Utjecaj promjena aksijalnog miješala na suspendiranje zeolita i utrošak snage miješanja

Slatina, Tina

Undergraduate thesis / Završni rad

2017

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:167:815947

Rights / Prava: In copyright / Zaštićeno autorskim pravom.

Download date / Datum preuzimanja: **2024-03-29**

Repository / Repozitorij:

Repository of the Faculty of chemistry and technology - University of Split

zir.nsk.hr

UNIVERSITY OF SPLIT

dabar

DIGITALNI AKADEMSKI ARHIVI I REPOZITORIJI

SVEUČILIŠTE U SPLITU
KEMIJSKO – TEHNOLOŠKI FAKULTET

UTJECAJ PROMJERA AKSIJALNOG MIJEŠALA NA SUSPENDIRANJE ZEOLITA I UTROŠAK SNAGE MIJEŠANJA

ZAVRŠNI RAD

TINA SLATINA
Matični broj: 776

Split, rujan 2017.

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

UTJECAJ PROMJERA AKSIJALNOG MIJEŠALA NA SUSPENDIRANJE ZEOLITA I UTROŠAK SNAGE MIJEŠANJA

ZAVRŠNI RAD

TINA SLATINA
Matični broj: 776

Split, rujan 2017.

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

INFLUENCE OF AXIAL IMPELLER DIAMETER ON SUSPENDING OF ZEOLITE AND POWER CONSUMPTION

BACHELOR THESIS

TINA SLATINA
Parent number: 776

Split, September 2017

TEMELJNA DOKUMENTACIJSKA KARTICA

ZAVRŠNI RAD

Sveučilište u Splitu
Kemijsko-tehnološki fakultet u Splitu
Preddiplomski sveučilišni studij kemijske tehnologije

Znanstveno područje: Kemijsko inženjerstvo
Znanstveno polje: Kemijsko inženjerstvo
Tema rada: prihvaćena na 21. sjednici Fakultetskog vijeća Kemijsko tehnološkog fakulteta
Mentor: doc.dr.sc. Marija Ćosić
Pomoć pri izradi: dr.sc. Antonija Čelan

UTJECAJ PROMJERA AKSIJALNOG MIJEŠALA NA SUSPENDIRANJE ZEOLITA I UTROŠAK SNAGE MIJEŠALA

Tina Slatina, 776

Sažetak:

Pri suspendiranju sedimentirajućih čestica u miješalici najčešće se primjenjuje aksijalno miješalo. Brojna istraživanja su ukazala kako suspendiranje čvrstih čestica ~~u~~ značajno ovisi o geometrijskim karakteristikama miješala. U ovom radu sagledan je utjecaj promjera aksijalnog turbinskog miješala s lopaticama nagnutim pod kutom od 45° (tzv. *PBT* miješalo*)* na postizanje stanja potpune suspenzije zeolita NaX u bakrovom (II) nitratu. Svi eksperimenti provodili su se u miješalici standardnih dimenzija promjera posude, d_T, 0.14 m, koja je sadržavala četiri razbijala virova. S ciljem ispitivanja utjecaja promjera miješala na promatrani proces, omjer promjera miješala i promjera reaktora (D/d_T) mijenjan je u području od 0,46 do 0,68. Za svaki ispitivani promjer PBT miješala određena je brzina vrtnje miješala potrebna za postizanje stanja potpune suspenzije zeolita, pri njegovim različitim koncentracijama. Kako bi se dobio uvid u hidrodinamička zbivanja unutar ispitivanih sustava, izvršena je simulacija toka kapljevine primjenom programa *VisiMiX 2000 Turbulent*. U svrhu određivanja optimalne konfiguracije miješalice za suspendiranje zeolita, u radu je također sagledavan i utrošak snage miješanja pri ispitivanim promjerima miješala i masama zeolita.
Rezultati ispitivanja ukazali su da se s povećanjem promjera PBT miješala smanjuje kritična brzina vrtnje miješala. Dobiveni rezultati posljedica su hidrodinamičkih zbivanju u reaktoru koji se mijenjaju s povećanjem promjera miješala. Uočeno je također 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).

Ključne riječi: *suspendiranje, radijalno miješalo, promjer miješala, snaga miješanja, zeolit*

Rad sadrži: 54 stranica, 17 slika, 4 tablica, 1 priloga, 21 literaturnih referenci

Jezik izvornika: hrvatski

Sastav Povjerenstva za obranu:
1. prof.dr.sc. Nenad Kuzmanić - predsjednik
2. doc.dr.sc. Ivana Smoljko - 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 Split, Teslina 10 (Ruđera Boškovića 33).

BASIC DOCUMENTATION CARD

BACHELOR THESIS

University of Split
Faculty of Chemistry and Technology Split
Undergratuate study of chemical technology

Scientific area: Engineering sciences
Scientific field: Chemical engineering
Tema rada: was approved by Faculty Council of Faculty of Chemistry and Technology, session no. 21.
Mentor: Marija Ćosić, PhD, assistant prof
Pomoć pri izradi: Antonija Čelan, PhD, postdoctoral researcher

INFLUENCE OF DIAMETER OF AXIAL IMPELLER ON SUSPENDING OF ZEOLITE AND POWER CONSUMPTION

Tina Slatina,776

Abstract:

Axial impeller is the most common used impeller when suspending solids. Numerous research have shown that solids suspension is significantly dependent on impeller geometry. This research work focuses on the influence of diameter of pitched blade turbine (abbrev. PBT impeller) on the state of complete suspension of zeolite NaX in copper (II) nitrate solution. Experiments were carried out in a glass reactor with a diameter of 0.14 m. In order to investigate the influence of impeller diameter on solids suspension, the diameter of the impeller, D/d_T, was varied in the range of 046 – 0.68. For each diameter tested, a specific impeller speed was required for achieving the state of complete suspension, N_{JS}, at four different zeolite concentration masses. In order to gain a more complete insight into the hydrodynamics in the mixer, liquid flow simulation was performed using the *VisiMix 2000 Turbulent* program. To find the optimum configuration of the suspended zeolite, power consumption at different impeller diameters zeolite masses was tested as well.
It was found that the critical impeller speed was reduced as the diameter was increased. Obtained results are a consequence of hydrodynamic conditions which change with an increase of impeller diameter. Additionally, it was discovered that the critical impeller speed decreases with a reduction of zeolite concentration, however, this effect was considerably less pronounced than the aforementioned relationship. Power consumption decreases with an increase of impeller diameter and is minimal at the largest diameter investigated (D/d_T= 0.68).

Keywords: *suspension, radial impeller, impeller diameter, power consumption, zeolite*

Thesis contains: 54 pages, 17 figures, 4 tables, 1 supplements, 21 references

Original in: Croatian

Defence committee:

1. Nenad Kuzmanić PhD, full prof. chair person
2. Ivana Smoljko – PhD, assistant prof. member
3. Marija Ćosić – PhD, assistant prof. supervisor

Defence date: 29 September 2017

Printed and electronic (pdf format) version of thesis is deposed in Library of Faculty of Chemistry and Technology Split, Teslina 10 (Ruđera Boškovića 33).

Završni rad je izrađen u Zavodu za kemijsko inženjerstvo, Kemijsko-tehnološkog fakulteta u Splitu pod mentorstvom doc.dr.sc. Marije Ćosić, u razdoblju od 2. 5. do 2. 6. 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 Ćosić na sugestijama i savjetima pri izradi ovog rada.

Posebno hvala mojoj obitelji na podršci i razumijevanju tijekom školovanja.

Također, veliko hvala prijateljima koji su razdoblje studiranja učinile najljepšim razdobljem u mom životu.

