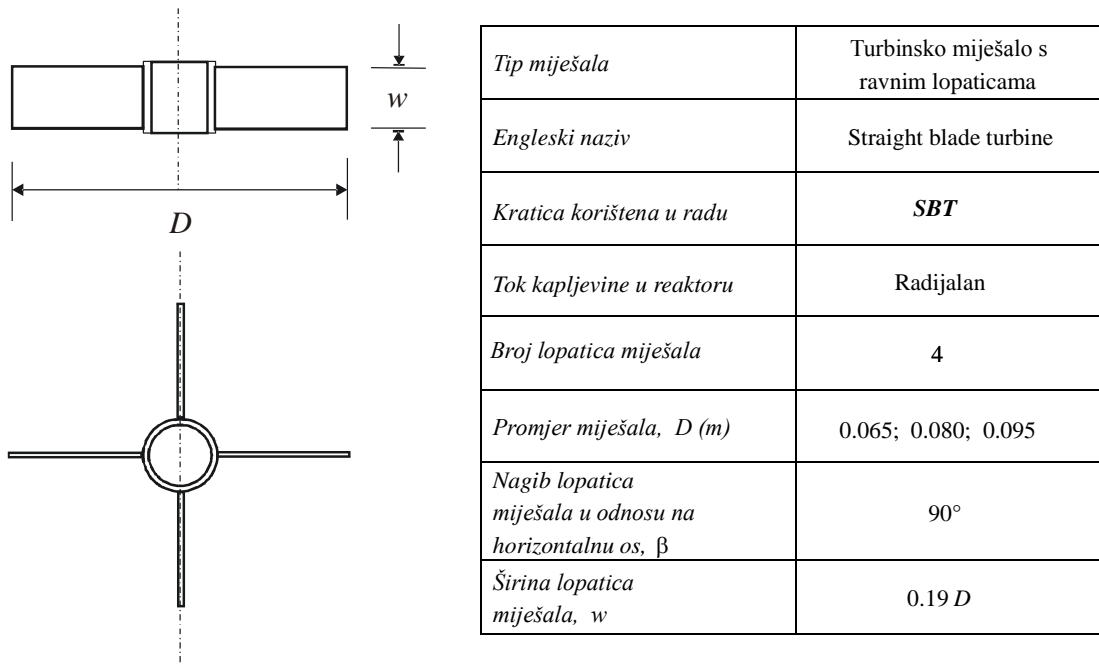


Slika 4. Aparatura za provedbu eksperimenta

(1. reaktor; 2. miješalo; 3 miješalica).

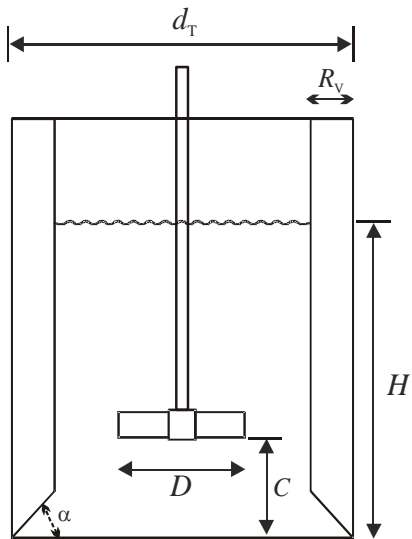
Postupak suspendiranja čestica zeolita provodio se uz uporabu radijalnog turbinkog miješala s četiri ravne lopatice (tzv. SBT miješalo). U cilju ispitivanja utjecaja promjera miješanja na postupak suspendiranja tijekom rada korišteno je miješalo triju različitih promjera pri čemu je omjer promjera miješala i promjera reaktora (D/d_T) iznosio 0,46; 0,57; 0,68.

Geometrijske karakteristike upotrjebljenog tipa miješala su prikazane na *Slici 5*.



Slika 5. Geometrijske karakteristike radijalnog turbinskog miješala s četiri ravne lopatice (tzv. SBT miješalo).

Eksperiment je izveden u staklenom reaktoru za miješanje kako bi se omogućilo vizualno praćenje stanja ispitivanog sustava. Osnovne karakteristike reaktora prikazane su na *Slici 6*. Promjer reaktora iznosio je 0,14 m. S unutarnje strane reaktora nalazila su se četiri razbijala virova standardnih dimenzija ($R_v = d_T/10$), postavljena pod kutom od 90°. Razbijala virova u neposrednoj blizini dna posude izvedena su pod kutom od 45° čime se nastojalo pospješiti cirkulaciju suspenzije pri dnu posude, tj. spriječiti stvaranje nakupina čvrstih čestica tzv. "mrtvih zona". Udaljenost miješala od dna, c , iznosila je 1/3 visine stupca kapljevine, H . Ukupni volumen suspenzije u reaktoru iznosio je 2,14 dm³.



Slika 6. Osnovne geometrijske karakteristike reaktora za suspendiranje.

Miješanje u sustavu regulirano je miješalicom tipa *Lightnin LB2 LabMaster Mixer* koja je omogućavala precizno podešavanje brzine vrtnje miješala kao i kontinuirano praćenje zakretnog momenta.

2.1.2. Provedba eksperimenta

U cilju određivanja stanja potpune suspenzije čestica zeolita i utrošene snage miješanja eksperimenti su vršeni na prethodno opisanoj aparaturi (*Slika 4*).

Ispitivana je suspenzija čestica zeolita NaX čije su osnovne karakteristike prikazane u *Tablici 1*.

Tablica 1. Osnovne karakteristike suspendiranih čestica

Čestice zeolita NaX	
d_p (μm)	80
ρ_p (kg/m^3)	1570
γ (kg/m^3)	4,9067
	6,1332
	7,3510
	8,5864

Kao kontinuirana faza poslužila je otopina bakrovog(II) nitrata.

U prvom dijelu rada ispitan je utjecaj miješala definiranog promjera na brzinu vrtnje miješala potrebnu za postizanje stanja potpune suspenzije zeolita pri različitim masenim koncentracijama. Potom je pri stanju potpune suspenzije za sve promjere miješala i mase zeolita određen zakretni moment i utrošak snage miješanja.

Stanje potpune suspenzije tj. minimalna brzina vrtnje miješala potrebna za postizanje toga stanja, N_{JS} , određivano je Zwieteringovim vizualnim kriterijem. Taj kriterij definira stanje potpune suspenzije sedimentirajućih čestica kao brzinu vrtnje miješala pri kojoj se čvrste čestice ne zadržavaju na dnu posude dulje od 1 s. S obzirom na subjektivnost metode svako mjerenje je izvršeno najmanje deset puta, a potom je računata srednja vrijednost ispitivane veličine.

Snaga miješanja pri stanju potpune suspenzije, P_{JS} , određivana je tako što se na prethodno opisanoj aparaturi (*Slika 4*) određivao zakretni momenta, τ i kritična brzina vrtnje miješala, N_{JS} . Iz te dvije vrijednosti izračunata je utrošena snaga miješanja na sljedeći način:

$$P = \tau \cdot N_{JS} \cdot 2\pi \left[\text{Nm} \cdot \frac{1}{\text{s}} = \text{W} \right] \quad (18)$$

S ciljem što potpunije analize hidrodinamičkih zbivanja u sustavu izvršena je simulacija toka suspenzije u miješalici uporabom programskog paketa *VisiMix 2000 Turbulent*.