Tina

ZADATAK ZAVRŠNOG RADA

1. Izvršiti postupak suspendiranja čestica zeolita NaX u miješalici primjenom aksijalnog turbinskog miješala s četiri ravne lopatice nagnute pod kutom od 45° (tzv. PBT miješala).
2. Sagledati utjecaj promjera PBT miješala na minimalnu brzinu vrtnje miješala potrebnu za postizanje stanja potpune suspenzije zeolita pri različitim masenim koncentracijama.
3. Izvršiti simulaciju toka kapljevine pri različitim promjerima PBT miješala primjenom programa *VisiMix 2000 Turbulent*.
4. Sagledati utjecaj promjera aksijalnog PBT miješala na utrošak snage miješanja pri stanjima potpune suspenzije čestica zeolita.
5. Na temelju provedenih ispitivanja izvršiti analizu djelotvornosti primijenjenih aksijalnih miješala pri suspendiranju čestica zeolita.

SAŽETAK

Pri suspendiranju sedimentirajućih čestica u miješalici najčešće se primjenjuje aksijalno miješalo. Brojna istraživanja su ukazala kako suspendiranje čvrstih čestica u značajno ovisi o geometrijskim karakteristikama miješala. U ovom radu sagledan je utjecaj promjera aksijalnog turbinskog miješala s lopaticama nagnutim pod kutom od 45°(tzv. *PBT* miješalo*)* na postizanje stanja potpune suspenzije zeolita NaX u bakar (II) nitratu. Svi eksperimenti provodili su se u miješalici standardnih dimenzija promjera posude, d_T, 0.14 m, koja je sadržavala četiri razbijala virova. S ciljem ispitivanja utjecaja promjera miješala na promatrani proces, omjer promjera miješala i promjera reaktora (D/d_T) mijenjan je u području od 0,46 do 0,68. Za svaki ispitivani promjer PBT miješala određena je brzina vrtnje miješala potrebna za postizanje stanja potpune suspenzije zeolita, pri njegovim različitim koncentracijama. Kako bi se dobio uvid u hidrodinamička zbivanja unutar ispitivanih sustava, izvršena je simulacija toka kapljevine primjenom programa *VisiMiX 2000 Turbulent*. U svrhu određivanja optimalne konfiguracije miješalice za suspendiranje zeolita, u radu je također sagledavan i utrošak snage miješanja pri ispitivanim promjerima miješala i masama zeolita.

Rezultati ispitivanja ukazali su da se s povećanjem promjera PBT miješala smanjuje kritična brzina vrtnje miješala. Dobiveni rezultati posljedica su hidrodinamičkih zbivanju u reaktoru koji se mijenjaju s povećanjem promjera miješala. Uočeno je također 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).

***Ključne riječi*:** suspendiranje, radijalno miješalo, promjer miješala, snaga miješanja, zeolit

SUMMARY

Axial impeller is the most common used impeller when suspending solids. Numerous research have shown that solids suspension is significantly dependent on impeller geometry. This research work focuses on the influence of diameter of pitched blade turbine (abbrev. PBT impeller) on the state of complete suspension of zeolite NaX in copper (II) nitrate solution. Experiments were carried out in a glass reactor with a diameter of 0.14 m. In order to investigate the influence of impeller diameter on solids suspension, the diameter of the impeller, D/ d_T, was varied in the range of 046 – 0.68. For each diameter tested, a specific impeller speed was required for achieving the state of complete suspension, N_{JS}, at four different zeolite concentration masses. In order to gain a more complete insight into the hydrodynamics in the mixer, liquid flow simulation was performed using the *VisiMix 2000 Turbulent* program.

To find the optimum configuration of the suspended zeolite, power consumption at different impeller diameters zeolite masses was tested as well. It was found that the critical impeller speed was reduced as the diameter was increased. Obtained results are a consequence of hydrodynamic conditions which change with an increase of impeller diameter. Additionally, it was discovered that the critical impeller speed decreases with a reduction of zeolite concentration, however, this effect was considerably less pronounced than the aforementioned relationship. Power consumption decreases with an increase of impeller diameter and is minimal at the largest diameter investigated (D/d_T= 0.68).

***Keywords*:** suspension, radial impeller, impeller diameter, power consumption, zeolite

SADRŽAJ

UVOD 1

1. OPĆI DIO 3

1.1. OPERACIJA MIJEŠANJA U PROCESNOM INŽENJERSTVU 4

1.1.1. PROVEDBA OPERACIJE MIJEŠANJA 5

1.2. MIJEŠANJE U SUSTAVIMA ČVRSTO/KAPLJEVITO (SUSPENDIRANJE) 10

1.3. SNAGA MIJEŠANJA 13

1.4. ZEOLITI 15

2. EKSPERIMENTALNI DIO 18

2.1. METODOLOGIJA 19

2.1.1. APARATURA ZA PROVEDBU EKSPERIMENTA 19

2.1.2. Provedba eksperimenta 22

3. REZULTATI RADA 23

3.1. UTJECAJ PROMJERA AKSIJALNOG PBT MIJEŠALA NA MINIMALNU BRZINU VRTNJE POTREBNU ZA SUSPENDIRANJE ZEOLITA NaX 24

3.2. ODREĐIVANJE ZAKRETNOG MOMENTA MIJEŠALA PRI STANJU POTPUNE SUSPENZIJE ZEOLITA 29

3.3. ODREĐIVANJE UTROŠKA SNAGE MIJEŠANJA PRI STANJU POTPUNE SUSPENZIJE 32

4. RASPRAVA 33

5. ZAKLJUČAK 37

6. LITERATURA 39

7. SIMBOLI 42

UVOD

Suspendiranje koje predstavlja miješanje čvrste i kapljevite faze u kemijskoj industriji se primjenjuje u procesima otapanja, izluživanja, kristalizacije, ionske izmjene, polimerizacije te katalitičkim reakcijama. Suspendiranje se obično provodi u miješalicama s mehaničkim miješanjem u kojima je sveukupan tok kapljevine funkcija karakteristika primijenjenog miješala kao što su tip miješala, njegova geometrija, prisutnost ili odsutnost razbijala virova, geometrije reaktora i reoloških karakteristika matične otopine. Prilikom odabira aparature odnosno konfiguracije miješalice za provedbu suspendiranja moraju se ispuniti određeni zahtjevi kao što su postizanje stanja potpune suspenzije, odgovarajuće brzine reakcije ukoliko je zastupljena u sustavu te racionalni utrošak snage miješala.

Prema Zwieteringovu kriteriju stanje potpune suspenzije okarakterizirano je brzinom vrtnje miješala pri kojoj se ni jedna čestica ne zadržava na dnu reaktora duže od jedne do dvije sekunde, ili tzv. kritičnom brzinom vrtnje . Pri ovim uvjetima površina čvrstih čestica potpuno je izložena za međufazni prijenos tvari i energije. Povećanjem brzine vrtnje iznad kritične rezultira većim utroškom energije, dok se brzina prijenosa tvari i energije najčešće tek malo povećavaju. Upravo zbog navedenog optimalni uvjeti provedbe suspendiranja često se postižu upravo pri stanju potpune suspenzije.

U ovom radu provodit će se suspendiranje čestica zeolita NaX. Zeoliti se zbog svojstvenosti da ione iz vlastite strukture izmjenjuju s ionima iz otopine često primjenjuju kao ionski izmjenjivači u procesima obrade otpadnih voda, za pročišćavanje zraka, uklanjanje teških metala iz otopina i sl. U slučaju kada se ionska izmjena na zeolitima provodi u reaktoru s miješanjem proces je potrebno provoditi pri stanju potpune suspenzije.

Suspendiranje čestica zeolita NaX u ovim istraživanjima provodilo se u miješalici s mehaničkim miješanjem, primjenom aksijalnog turbinskog miješala s četiri lopatice nagnute pod kutom od 45 ° (tzv. PBT miješalo). Cilj rada bio je sagledati utjecaj promjera primijenjenog miješala na postizanje stanja potpune suspenzije u miješalici standardnih dimenzija u kojoj je volumen suspenzije iznosio 2,14 dm^3. U tu svrhu omjer promjera PBT miješala, D, u odnosu na promjer posude, d_T mijenjan je u području od 0,46 do 0,68. Za svaki promjer miješala određeno je stanje potpune

suspenzije za četiri različite masene koncentracije zeolita. Stanje potpune suspenzije određivano je vizualnom Zweiteringovom metodom. Za postignuta stanja potpune suspenzije određen je također utrošak snage miješanja, a kako bi se dobio uvid u hidrodinamička zbivanja unutar sustava pri ispitivanim uvjetima izvršena je i simulacija toka kapljevine primjenom programa *VisiMix 2000 Turbulent.*

1. OPĆI DIO

1.1. OPERACIJA MIJEŠANJA U PROCESNOM INŽENJERSTVU

Miješanje je prisutno u mnogim industrijskim granama (prehrambenoj, farmaceutskoj, kemijskoj, petrokemijskoj i kozmetičkoj industriji, u proizvodnji bojila, papira, obradi otpadnih voda). Primjenjuje se ukoliko se želi dobiti smjesa homogenih svojstava, ubrzati prijenos tvari i energije, te ako se želi ubrzati kemijska reakcija u sustavu. Ovisno o proizvodu mijenja se i intenzitet miješanja i vrijeme potrebno da se postigne željeni stupanj homogenosti.

Miješanje se može provoditi u jednofaznim ili višefaznim sustavima.

Pod miješanjem u jednofaznim sustavima podrazumijeva se proces homogenizacije miješljivih kapljevina. Ovo je najjednostavniji slučaj jer tijekom takve operacije ne dolazi do prijenosa mase niti je prisutna kemijska reakcija. Međutim, ovako relativno jednostavni sustavi postaju složeniji ukoliko se radi o miješanju dviju kapljevina veće razlike u viskoznosti i gustoći tretiranih kapljevina.

Ukoliko su u nekom procesu prisutne dvije nemiješive kapljevine, tada se radi o miješanju u višefaznim sustavima.

Primjer miješanja u dvofaznim sustavima je miješanje čvrstih čestica u kapljevini tzv. suspendiranje. U ovom slučaju miješanja sprječava stvaranja nakupina čvrstih čestica kao i njihovo taloženje, odnosno plutanje. Suspendiranje čvrstih čestica osigurava pogodne uvjete za prijenos tvari te uspješno odvijanje kemijske reakcije. U kemijskoj industriji se također često može susresti miješanje u sustavima plin/kapljevina. Ono obuhvaća kontaktiranje plinova i kapljevina s ciljem stvaranja disperzije plina u kontinuiranoj kapljevitoj fazi. Nastala međufazna površina pogoduje intenzivnijem prijenosu tvari.

Miješanje u trofaznim sustavima (plinovito/kapljevito/čvrsto) još uvijek nije dovoljno istraženo te predstavlja veliki interes znanstvenih istraživanja.

Miješanja čvrstih čestica tzv. suhih nasipina specifičan je primjer operacije miješanja. Provodi se bez prisustva fluida. Obično se provodi šaržno, ali se u posljednje vrijeme javlja veliki interes i za kontinuirana postrojenja.

1.1.1. PROVEDBA OPERACIJE MIJEŠANJA

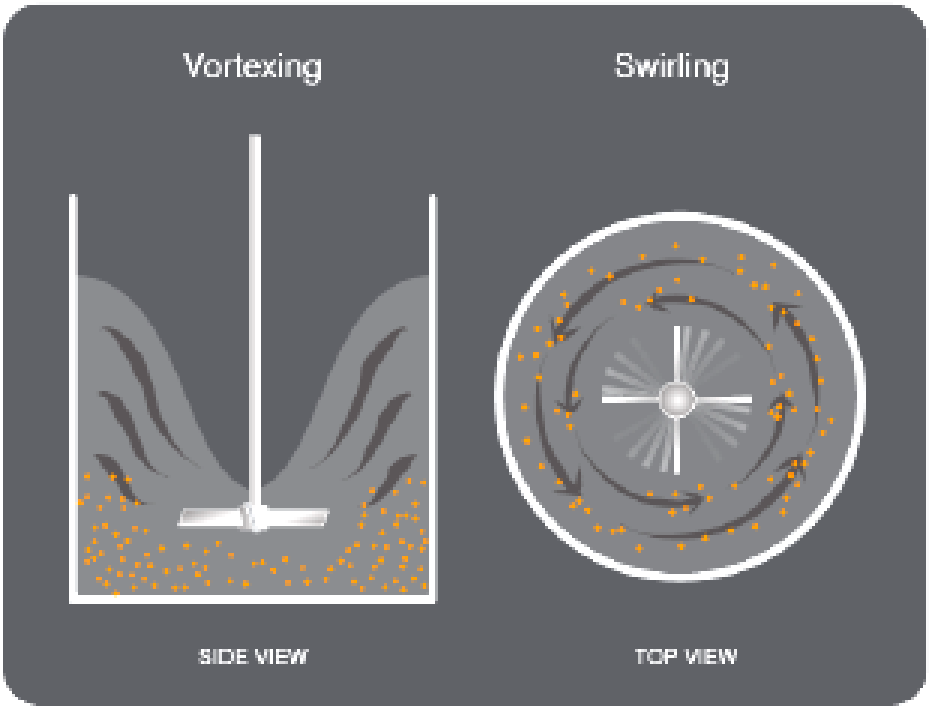
Miješanje se najčešće provodi mehaničkim uzgibavanjem u posebno dimenzioniranim posudama. Potrebno je razumjeti tok mase koja se miješa, kako bi se pravilno izabrala i oprema za provedbu miješanja. Mehanizam miješanja se prikazuje u odnosu na laminarni i turbuletni režim strujanja, jer se hidrodinamičke karakteristike tih režima znatno razlikuju. Međutim, treba voditi računa o postojanju prijelaznog područja u kojem postoji utjecaj oba režima.

Laminaran (slojeviti) režim strujanja javlja se pri nižim brzinama, molekule se kreću u pravilnim paralelnim slojevima koji se međusobno ne miješaju, a sile inercije brzo nestaju. Kako bi se u ovakvom sustavu uspostavila homogenost, miješalo mora zauzimati značajan dio posude ukoliko se želi uspostaviti adekvatno gibanje ukupne mase. Uz površinu koja rotira stvara se veliki gradijent brzina te se tako stvaraju velika smična naprezanja koja nastoje elemente kapljevine deformirati i istegnuti, pri čemu se oni kontinuirano stanjuju i izdužuju, pa tako dolazi do smanjenja razlike koncentracije između elemenata kapljevine uslijed molekularne difuzije.

U većini praktičnih slučajeva tok ukupne mase kapljevine, uzrokovan rotacijom miješala u posudi za miješanje, turbulentnog je karaktera. Viskoznost kapljevina koja se miješa u tim sustavima je manja od 10 mPas. Inercijske sile omogućuju cirkulaciju kapljevine u posudi, a neposredno uz miješalo postići će se maksimalna vrtložna difuzija. Samim tim, cjelokupni proces se odvija znatno brže sve do molekularne razine u odnosu na laminarno strujanje. [(1)]

O uspješnost provođenja operacije miješanja ovisi nekoliko osnovnih čimbenika. Prvi se nameće pravilan odabir posude u kojoj se provodi miješanje. Geometrija posude i njezine dimenzije moraju osiguravati najpovoljnije fluida bez stvaranja tzv. *mrtvih zona*, odnosno zona slabe učinkovitosti miješanja.

Pri intenzivnijem miješanju kapljevine dolazi često do nepoželjne pojave stvaranja vira (*Slika 1*). Kako bi se to spriječilo na unutarnju stjenku posude se ugrađuju razbijala virova. Potrebno je veliku pozornost usmjeriti na izvedbu dijela razbijala koji se nalazi u neposrednoj blizini dna posude. Ukoliko je ta izvedba nepravilno izvedena mogla bi značajno remetiti cirkulaciju kapljevine u posudi za miješanje.