3. REZULTATI RADA

3.1. Utjecaj promjera radijalnog SBT miješala na minimalnu brzinu vrtnje potrebnu za suspendiranje zeolita NaX

U prvom dijelu rada sagledan je utjecaj promjera radijalnog SBT miješala na brzinu vrtnje potrebnu za postizanje stanja potpune suspenzije čestica zeolita NaX.

Prilikom istraživanja korištena su miješala triju različitih promjera:

$$D_1 = 0,065 \text{ m}; \quad D_1/d_T = 0,46$$

$$D_2 = 0,080 \text{ m}; \quad D_2/d_T = 0,57$$

$$D_3 = 0,090 \text{ m}; \quad D_3/d_T = 0,68.$$

Suspendiranje čestica zeolita srednjeg promjera $d_p = 80\mu\text{m}$, provodilo se u otopini bakrovog(II) nitrata. Masene koncentracije zeolita u otopini iznosile su:

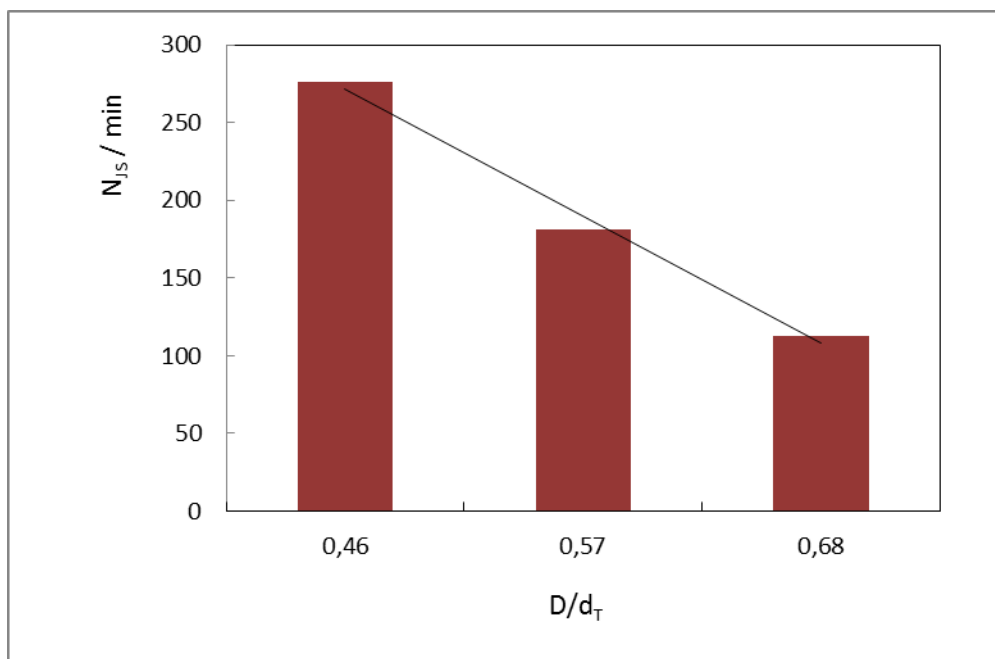
$$\gamma_1 = 4,9067 \text{ g/dm}^3$$

$$\gamma_2 = 6,1332 \text{ g/dm}^3$$

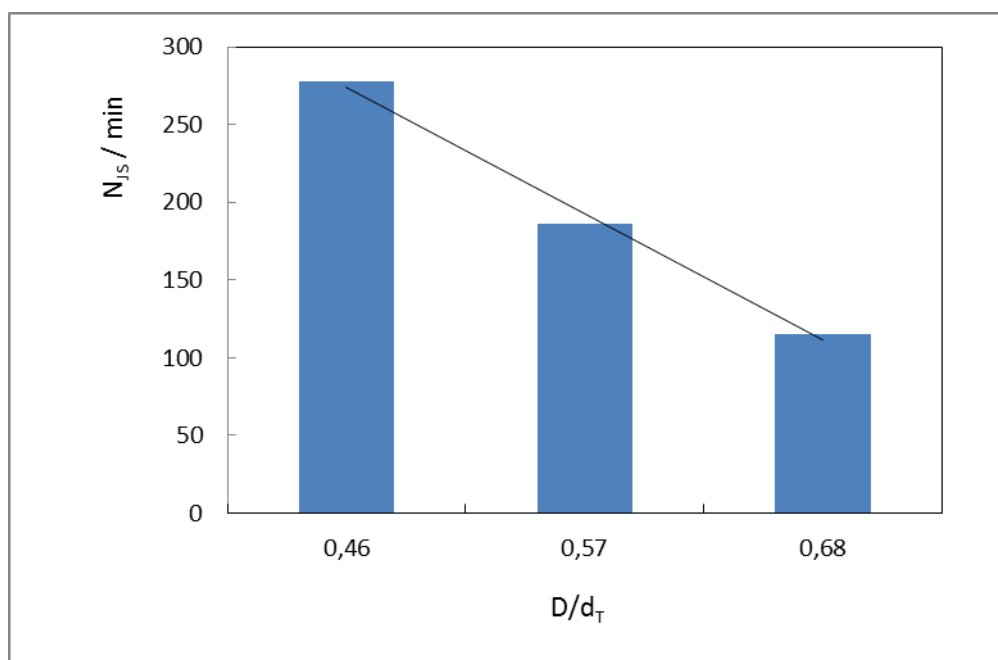
$$\gamma_3 = 7,3510 \text{ g/dm}^3$$

$$\gamma_4 = 8,5864 \text{ g/dm}^3$$

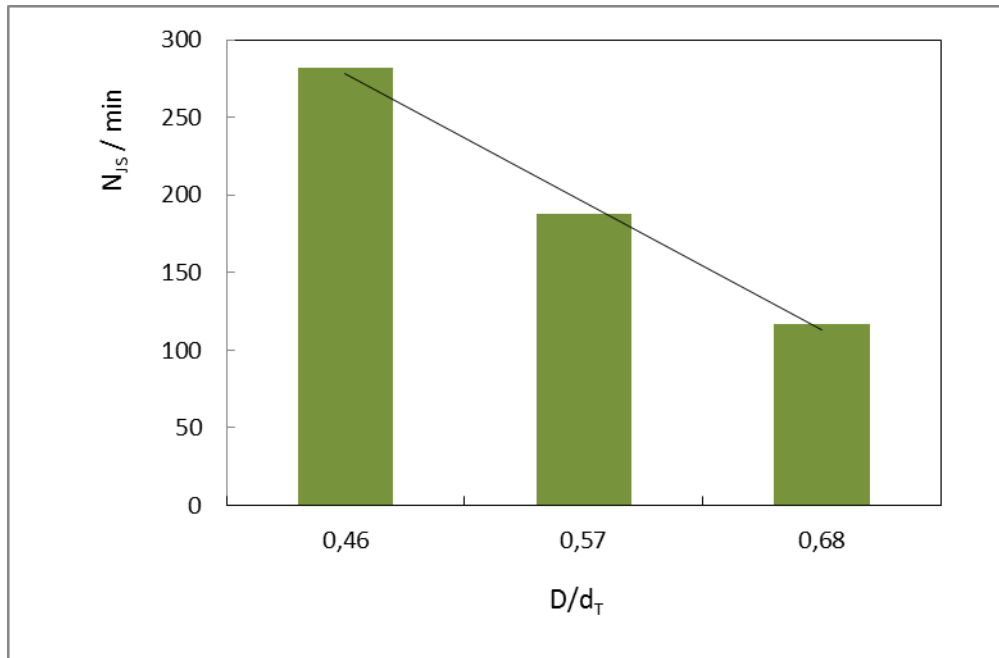
Dobiveni eksperimentalni rezultati prikazani su na slikama 7 do 10. Funkcionalana ovisnost kritične brzine vrtnje miješala o promjeru miješala pri zadanim koncentracijama zeolita dana je u *Tablici 2*.



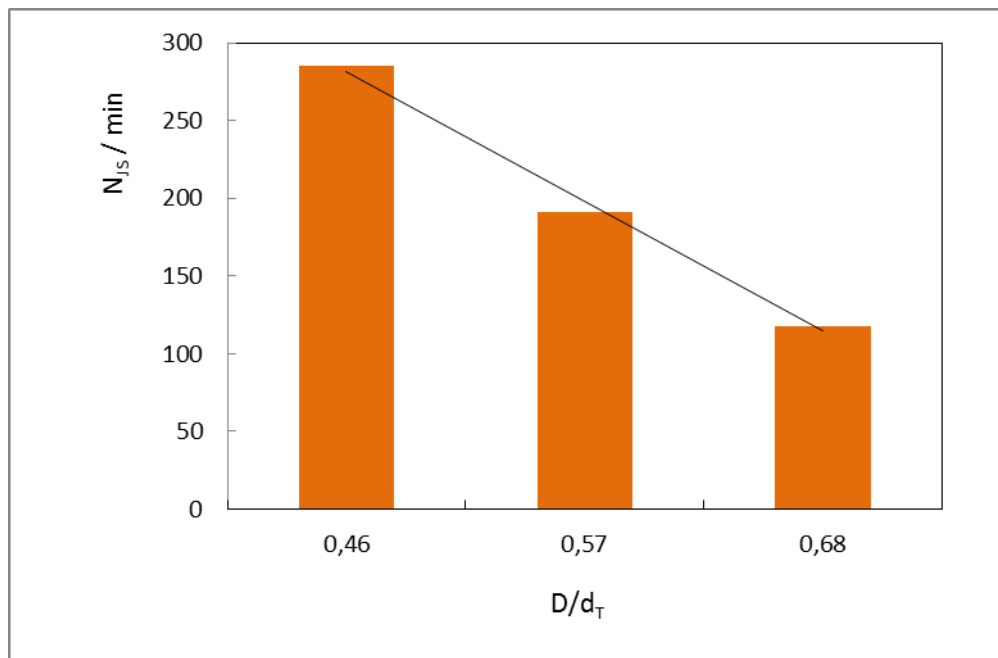
Slika 7. Ovisnost kritične brzine vrtnje, N_{js} , o promjeru miješala, D/d_T , pri γ_1 koncentraciji zeolita.



Slika 8. Ovisnost kritične brzine vrtnje, N_{js} , o promjeru miješala, D/d_T , pri γ_2 koncentraciji zeolita.



➤ *Slika 9. Ovisnost kritične brzine vrtnje, N_{js} , o promjeru miješala, D/d_T , pri γ_3 koncentraciji zeolita.*



➤ *Slika 10. Ovisnost kritične brzine vrtnje, N_{js} , o promjeru miješala, D/d_T , pri γ_4 koncentraciji zeolita.*

➤ **Tablica 2.** Funkcionalana ovisnost kritične brzine vrtnje miješala o promjeru miješala pri ispitivanim koncentracijama zeolita.

γ_1	$N_{JS} = - 81,5 \cdot D/d_T + 353$
γ_2	$N_{JS} = - 81,5 \cdot D/d_T + 356$
γ_3	$N_{JS} = - 82,5 \cdot D/d_T + 360$
γ_4	$N_{JS} = - 83,5 \cdot D/d_T + 365$

3.2. Usporedba eksperimentalnih i teorijski izračunatih vrijednosti minimalne brzine vrtnje za postizanje stanja potpune suspenzije zeolita

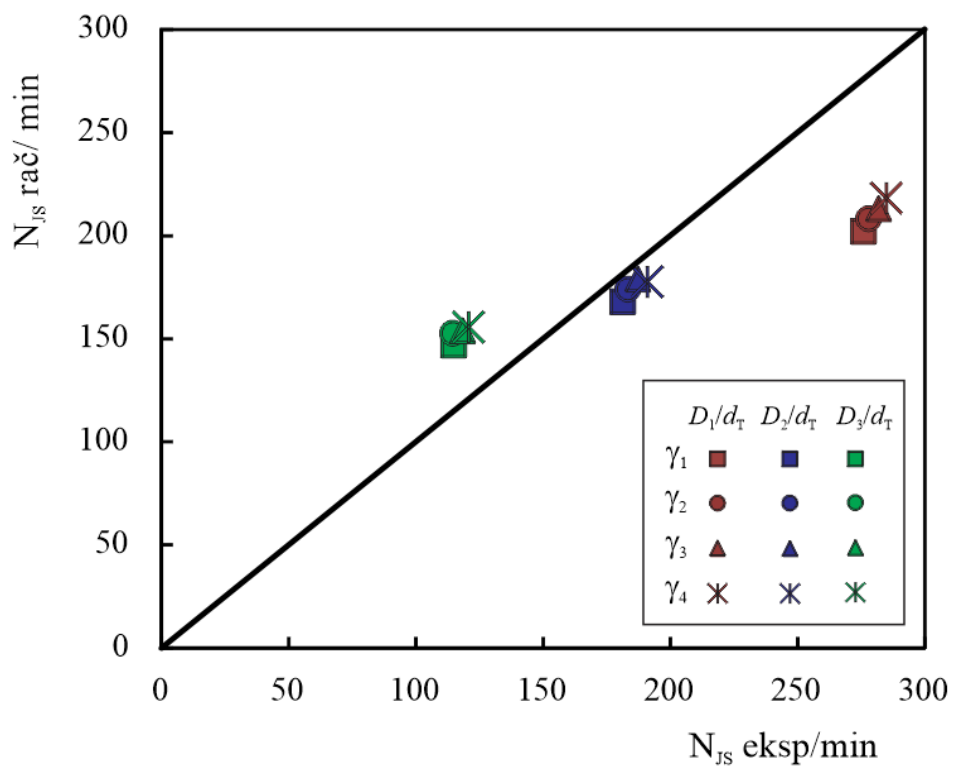
U daljnjem dijelu rada za zadane masene koncentracije zeolita i promjere primjenjenih miješala izračunate su vrijednosti N_{JS} pomoću korelacije koju je predložio Zwietering 1958.⁽²⁴⁾ dan izrazom (15):

Prilikom određivanja računskih vrijednosti, N_{JS} rač, pomoću izraza (15), vrijednost funkcije S koja ovisi o geometrijskim karakteristikama sustava uzeta je iz literature, a iznosila je 4,4; ν - kinematička viskoznost otopine iznosila je $1 \cdot 10^{-3}$ m²/s; maseni udio X izračunat je pomoću izraza:

$$X = \gamma \rho_L \quad (19)$$

ρ_L - gustoća kapljevine iznosila je 1021 kg/m³, gravitacijska akceleracija, g_c , iznosila je 9,81 m²/s, dok je gustoća zeolita, ρ_c , iznosila 1570 kg/m³.