Slika 1. *Stvaranje vrtloga* [(1)]

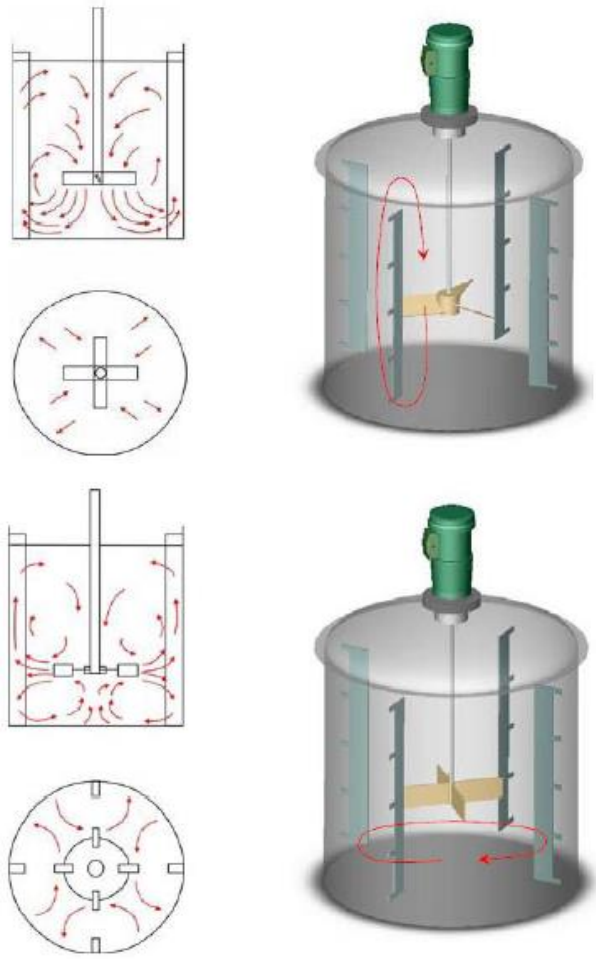
Osim geometrija posude, na strujanje mase koja se miješa, utječe i geometrija samog miješala. Geometrija miješala i fizikalna svojstva sustava, te geometrija miješalice u znatnoj mjeri određuju stanje izmiješanosti suspenzije.

Danas postoje veliki broj različitih vrsta miješala, *Tablica 1*.

Tablica 1. *Osnovni tipovi miješala*

NAZIV MIJEŠALA	OBLIK MIJEŠALA	TOK KAPLJEVINE
Turbinsko miješalo s ravnim lopaticama		Radijalan tok kapljevine
Turbinsko miješalo s diskom i ravnim lopaticama tzv. "*Rushtonova turbina*"		Radijalan tok kapljevine
Turbinsko miješalo s lopaticama pod nagibom		Radijalno-aksijalan tok kapljevine
Turbinsko miješalo sa zakrivljenim lopaticama		Radijalan tok kapljevine
Propelersko miješalo		Aksijalan tok kapljevine
Spiralno miješalo		Aksijalan tok kapljevine s izraženom tangencijalnom komponentom strujanja
Sidrasto miješalo		Radijalan tok kapljevine s izraženom tangencijalnom komponentom strujanja

Osnovna podjela zasniva se na vrsti strujanja fluida koje određeno miješalo razvija u miješalici. Tako postoje miješala koje usmjeravaju tok kapljevine u aksijalnom i radijalnom smjeru (*Slika 2*).



Slika 2. *Prikaz aksijalnog i radijalnog toka kapljevine* [(1)]

Aksijalni tok kapljevine je paralelan s osovinom miješala - dio kapljevine struji niz osovinu, dok uzlazni dio struji uz stjenku posude. Ovakav tip miješala koristi se u sustavima u kojima je potrebno ostvariti intenzivnu cirkulaciju kapljevine i/ili suspendirati čestice u kapljevini.[(2)]

Kod radijalnog toka kapljevina se izbacuje velikom brzinom prema stjenci posude gdje se tok dijeli na dvije struje. Jedna ide prema površini, a druga struji prema dnu posude odakle ponovno dospijeva u os vrtnje.[(3)]

Za miješanje heterogenih sustava uobičajeno se koriste turbinska miješala koja fluid usmjeravaju u aksijalnom smjeru. Prema teoriji turbulencije (Kolmogorov), miješalo uzrokuje nastajanje makro vrtloga koji odgovaraju dimenziji miješala.[4] Zbog sila trenja u kapljevini primarni se vrtlozi razbijaju u sve manje do postizanja najmanjeg vrtloga te se veličina tog najmanjeg vrtloga zove mikro mjerilo turbulencije. Na procese miješanja koji ovise o makro miješanju (homogenizaciji, suspendiranje), jako utječe veličina uređaja.[4] Mikro mjerilo turbulencije je odgovorno za miješanje kapljevina, odnosno mali vrtlozi da se sustav kapljevina – kapljevina izmiješa.

S druge strane, kod miješanja suspenzija oni nisu dovoljni da se čestica podigne s dna posude, a pogotovo da se postigne homogenost suspenzije. Stanje sustava tijekom miješanja se mijenja time se mijenja i mjerilo turbulencije odgovorno za miješanje.

1.2. MIJEŠANJE U SUSTAVIMA ČVRSTO/KAPLJEVITO (SUSPENDIRANJE)

Suspendiranje je proces miješanja sustava čvrste i kapljevite faze, bez obzira radi li se o česticama koje se talože ili plivaju na površini kapljevine.

Kako se razlikuju gustoće čestica i gustoće kapljevina razlikuju se sedimentirajuće (gustoća im je veća od kapljevine) i plutajuće čestice (gustoća im je manja od kapljevine u kojoj trebaju biti suspendirane). Čvrsta faza može biti prisutna u sustavu kao element koji ne sudjeluje direktno u reakciji (kao katalizatori), ali isto tako postoji niz operacija u kojima su čvrste čestice direktno podvrgnute određenim fizikalnim i/ili kemijskim promjenama.

Osnovna svrha suspendiranja je povećanje brzine prijenosa tvari između čvrstih čestica i kapljive faze kako bi se postigla što ravnomjernija raspodjela čvrstih čestica u određenom sustavu. Susreće se u procesima otapanja, izluživanja, polimerizacije, kristalizacije, ionske izmjene te u katalitičkim reakcijama.

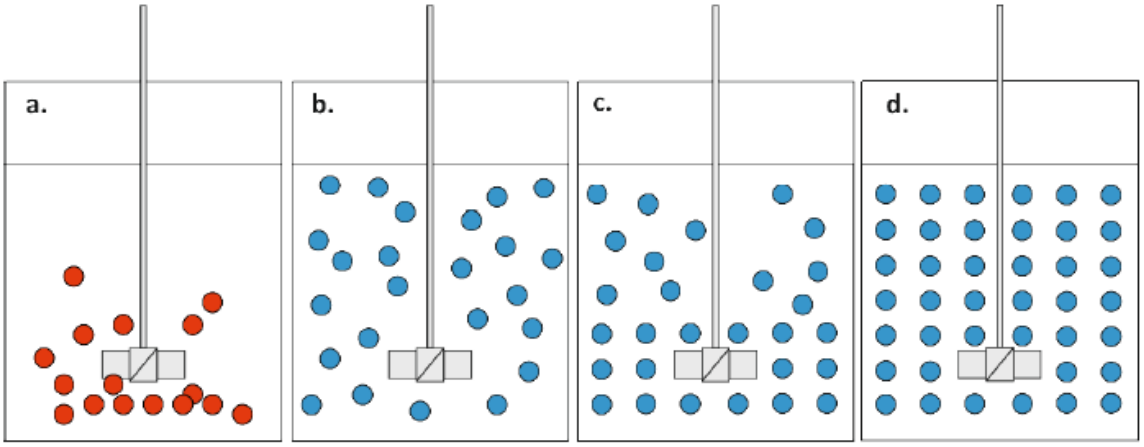
Miješanje je neophodno da bi se u sustavu stvorio što veći stupanj homogenosti suspezije. U industriji različiti procesi zahtijevaju i različite stupnjeve homogenosti suspendiranog sustava. Ponekad je relativno potreban visok stupanj homogenosti, ali u većini slučajeva dovoljno je da su sve čestice suspendirane u kapljevini, odnosno da je cijela njihova površina u kontaktu s kapljevinom.