Vrijednosti N_{JS} određene izrazom (15) uspoređene su s eksperimentalno dobivenim vrijednostima. Usporedba eksperimentalnih vrijednosti kritične brzine vrtnje miješala, N_{JS} *eksp.*, s onima određenim računski, N_{JS} rač, prikazana je na *Slici 11* za sve korištene veličine miješala i masene koncentracije zeolita.

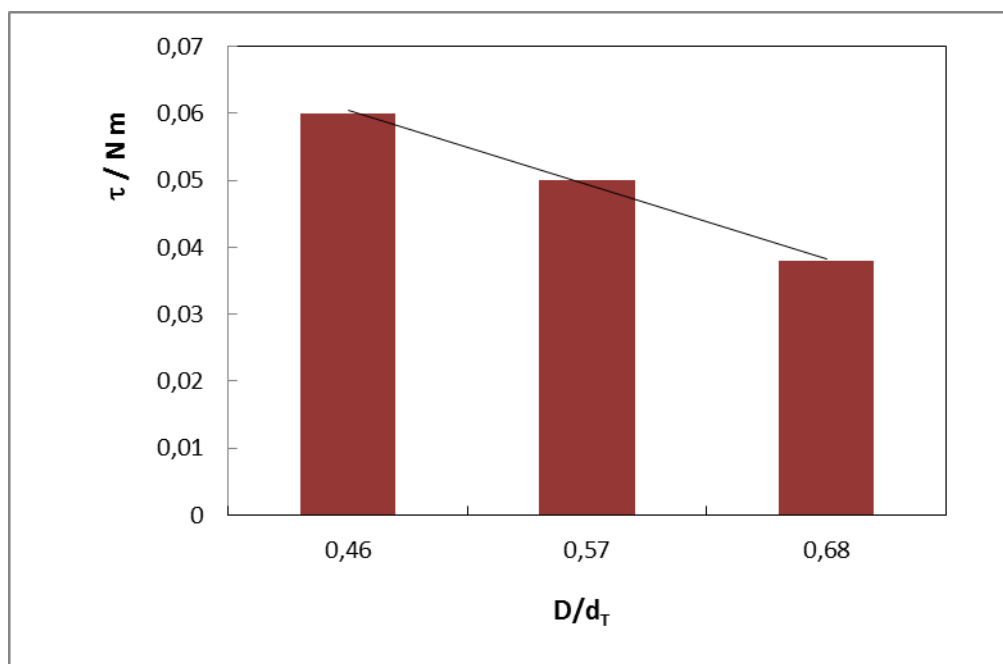


Slika 11. Usporedba eksperimentalnih i računskih vrijednosti kritične brzine vrtnje miješala za sve korištene veličine miješala i masene koncentracije zeolita.

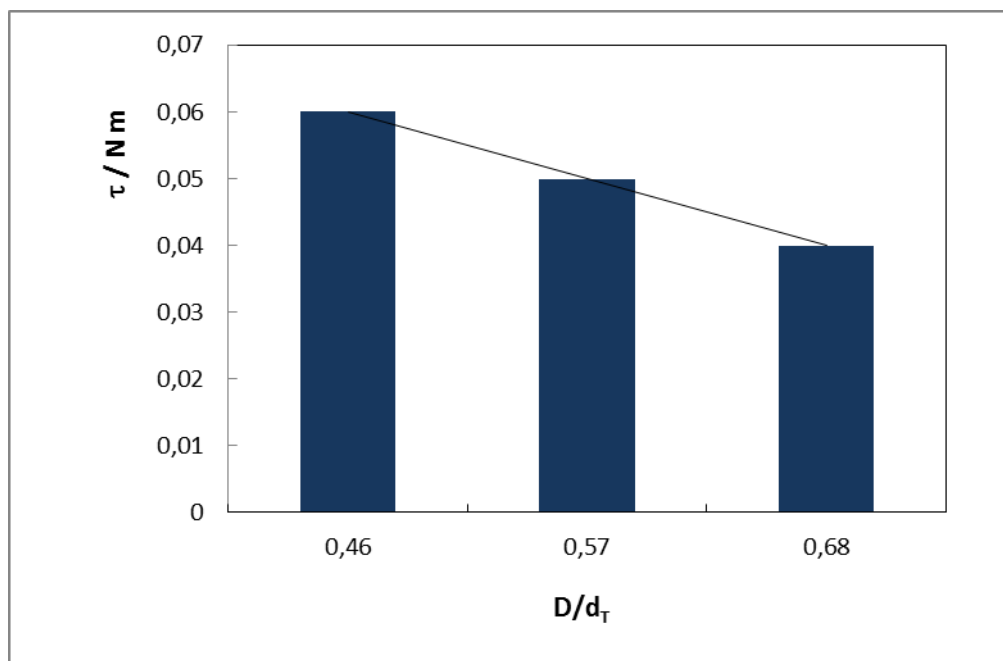
3.3. Određivanje zakretnog momenta miješala pri stanju potpune suspenzije zeolita

Nakon što je eksperimentalno određena kritična brzina vrtnje miješala ispitivanih promjera za suspendiranje čestica zeolita zadanih koncentracija, pri određenim N_{JS} brzinama vrtnje određen je zakretni moment miješala, τ .

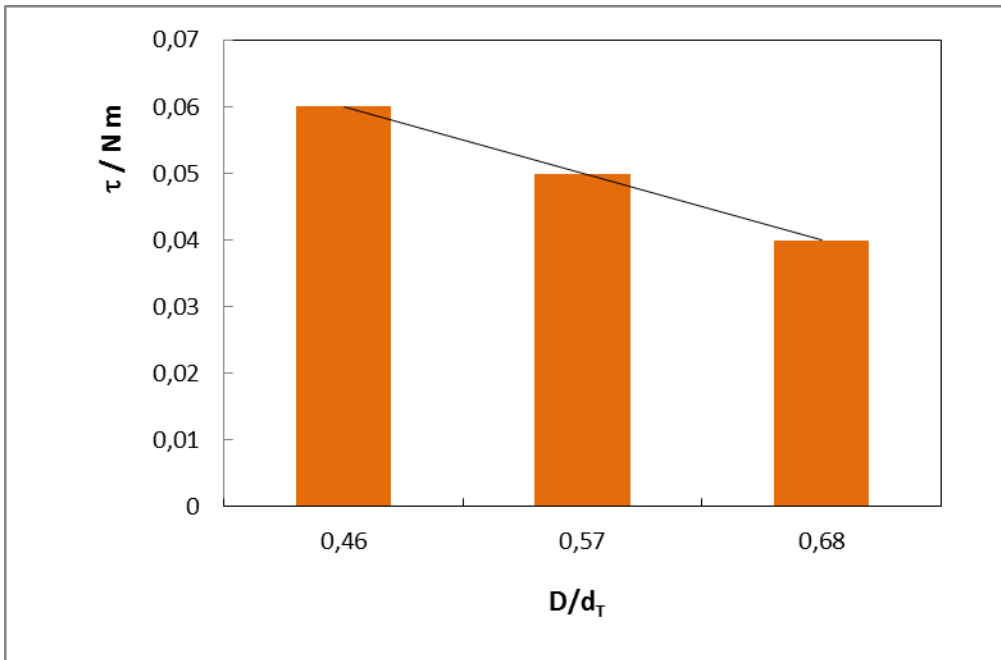
Rezultati ispitivanja prikazani su na *slikama 12 do 15*.