U navedenim slučajevima vrijednosti Reynoldsove značajke obično su veće od $2 \cdot 10^4$, pa se takvi sustavi smatraju izrazito turbulentnim. Većina karakteristika turbulentnog toka nije kontrolirana molekularnom strukturom kapljevine, već su one isključivo posljedica toka kapljevine.[5]

Pri postupku suspendiranja primjenjuju se miješala raznih geometrija, najučinkovitijom se pokazala Rushtonova konfiguracija (*Slika 7*). Visina stupca kapljevine jednaka je promjeru posude za miješanja, a posuda sadrži četiri razbijala vira. Kao miješala koriste se oni tipovi koji uzrokuju aksijalni tok kapljevine, ostvarujući pri tome dobru cirkulaciju suspenzije unutar posude. Preporučen promjer miješala iznosi 1/3 promjera posude za miješanje.

Prema karakteristikama stanja u kojima se suspendirane čestice mogu nalaziti, razlikujemo četiri osnovna stanja, *Slika 3*:

- stanje nepotpune suspenzije,
- stanje potpune suspenzije,
- stanje intermedijalne suspenzije,
- stanje homogene suspenzije.



Slika 3. *Stanja suspenziije: a. nepotpuna suspenzija, b. potpuna suspenzija, c. intermedijalna suspenzija, d. homogena suspenzija* [5]

Za stanje nepotpune suspenzije karakteristična je pojava mirujućih nakupina ili nakupina koje se periodički obnavljaju na dnu posude za miješanje. Sadržaj nakupina ne raste s vremenom.[6]

Stanje potpune suspenzije se postiže u trenutku kada su sve sedimentirajuće čestice podignute s dna posuda i nalaze se u stanju gibanja. Pri tome ni jedna čestica ne ostaje duže na dnu od nekoliko sekundi, odnosno na površini kapljevine. Ovo stanje se postiže pri brzini miješanja, koja se označava kao N_{JS} , pri kojoj je cjelokupna površina čestica u kontaktu s kapljevinom. Za određivanje stanja potpune suspenzije najčešće se koriste tzv. vizualne metode. Kriteriji za određivanje potpune suspenzije po Zwieteringu je da nijedna čestica ne ostaje na dnu posude duže od 1 do 2 sekunde, ali ovaj kriterij je njegovo ograničavanje na promatranje dna, bez utvrđivanja stanja u ostalim dijelovima posude što predstavlja nedostatak ove metode.[7]

Kako bi se izbjegao nedostatak prehodne metode Einenkel i Mersmann[6] predlažu metodu mjerenja suspediranog sloja tj. visine među površine čista kapljevina/suspenzija, prema kojoj je stanje potpune suspenzije postignuto kad je visina oblaka suspenzije podignuta na visinu stupca kapljevine od 0.9H.

Kod intermedijalne suspenzije sedimentirajuće čestice ne zadržavaju se na dnu posude, čak ni u onom kratkom periodu predviđenom za stanje potpune suspenzije.

Stanje homogene suspenzije postiže se ukoliko je koncentracija i raspodjela veličina čvrstih čestica konstanta u cijelom prostoru posude. Ovo granično stanje vrlo teško je realizirati jer zahtjeva znatno veću brzinu miješanja, pa je i utrošena snaga miješanja veća. Dakle, radi se o jednom graničnom stanju koje je vrlo teško realizirati.

1.3. SNAGA MIJEŠANJA

Snaga miješanja predstavlja količinu energije koju je potrebno utrošiti kako bi se ostvarilo gibanje fluida uslijed provedbe mehaničkog miješanja. Jedan je od važniji parametara pri konstrukciji i odabiru uređaja za miješanje.

Eksperimentalno je određeno da snaga miješanja ovisi o sljedećim varijablama:

- brzini vrtnje miješala, N
- promjeru miješala, D
- gustoći kapljevine, ρ_L
- viskoznosti kapljevine, μ_L
- gravitacijskom ubrzanju, g.

Snaga kao funkcija navedenih varijabli može se napisati [8]:

$$P = f(D, N, \rho, \mu_L, g) \tag{1}$$

ili primjenom postupka dimenzijske analize dolazi se do izraza:

$$N_p = K \cdot Re^m \cdot Fr^n \tag{2}$$

Značajku snage miješanja predstavlja N_p:

$$N_p = \frac{P}{\rho_L \cdot N^3 \cdot D^5} \tag{3}$$

dok

$$Re = \frac{\rho_L \cdot N \cdot D^2}{\mu} \tag{4}$$

je modificirana Reynoldsova značajka u kojoj je karakteristična veličina promjer miješala, a kao brzina figurira obodna brzina:

$$v = ND, \tag{5}$$

Fr je modificirana Froudova značajka:

$$Fr = \frac{DN^2}{g} \tag{6}$$

Radi jednostavnijeg dijagramskog prikazivanja međusobnih ovisnosti navedenih značajki, jednadžba (2) se može prikazati na sljedeći način:

$$\frac{N_p}{Fr^n} = K \cdot Re^m \tag{7}$$

Odnosno

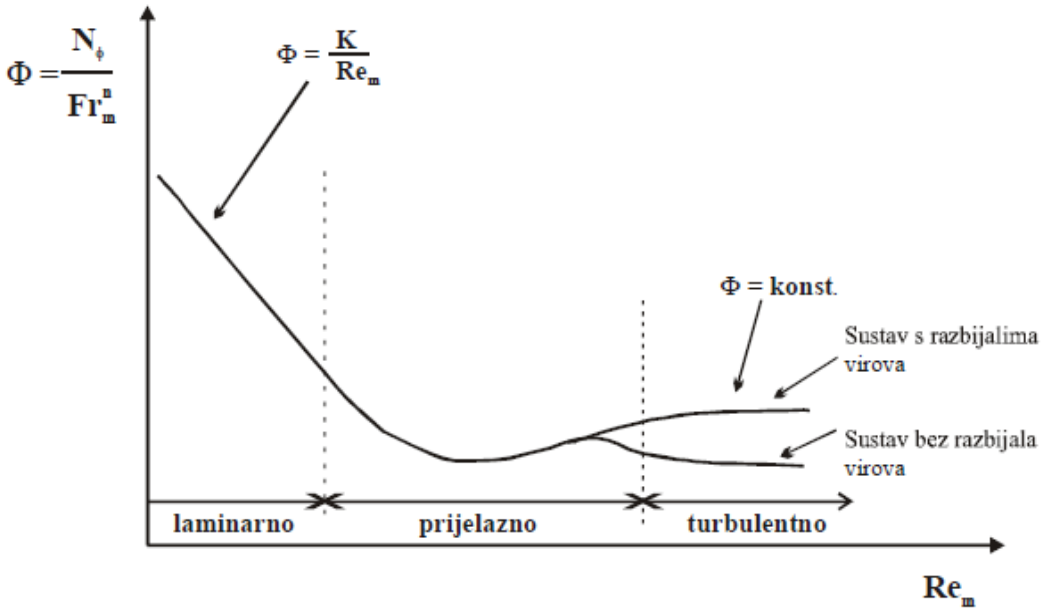
$$\Phi = K \cdot Re^m \tag{8}$$

Φ se definira kao značajka funkcije snage.

U sustavima u kojima ne dolazi do stvaranja virova u masi koja se miješa, tj. kod miješalica s razbijalima virova, gravitacija sile neznatno utječe na sustav, tako da je eksponent Froudove značajke jednak nuli, a $Fr = 1$.
Tada se može izraz prikazati na sljedeći način:

$$\Phi = N_P = K \cdot Re^m \tag{9}$$

Značajka funkcije snage je jednaka značajci snage. Grafički prikaz ovisnosti značajke funkcije snage o Reynoldsovoj značajci naziva se *krivulja snage, Slika 5.*



Slika 4. *Krivulja snage*

Za svaki tip miješala postoji odgovarajuća krivulja snage. Ukoliko se u literaturi ne može pronaći odgovarajuća krivulja koja odgovara određenoj geometriji miješala, potrebno je provesti eksperimentalno mjerenje i snimiti krivulju za tu geometriju.