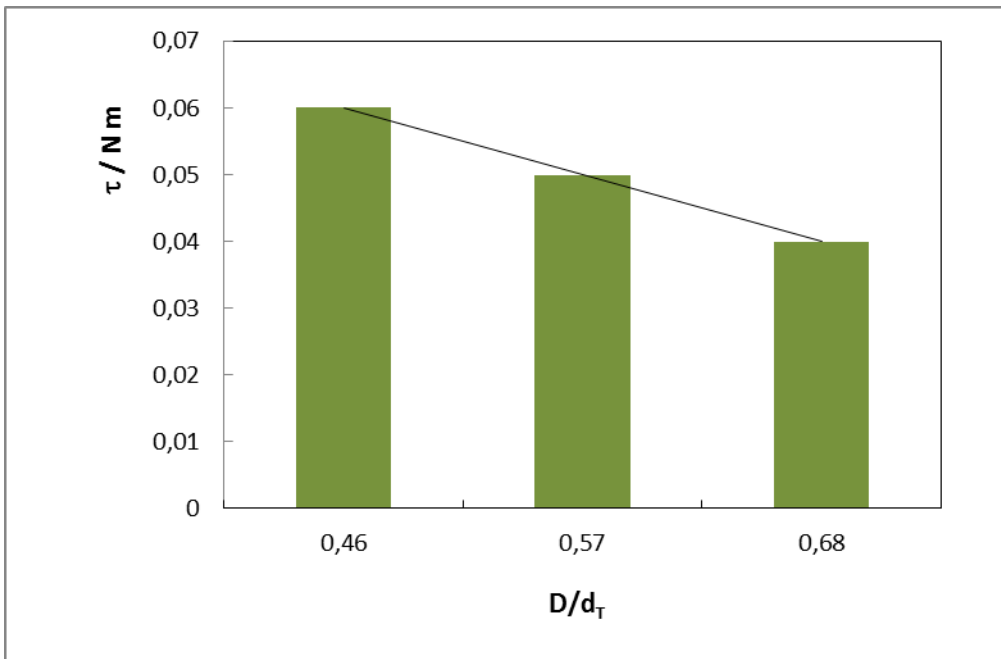
Slika 12. Ovisnost zakretnog momenta, τ , o promjeru miješala, D/d_T , za koncentraciju, γ_1 .



Slika 13. Ovisnost zakretnog momenta, τ , o promjeru miješala, D/d_T , za koncentraciju, γ_2 .



Slika 14. Ovisnost zakretnog momenta, τ , o promjeru miješala, D/d_T , za koncentraciju, γ_3



Slika 15. Ovisnost zakretnog momenta, τ , o promjeru miješala, D/d_T , za koncentraciju, γ_4 .

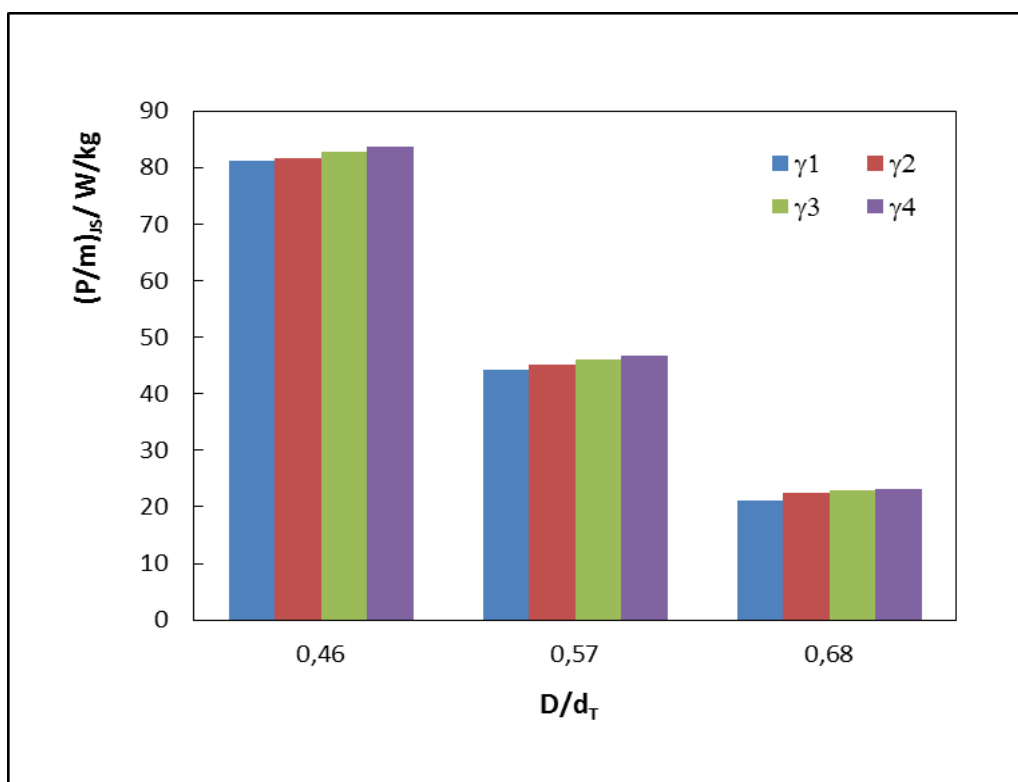
- **Tablica 3.** Funkcionalana ovisnost zakretnog momenta o promjeru miješala pri ispitivanim koncentracijama zeolita.

γ_1	$\tau_1 = -0,011 \cdot D/d_T + 0,07$
γ_2	$\tau_2 = -0,010 \cdot D/d_T + 0,07$
γ_3	$\tau_3 = -0,010 \cdot D/d_T + 0,07$
γ_4	$\tau_4 = -0,010 \cdot D/d_T + 0,07$

3.4. Određivanje utroška snage miješanja pri stanju potpune suspenzije

Tijekom ispitivanja utjecaja promjera miješala na stanje potpune suspenzije zeolita sagledan je također utrošak snage miješanja. Utrošak snage izračunat je iz vrijednosti zakretnog momenta i kritične brzine vrtnje miješala primjenom izraza (18), a u rezultatima rada je izražen kao omjer snage i mase suspenzije koja se miješa. Masa suspenzije određena je iz volumena i gustoće suspenzije.

Dobiveni rezultati za korištene masene koncentracije zeolita prikazani su na *Slici 16* kao funkcija ovisnosti utroška snage po jediničnom volumenu suspenzije o promjeru ispitivanog miješala.



Slika 16. Ovisnost snage miješanja o promjeru miješala, D/d_T , za ispitivane masene koncentracije zeolita.

4. RASPRAVA

Zeoliti su tvari s čvrsto definiranim strukturama koje sadrže AlO_4 i SiO_4 tetraedre povezane atomima kisika. Selektivno adsorbiraju vodu i izmjenjuju katione zbog čega se vrlo često primjenjuju u procesima ionske izmjene. Ukoliko se ionska izmjena provodi u reaktoru s mehaničkim miješanjem primjenjuje se postupak suspendiranja čestica zeolita. Kako zeolit u tom slučaju, imaju gustoću znatno veću od gustoće kontinuirane faze tj. vodene otopine on predstavlja sedimentirajuće čestice te se od miješanja očekuje "ugradnja" čestica u osnovnu masu kapljevine, a kao cilj procesa postavlja se što bolja homogenizacija sustava.

Na suspendiranje sedimentirajućih čestica može se znatno utjecati odabirom konfiguracije reaktorskog sustava, a posebno geometrije miješala .^(25, 26)

Cilj ovog rada bio je sagledati utjecaj promjera radijalnog turbinskog miješalu na postizanje stanja potpune suspenzije čestica zeolita NaX. Sva ispitivanja provedena su na aparaturi prikazanoj na *Slici 4*. Osnovni dio aparature predstavlja reaktor promjera 0,14 m u kojem su bila postavljena četiri razbijala virova. Omjer visine stupca kapljevine i promjera reaktora, (H/d_T) , iznosio je 1,0, omjer udaljenosti miješala od dna posude i visine stupca kapljevine (C/H) , iznosio je 0,33. Kako je cilj rada bio sagledati utjecaj promjera radijalnog miješala na stanje potpune suspenzije zeolita u eksperimentalnim istraživanjima korišteno je radijalno turbinsko miješalo s četiri ravne lopatice tzv. SBT tip miješala pri čemu je omjer promjera miješala i promjera reaktora, (D/d_T) , mijenjan u području od 0,46 do 0,68. Kako je ovim ispitivanjima obuhvaćeno određivanje eksperimentalnih uvjeta pri kojima će se naknadno izvršiti izmjena iona bakra na česticama zeolita, suspendiranje se provodilo u otopini bakrovog(II) nitrata, koncentracije 7 mmol/dm^3 . Karakteristike čestica zeolita prikazane su u *Tablici 2*. U cilju pronalaženja optimalne konfiguracije miješalice za suspendiranje zeolita u radu je također sagledavan i utrošak snage miješanja pri ispitivanim promjerima miješala i masenim koncentracijama zeolita.

U prvom dijelu rada određivan je utjecaj promjera SBT miješala na minimalnu brzinu vrtnje miješala potrebnu za postizanje tog stanja, N_{JS} , tzv. kritičnu brzinu vrtnje miješala. Pri tome je korišten Zwieteringov vizualni kriterij "1s". Taj kriterij definira stanje potpune suspenzije čestica kao brzinu vrtnje miješala pri kojoj se čestice ne

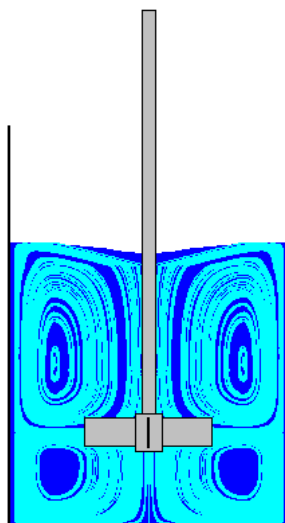
zadržavaju na dnu posude duže od 1 s. Radi subjektivnosti metode svako je mjerenje izvršeno najmanje deset puta, a potom je računata srednja vrijednost ispitivane veličine.

Za svaki ispitivani promjer SBT miješala određena je kritična brzina vrtnje miješala pri četiri različite masene koncentracije zeolita, γ , u području od 4,91 do 8,59 kg/m³. Rezultati ispitivanja prikazani su na slikama 7 do 10 kao ovisnost kritične brzine vrtnje o promjeru SBT miješala.

Iz prikazanih rezultata lako je uočiti da se pri svim masenim koncentracijama zeolita dobiva istovjetni odnos kritične brzine vrtnje o promjeru miješala, a s povećanjem promjera miješala, N_{JS} , se smanjuje. Da bi se sagledao utjecaj masene koncentracije zeolita na promjer miješala procijenjena je funkcionalana ovisnost N_{JS} o promjeru miješala linearnom funkcijom, a dobiveni izrazi ovisnosti opisani su jednadžbama pravca N_{JS} za sve koncentracije zeolita (*Tablica 2*).

Iz prikazanih jednadžbi jasno je da se apsolutna vrijednost koeficijenta smjera pravca kao i vrijednost odsjeka na ordinati povećavaju s povećanjem koncentracije što ukazuje na povećanje N_{JS} s povećanjem koncentracije zeolita. Međutim, treba naglasiti da ovo povećanje iako slijedi pravilan trend nije značajno. Tako se može potvrditi da promjer miješala ima značajno veći utjecaj na suspendiranje čestica zeolita od masene koncentracije čestica.

Smanjenje kritične brzine vrtnje s povećanjem promjera radijalnog SBT miješala može se razumjeti ukoliko se sagleda struktura toka kapljevine koju razvija ovo miješalo. U tu svrhu u ovom radu izvršena je simulacija toka kapljevine koju razvija primjenjeno miješalo uporabom programskog paketa *VisiMix 2000 Turbulent*. Simulacija toka kapljevine prikazana je na *Slici 17*.⁽²⁷⁾



Slika 17. Simulacija toka kapljevine SBT miješala pri $D/d_T = 0,46$, $C/H = 0,33$,

Kao što se na slici može vidjeti SBT miješalo u sustavu razvija radijalni tok kapljevine. Lopatice zahvaćaju kapljevinu te je odbacuju radijalno prema stijenci posude. Kapljevina udarajući u stijenku se dijeli na dva toka; jedan koji je usmjeren prema dnu posude i drugi koji je usmjeren prema površini. Za podizanje sedimentirajućih čestica zeolita s dna posude odgovoran je donji tok SBT miješala. Da bi došlo do podizanja čestice s dna posude brzina kapljevine u blizini dna mora biti dovoljno velika da bi zahvatila čestice, a potom je ugradila u masu kapljevine (kontinuiranu fazu). S druge strane, poznato je da za suspendiranje čvrstih čestica je prvenstveno odgovorno makromjerilo turbulencije, odnosno tzv. primarni turbulentni vrtlozi. Veličina primarnog makrovtloga ovisi o dimenzijama miješala, odnosno ta je veličina proporcionalna promjeru miješala. Tako će miješalo većeg promjera razviti veći primarni vrtlog od onog manjeg promjera, a time i veću količinu raspoložive energije za podizanje i ugradnju sedimentirajućih čestica zeolita u kontinuiranu fazu.⁽²⁸⁾ Iz navedenog je jasno da će primjena SBT miješala većeg promjera osigurati dovoljnu energiju makrovtloga, odgovornu za suspendiranje čestica zeolita već pri manjoj brzini vrtnje miješala.