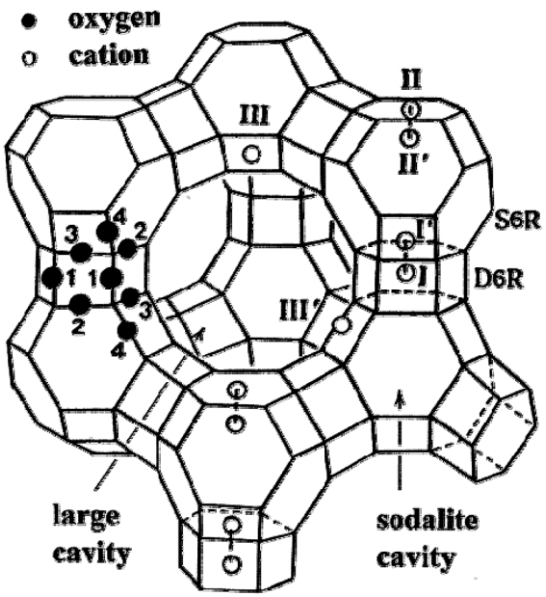
1.4. ZEOLITI

Zeoliti su prirodni i/ili sintetički hidratizirani aluminosilikati s trodimenzionalnom kristalnom strukturom, sačinjenoj od aluminijevih, silicijevih i kisikovih atoma u čijim se porama nalaze molekule vode. Voda se može istjerati zagrijavanjem te zeolit može zatim apsorbirati druge molekule odgovarajuće veličine. Koriste se za razdvajanje smjesa selektivnom apsorpcijom i kao prirodni ionski izmjenjivači za mekšanje vode. Prirodni su vulkanski minerali. Nastaju kondenzacijom plinova i para nakon vulkanskih erupcija, a talože se kao vulkanske nakupine i stijene. Nalaze se u oceanima u velikim zalihama. U prirodi je pronađeno oko 50 zeolitnih minerala, a se razlikuju po sastavu, načinu umrežavanja u trodimenzionalnu strukturu i dimenzijama pora, dok samo njih šest je u većim količinama prisutno u sedimentnim naslagama, a to su klinoptilolit, habazit, mordenit, erionit, hojlandit i filipsit. Prvi prirodni zeolitni mineral stilbit otkrio je švedski kemičar i mineralog Freiherr Axel Fredrick Cronstedt 1756. godine. Budući da je mineral bubrio kada se grijao u plamenu puhaljke, nazvao ga je zeolit, što dolazi od grčkih riječi *zeo* i *lithos* koje znače kipjeti i kamen.

Struktura zeolita sastoji se od trodimenzionalne mreže $(SiO_4)^{4-}$ i $(AlO_4)^{5-}$ tetraedarskih jedinica spojenih kisikovim atomima. Tetraedri se mogu kombinirati u velikom broju te se povezivati u pravilne strukture pri čemu nastaju dvodimenzionalne i trodimenzionalne sekundarne strukture jedinice te njihovom kombinacijom nastaju prostorne strukture zeolita. U šupljinama i kanalima zeolita nalazi se voda, koja čini 10 – 25 % njihove mase. Kristalna rešetka negativno je nabijena zbog zamjene Si^{4+} sa Al^{3+}. Ugrađivanjem alkalijski i zemnoalkalijski kationi (Na^+, K^+, Ca^{2+} i Mg^{2+}) u kanale i šupljine zeolitne strukture, neutralizira se negativan naboj. Šupljine u kristalnoj strukturi zeolita reda su veličine molekula stoga se ovi materijali vrlo često nazivaju i molekularnim sitima, tj. razdvajanja molekula na temelju veličine i oblika. Zbog fizikalno kemijskih svojstava i specifičnosti strukture imaju široku primjenu. No treba naglasiti da postoji razlika između prirodnih i sintetskih zeolita. Sintetski zeoliti se mogu načiniti u raznim omjerima silikata i aluminija. Zeoliti s visokim udjelom silikata su hidrofobni (ne vlaže se, te vežu ugljikovodike iz smjesa). Zeoliti s niskim udjelom silikata su hidrofilni. Imaju mnogo slobodnih kationa i veliki afinitet prema

polarnim molekulama (vežu molekule u svoj sustav kako bi povećali koordinacijski broj).

NaX je sintetski zeolit, analog prirodnog zeolita filipsita. Osnovna sirovina koja se koristi za dobivanje zeolita s nižim sadržajem silicijeva dioksdira je kaolin. Kaolin pripada grupi minerala poznatih kao glina. Sinteza zeolita NaX iz kaolina provodi se u dva koraka. Prvi je reakcija toplinske aktivacije kaolina, matakaolinizacija, kako bi se dobio dehidroksilirani produkt, metakaolin. Zatim se vrši hidrotermalna reakcija, zeolinizacija, metakaolina u lužnatom mediju uz dodatak silicija za kristalizaciju zeolita. Za reakciju metakaolinizcije temperatura (400-1000 ° C) ima važnu ulogu u određivanju tipa zeolita nastalog tijekom hidrotermalne reakcije. Pod određenim uvjetima, nekalinjeni kaolin djelomično se pretvara u hidroksi sodalit (HS), dok se metakaolini pripravljeni na 400, 500 i 600 ° C također mijenjaju u HS, ali brže. Povećavajući temperaturu metakaolinizacije na temperature veće od 700° C, dobiva se željeni produkt zeolitni NaX (veća temperatura, brža reakcija). Osim temperature na stvaranje zeolita NaX utječu omjer SiO_2/Al_2O_3 reakcijske smjese i vrijeme zeolizacije.[9]