Nakon što su eksperimentalno određene vrijednosti N_{JS} pri različitim promjerima SBT miješala, u cilju sagledavanja primjenjivost Zwieteringove korelacije, izračunate su vrijednosti N_{JS} primjenom izraza (15) za ispitivane uvjete suspendiranja zeolita. Usporedba eksperimentalno dobivenih i izračunatih vrijednosti N_{JS} prikazana je na *Slici 11*.

Iz slike se uočava da se približne vrijednosti eksperimentalnih i računskih vrijednosti N_{JS} dobivaju samo za omjer $D/d_T = 0,57$. S povećanjem omjera D/d_T značajno veće postaju eksperimentalno dobivene vrijednosti kritične brzine vrtnje, N_{JS} *exp*, dok je pri omjerima $D/d_T < 0,57$ prisutan obrnut trend. Zanimljivo je da i računski i eksperimentalno određene kritične brzine vrtnje primjetno rastu s povećanjem masene koncentracije zeolita. Razlog odstupanja je nepotpunost Zwieteringove korelacije. Iako je izraz za izračunavanje N_{JS} sadrži promjer miješala, geometrijske karakteristike miješala i karakteristike suspendirajućih čestica kao i gustoću kontinuirane faze u njemu nije jasno definiran omjer D/d_T . Ovaj omjer obuhvaćen je geometrijskim faktorom S čija je vrijednost za radijalno miješalo uzeta iz literature te iznosi 4,4.⁽²⁴⁾ S obzirom da je vrijednost faktora S preuzeta iz literature određena eksperimentalno, moguća odstupanja literaturne vrijednosti od stvarne koja opisuje ispitivani sustav, očito je posljedica odstupanja omjera D/d_T pri kojem je literaturna vrijednost utvrđena, u odnosu na omjer korišten u ovim ispitivanjima. Iz navedenog se može zaključiti da je primjena Zwieteringovog izraza za primijenjeni sustav ograničena samo na omjer $D/d_T = 0,57$.

Kako bi se sagledali energetske utroške postupka suspendiranja zeolita, pri kritičnim brzinama vrtnje miješala određen je zakretni moment miješala, τ .

Na slikama 12 do 15 prikazane su eksperimentalne vrijednosti zakretnog momenta pri korištenim masenim koncentracijama zeolita. Iz rezultata se uočava da se zakretni moment miješala pri svim masenim koncentracijama smanjuje s povećanjem promjera miješala. Da bi se detaljnije analizirali dobiveni rezultati, ovisnost zakretnog momenta o promjeru miješala procijenjen je linearnim funkcijama. Izvedene jednadžbe pravaca navedene su u *Tablici 3*. Ista vrijednost koeficijenta smjera i odsjeka na ordinati ukazuje da povećanje masene koncentracije zeolita nije utjecalo na vrijednost zakretnog momenta. Tako je utvrđeno da je vrijednost zakretnog momenta zapravo posljedica brzine vrtnje miješala, tj. N_{JS} pri stanju potpune suspenzije.

Iz vrijednosti zakretnog momenta te brzine vrtnje miješala pri stanju potpune suspenzije, primjenom izraza (18) određen je utrošak snage miješanja, koji je u ovom radu prikazan kao utrošak snage po jedinici mase suspenzije koja se miješa, $(P/m)_{JS}$. Utrošci snage za sve ispitivane uvjete suspendiranja zeolita prikazani su na *Slici 16*.

Iz prikazanih rezultata ispitivanja razvidno je da se utrošak snage miješanja smanjuje s povećanjem promjera miješala za sve korištene koncentracije zeolita. S druge strane, također uočava se da utrošak snage $(P/m)_{JS}$ se povećava s masenom koncentracijom zeolita pri svim ispitivanim promjerima. Međutim, ovdje treba naglasiti da na utrošak snage po jedinici mase suspenzije značajno više utječe promjer miješala nego povećanje masene koncentracije zeolita. Značajniji utjecaj promjera miješala od koncentracije suspenzije mogao se i očekivati s obzirom na izraz (13). Naime iz izraza je jasan odnos utroška snage o promjeru miješala ($P \propto D^5$), dok se odnos utroška snage i masene koncentracije zeolita može analizirati kroz odnos utroška snage i gustoće suspenzije koji je značano manje izražen ($P \propto \rho$). Utjecaj je posebno mali ukoliko se uzme u obzir da se gustoća suspenzije tek neznatno mijenjala s promjenom masene koncentracije zeolita u ispitivanom području.

Sagledavajući utrošak snage pri ispitivani uvjetima miješanja može se reći da bi energetski najisplativija opcija bila provoditi suspendiranje primjenom miješala s omjerom $D/d_T = 0,68$ pri najnižoj primijenjenoj masenoj koncentraciji zeolita. Međutim, budući da ova ispitivanja obuhvaćaju sagledavanje eksperimentalnih uvjeta pri kojima će se naknadno provoditi ionska izmjena iona bakra na zeolitu NaX, tek sagledavanjem količine izmijenjenih iona pri stanju potpune suspenzije moći će se predložiti najpovoljniji omjer D/d_T korištenog miješala kao i masena koncentracija zeolita.

5. ZAKLJUČAK

Temeljem provedenih eksperimenata i dobivenih rezultata koji se odnose na utjecaj promjera radijalnog SBT miješala na stanja potpune suspenzije zeolita NaX mogu se donijeti sljedeći zaključci:

- Povećanjem promjera miješala u rasponu omjera D/d_T od 0,46 do 0,68 opada i minimalna brzina vrtnje potrebna za postizanje stanja potpune suspenzije. Navedena brzina vrtnje raste i s porastom masene koncentracije zeolita, međutim utjecaj promjera miješala je znantno izraženiji.
- Usporedba eksperimentalnih i računski određenih vrijednosti kritične brzine vrtnje, primjenom Zwieteringova kriterija ukazala je da je primjenjivost Zwieteringove korelacije u ispitivanom sustavu ograničena na omjer $D/d_T = 0,57$.
- Vrijednosti minimalnih brzina vrtnje miješala za postizanje stanja potpune suspenzije posljedica su strukture toka suspenzije kojeg razvija radijalno turbinsko miješalo te makrovtloga koji se povećava s povećanjem omjera D/d_T .
- Povećanjem promjera miješala smanjuje se vrijednost zakretnog momenta pri svim masenim koncentracijama. Vrijednosti zakretnog momenta direktna su posljedica kritične brzine vrtnje miješala, N_{JS} .
 - Utrošak snage miješanja smanjuje se s povećanjem promjera miješala te sa smanjenjem masene koncentracije zeolita. Međutim, promjer miješala ima značajno veći utjecaj na ovu veličinu.
 - S obzirom na vrijednosti utroška snage pri ispitivanim uvjetima miješanja energetski najpovoljnijom se pokazala primjena radijalnog turbinskog miješala s najvećim promjerom ($D/d_T = 0,68$) pri najnižoj primijenjenoj masenoj koncentraciji zeolita. Međutim, optimalni uvjeti provedbe suspendiranja moći će se utvrditi tek sagledavanjem količine izmijenjenih iona pri ispitivanim stanjima potpune suspenzije.

6. LITERATURA

1. *J. J. Ulbrecht, G. K. Patterson*, Mixing of Liquids by Mechanical Agitation, Gordon and Breach Science Publishers, New York, 1985, 1-59.
2. *S. Nagata*, Mixing-Principles and Applications, Kodansha LTD, and John Wiley & Sons, Tokyo and New York, 1975, 297-331.
3. *M. Hraste*, Mehaničke operacije- Inženjerstvo disperznih sustava, Tehnološki fakultet-Zagreb, Zagreb, 1991., 120-134.
4. *F. A. Holland, F. S. Chapman*, Liquis Mixing and Processing, Reinhold Publishing Comp., New York, 1966, 1-38.
5. *N. Kuzmanić*, Prijenos tvari i energije, Priručnik za predavanja (za unutarnju uporabu), Kemijsko-tehnološki fakultet u Splitu, Split, 2012.
6. *N. Harnby, M. F. Edwards, A.W. Nienow*, Mixing in Proces Industries, Butterworths, London, 1985, 140-144.
7. URL: https://apps.unizg.hr/rektorova/upload_2011/rektorova20102011corr.pdf
(21.6.2107.)
8. *N. Harnby, M. F. Edwards, A.W. Nienow*, Mixing in Proces Industries, Butterworths, London, 1985, 140-144.
9. *M. W. Chudacek*, Does Your Tank Bottom Have the Right Shape, *Chem. Eng.* **1** (1984), 79.
10. *M. W. Chaudacek*, Solid Suspensions Behaviour in Profiled Bottom and Flat Bottom Mixing Tanks, *Chem Eng. Sci.* **40** (3) (1985), 385.
11. *N. Zwietering*, Suspending of Solid Particles in Liquid by Agitators, *Chem. Eng. Sci.* **8** (1958), 224.
12. *W. D. Einkel, A. Mersmann*, The Agitator Speed for Particle Suspension, *Verfahrenstechnik*, **11** (1977), 90.
13. *J. R. Bourne, R.N. Sharma*, Homogeneous Particle Suspension in Propeller-agitated Flat Bottomed Tanks, *Chem. Eng. J.* **8** (1974), 243.
14. *L. Musil*, The Hydrodynamics of Mixed Crystalliseres *Coll. Czech. Chem. Commun.* **41** (1976), 839.
15. *G. Baldi, R. Conti, A. Gianetto*, Concentracion Profiles for Solids Suspended in a Continous Agitated Eactor, *AIChE J.* **26** (6) (1981), 1017.

16. *S. Nagata*, Mixing-Principles and Applications, Kodansha LTD, and John Wiley & Sons, Tokyo and New York, 1975, 391-396.
17. URL: [https:// http://zeomedicine.com/](https://http://zeomedicine.com/) zeolit - mineral of the future, Natural Power AntiOx Immune, Health & Energy Plus, Zeolit (10.8.2017.)
18. *M. R. Luo, G. Cui and B. Rigg*, The Development of the CIE 2000 Colour Difference Formula: CIEDE2000, UK, Colour & Imaging Institute, University of Derby.
19. *T. Kovačić, B. Andričić*, Kataliza, Kemijsko-tehnološki fakultet u Splitu, 2010., 120 - 130.
20. *S. Svilović*, Doktorska disertacija, Kemijsko-tehnološki fakultet u Splitu, 2009., 16-17.
21. *B. Subotić, J. Bronić, A. Čizmek, T. Antonić, C. Kosanović*, Zeoliti, *Kem. Ind.*, **43** (12) (1994), 475-479.
22. *J. Zelić*, Praktikum iz procesa anorganske industrije, Kemijsko-tehnološki fakultet u Splitu, 2013., 46-49.
23. *P. Krolo, P. Dabić, D. Barbir*, Praktikum iz tehnoloških procesa anorganske industrije, nastavni tekstovi za predavanja i vježbe, Kemijsko-tehnološki fakultet u Splitu, 2014., 3-7.
24. *E. L. Paul, V. A. Atimeo-Obeng, S. M. Kresta*, Handbook of Industrial Mixing: Science and Practice, U.S.A., 2003, 558-559.
25. *K. S. M. S. Raghav Rao, J. B. Joshi*, Critical Impeller Speed for Solid Suspension in Mechanically Agitated Concators, *AIChE J.* **34** (8), (1988), 1332.
26. URL: https://apps.unizg.hr/rektorova/upload_2011/rektorova20102011corr.pdf (21.6.2107.)
27. *A. Sajević*, Utjecaj plutajućih suspendiranih čestica na homogenizaciju kapljevite faze u miješalici s dva turbinska miješala, Diplomski rad, Kemijsko-tehnološki fakultet u Splitu, 2002.
28. *A. Kačunić, M. Ćosić, N. Kuzmanić*, Utjecaj parametara miješanja na utrošak snage u kristalizadoru s dvama aksijalnim turbinskim miješalima, Znanstveni rad, Sveučilište u Splitu, Kemijsko-tehnološki fakultet, 2016.

7. PRILOZI

7.1. SIMBOLI

B - širina razbijala virova [m]

c - udaljenost donjeg miješala od dna posude za miješanje [m]

D - promjer miješala [m]

d_{ξ} - promjer čestice [m]

d_p - promjer suspendiranih čestica [m]

d_T - promjer reaktora [m]

g - gravitacijsko ubrzanje [m/s^2]

H - visina stupca kapljevine u posudi za miješanje [m]

K_T - konstanta za turbulentno područje

K_L - konstanta za laminarno područje

m - masa suspenzije [kg]

m_{ξ} - masa čestice [kg]

N - brzina vrtnje miješala [okr/min]

N_{Fr} - Froudova značajka [/]

N_{JS} - brzina vrtnje miješala pri stanju potpune suspenzije [okr/min]

$N_{JS \text{ eksp}}$ - eksperimentalna vrijednost brzine vrtnje miješala pri stanju potpune suspenzije [okr/min]

$N_{JS \text{ rač}}$ - računaska vrijednost brzine vrtnje miješala pri stanju potpune suspenzije [okr/min]

N_P - značajka snage [/]

N_{Re} - Reynoldsova značajka [/]

P - snaga miješanja [W]

$(P/m)_{JS}$ - snaga miješanja po jedinici mase suspenzije pri stanju potpune suspenzije [W/kg]

S - funkcija ovisna o geometrijskim karakteristikama sustava

T - promjer posude za miješanje [m]

w - širina lopatica miješala [m]

X - masena koncentracija [kg/m^3]

β - nagib lopatica miješala [$^{\circ}$]

γ - masena koncentracija zeolita [kg/m^3]

μ_L - dinamička viskoznost kapljevine [Pas]

ρ_s - gustoća čestice [kg/m^3]

ρ_L - gustoća kapljevine [kg/m^3]

τ - zakretni moment [N m]

ϕ - funkcija snage [/]