Slika 5. *Struktura zeolita NaX*

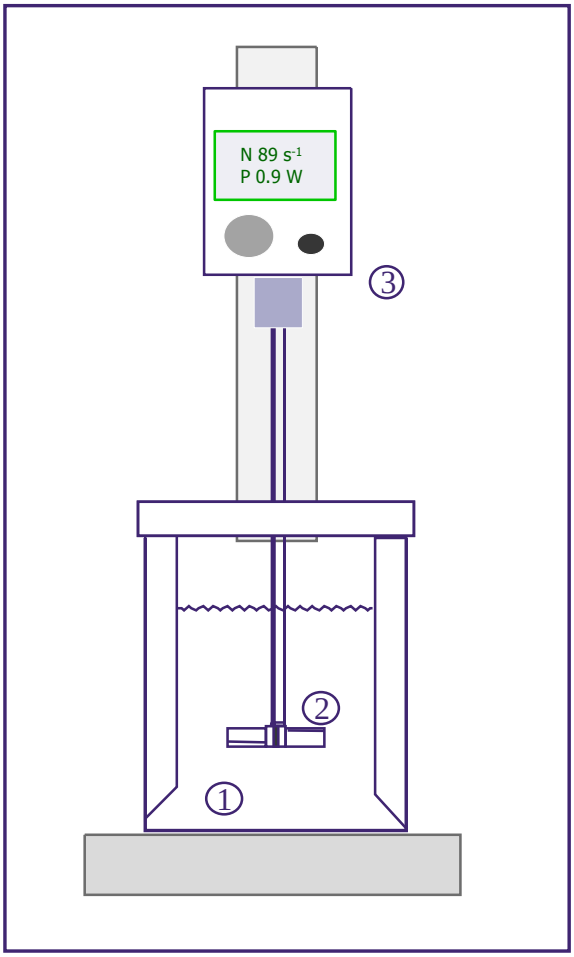
Zeoliti su najvažniji anorganski kationski izmjenjivači. Organske smole obično se rado rabe zbog većih kation-izmjenjivačkih sposobnosti, većih brzina reakcija i bolje kemijske otpornosti. Zeoliti, nasuprot tome, pokazuju veće kation-izmjenjivačke selektivnosti, dobru otpornost na temperaturu.[10] U zeolitima do izmjene dolazi zbog aktivnih hidratiziranih kationa u kanalima koji tvore kruti anionski kostur. Za razliku od strukturnih atoma aluminija i silicija koji su međusobno vezani kemijskim (kovalentnim) vezama preko zajedničkih atoma kisika, kationi su s alumosilikatnom strukturom vezani uglavnom slabijim elektrostatskim vezama, što uvjetuje njihovu pokretljivost i mogućnost zamjene s kationima iz otopine. Svaki zeolit ima jedinstvenu strukturu, što dovodi do neuobičajenih tipova kationskih selektivnosti. Selektivnost je definirana kao mjera sklonosti koju izmjenjivač pokazuje za jedan ion u odnosu na drugi. Taj je parametar funkcija elektrostatskih međureakcija kationa s negativno nabijenim izmjenjivačkim mjestima na kosturu i međureakcija kationa s molekulama vode u otopini. U slučaju zeolita s većim Si/Al omjerima, preferirani su veći, slabo hidratizirani kationi, kao što su Cs^+, Rb^+ i K^+ . Nasuprot tome, zeoliti s manjim Si/Al omjerom imaju sklonost za pokretljivije, manje kationе, kao npr. za Li^+ i Na^+. U tom je slučaju selektivnost kontrolirana viπe međureakcijom kation-kostur nego međureakcijom kation-voda. U slučaju dvovalentnih kationa, zeoliti bez obzira na njihov sastav, preferiraju kationе velikog promjera (npr. Ba^{2+}). Dokazano je da izostrukturni zeoliti s različitim Si/Al omjerima i zbog toga različitim gustoćama naboja kostura mogu pokazivati znatno različita kation-izmjenjivačka svojstva. Uglavnom se koriste kao adsorbenti ili katalizatori u kemijskoj industriji, rafineriji nafte i plinskih industrija.[11] Osim toga,mogu se primijeniti u pročišćavanju prirodnog plin iz spojeva sumpora, za sušenje ulja i plinova (zrak), kao sredstva za hlađenje, u odvajanju ugljikovodika smjese, sorpcija radionuklida.

2. EKSPERIMENTALNI DIO

2.1. METODOLOGIJA

2.1.1. APARATURA ZA PROVEDBU EKSPERIMENTA

Aparatura za provedbu suspendiranja čestica zeolita u kapljevitoj fazi i određivanja utoška snage miješala prikazana je na *Slici 6.*



Slika 6. *Aparatua za provedbu eksperimenta*
(1-reaktor, 2-miješalo, 3-elektromotor)

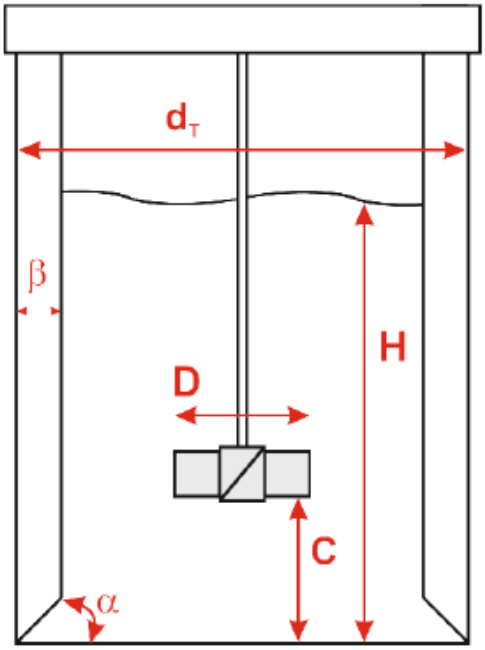
Postupak suspendiranja sedimentirajućih čestica zeolita NaX proveo se uz upotrebu turbinskog miješala s lopaticama nagnutim pod kutom od 45° (tzv. PBT miješalo) koje aksijalno usmjerava tok kapljevine.

U *Tablici 2* su prikazane geometrijske karakteristike aksijalnih mješala korištenih pri suspendiranju.

Tablica 2. *Geometrijske karakteristike upotrebljenog miješala*

TIP TURBINSKOG MIJEŠALA	*miješalo s nagnutim lopaticama*
ENGLESKI NAZIV	*Pitched blade turbine*
KRATICA KORIŠTENA U RADU	*PBT*
TOK KAPLJEVINE U POSUDI ZA MIJEŠANJE	*aksijalan*
BROJ LOPATICA MIJEŠALA	*4*
PROMJER MIJEŠALA, D (m)	*0,065m; 0,008m; 0,095m*
NAGIB LOPATICA MIJEŠALA U ODNOSU NA HORIZONSTALNU OS	*45°*
ŠIRINA LOPATICA MIJEŠALA, w	*0,19 D*

Kao reaktor, *Slika 7*, korištena je posuda s ravnim dnom (promjera d_t =0,14m) izrađena od stakla, te je na taj način omogućeno vizualno praćenje stanja sustava unutar posude. Posuda je sadržavala četiri razbijala virova standardnih dimenzija (Rv =d_t /10), postavljenih pod kutom od 90° (kut β) u odnosu na stjenku posude. Dna razbijala su izvedena pod kutom od 45° (kut α), čime se nastoji pospješiti cirkulaciju kapljevine u posudi odnosno spriječiti stvaranje *mrtvih zona*. Udaljenost miješala od dna, *c*, iznosila je 1/3 visine stupca kapljevine, *H*. Ukupni volumen suspenzije u reaktoru iznosio je 2,14 dm^3 .



Slika 7. *Osnovne geometrijske karakteristike reaktora za suspendiranje*

Miješalicom tipa *Lightnin LB2 LabMaster Mixer* regulirano je miješanje u sustavu,koja je opremljena osjetilom i mjerilom zakretnog momenta. Ovakav uređaj omogućava precizno podešavanje brzine vrtnje miješala i kontinuirano praćenje zakretnog momenta i utroška snage miješanja.

2.1.2. PROVEDBA EKSPERIMENTA

U cilju određivanja utjecaja promjera aksijalnog miješala na suspendiranje zeolita i utrošak snage miješanja, eksperimenti ovog rada izvođeni su na prethodno opisanoj aparaturi (*Slika 6*).

Tvar koja se suspendirala je zeolit NaX, čije su čestice karakteristika danih u *Tablici 3.*

Tablica 3. *Osnovne karakteristike suspendiranih čestica*

Čestice zeolita NaX	
d_p (μm)	80
ρ_p (kg/m^3)	1576
γ (kg/m^3)	4,9067 6,1332 7,3510 8,5864

Prvi dio rada odnosio se na ispitivanje utjecaja promjera PBT miješala na brzinu vrtnje potrebnu za postizanje potpune suspenzije zeolita pri njegovim različitim masenim koncentracijama. U svrhu ispitivanja utjecaja promjera miješala na promatrani proces, omjer promjera miješala i promjera reaktora (D/d_T) u ispitivanjima iznosio je 0.46, 0,57 i 0,68.

Stanje potpune suspenzije tj. minimalna brzina vrtnje potrebna za postizanje navedenog stanja, N_{JS} određivana je Zwieteringovom vizualnom metodom opisanom u dijelu *1.2.* S obzirom na subjektivnost metode, svako mjerenje N_{JS} izvršeno je deset puta, te određena srednja vrijednost. Potom, pri izmjerenim kritičnim brzinama vrtnje miješala određivan je zakretni moment.

Snaga miješanja pri stanju potpune suspenzije (P_{JS}) izračunata je iz vrijednosti kritične brzine vrtnje i zakretnog momenta, prema izrazu:

$$P = \tau \cdot N_{JS} \cdot 2\pi \text{ [W=Nm·s}^{-1}\text{]} \qquad (10)$$

Izračunata snaga je izražena po masi suspenzije koja se miješala, izračunate iz njenog volumena i gustoće. Da bi se dobio što bolji uvid u hidrodinamička zbivanja u sustavu, izvršena je simulacija toka suspenzije u miješalici uporabom programskog paketa *VisiMix 2000 Turbulent.*

3. REZULTATI RADA

3.1. UTJECAJ PROMJERA AKSIJALNOG PBT MIJEŠALA NA MINIMALNU BRZINU VRTNJE POTREBNU ZA SUSPENDIRANJE ZEOLITA NaX

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

Prilikom istraživanja korištena su miješala triju različitih promjera:

$$D_1 = 0{,}065 \text{ m}; \qquad D_1/d_T = 0{,}46$$
$$D_2 = 0{,}080 \text{ m}; \qquad D_2/d_T = 0{,}57$$
$$D_3 = 0{,}090 \text{ m}; \qquad D_3/d_T = 0{,}68.$$

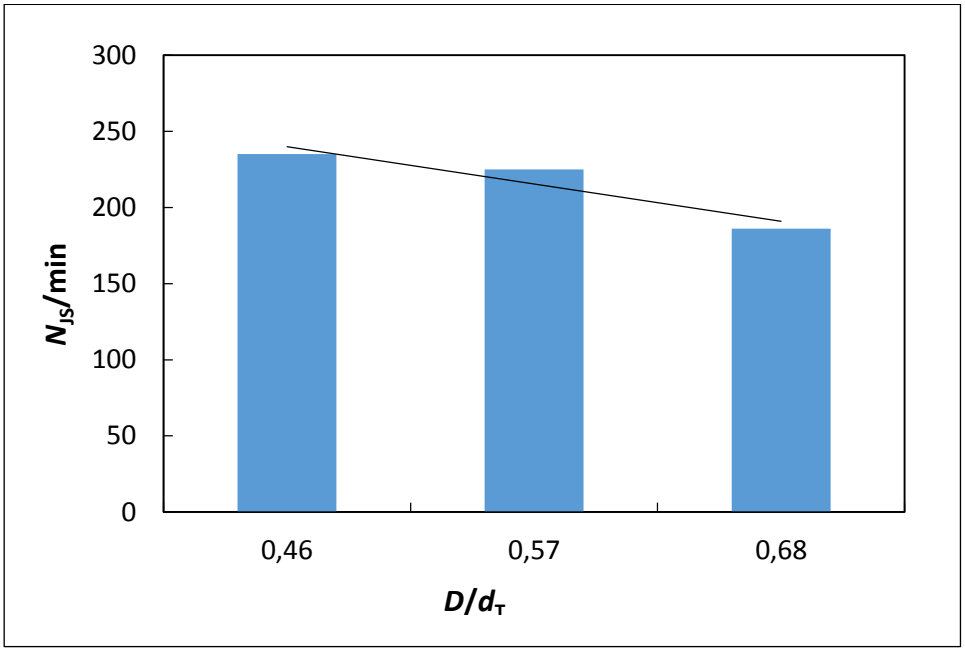
Suspendiranje čestica zeolita srednjeg promjera d_p = 80μm, provodilo se u otopini bakrova (II) nitrata. Masene koncentracije zeolita u otopini iznosile su:

$$\gamma_1 = 4{,}9067 \text{ g/dm}^3$$
$$\gamma_2 = 6{,}1332 \text{ g/dm}^3$$
$$\gamma_3 = 7{,}3510 \text{ g/dm}^3$$
$$\gamma_4 = 8{,}5864 \text{ g/dm}^3$$

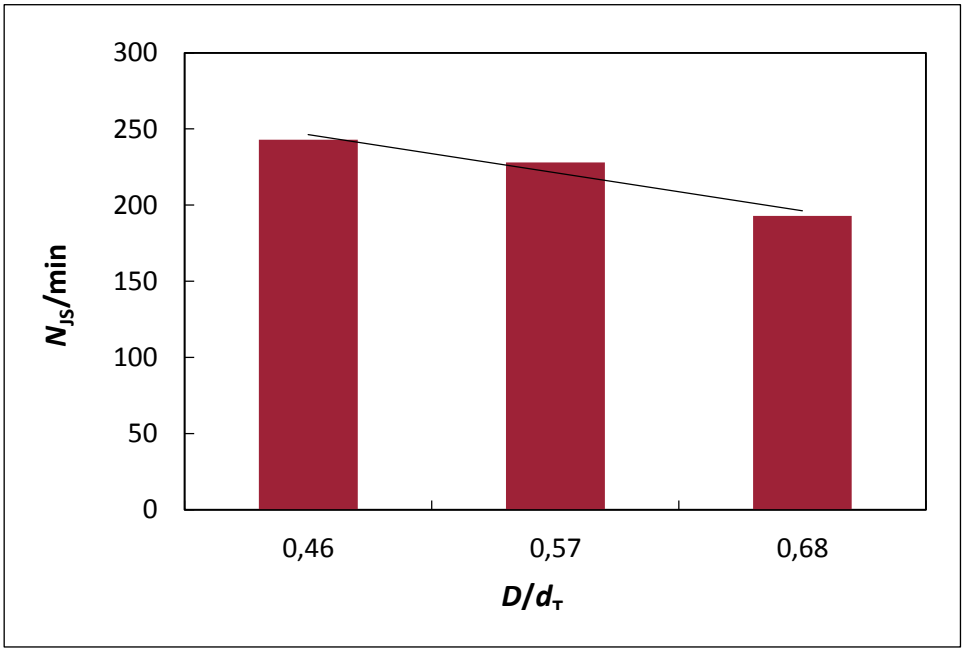
Dobiveni eksperimentalni rezultati prikazani su na *Slikama 8-11*.

Funkcionalana ovisnost kritične brzine vrtnje miješala o promjeru miješala pri zadanim koncentracijama zeolita dana je u *Tablici 4.*

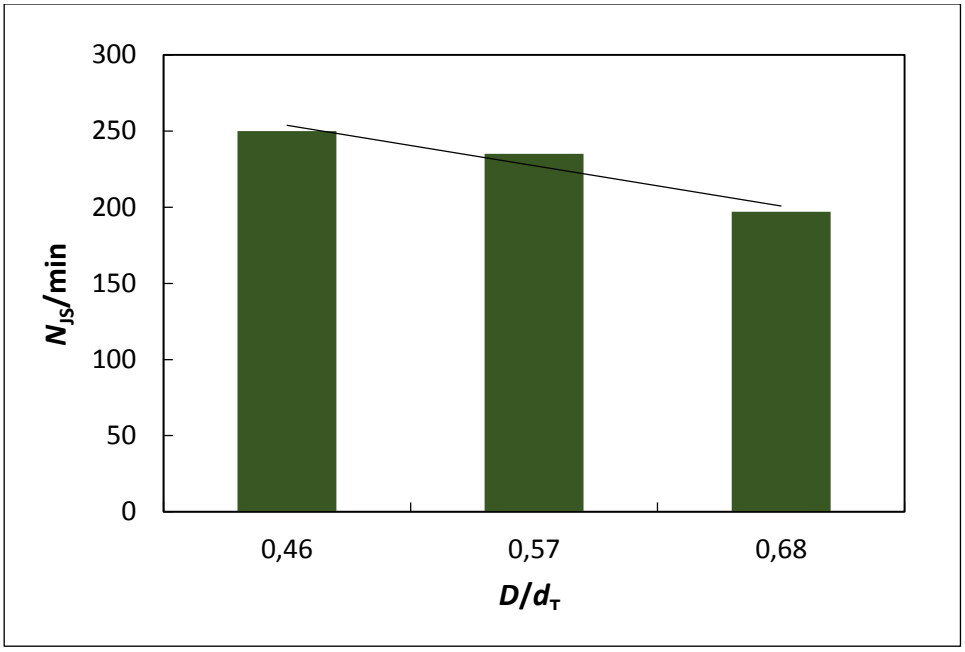
Izvršene simulacije toka suspenzije primjenom programa *VisiMix 2000 Turbulent* pri ispitivanim uvjetima u miješanja prikazane su na *slici 12.*



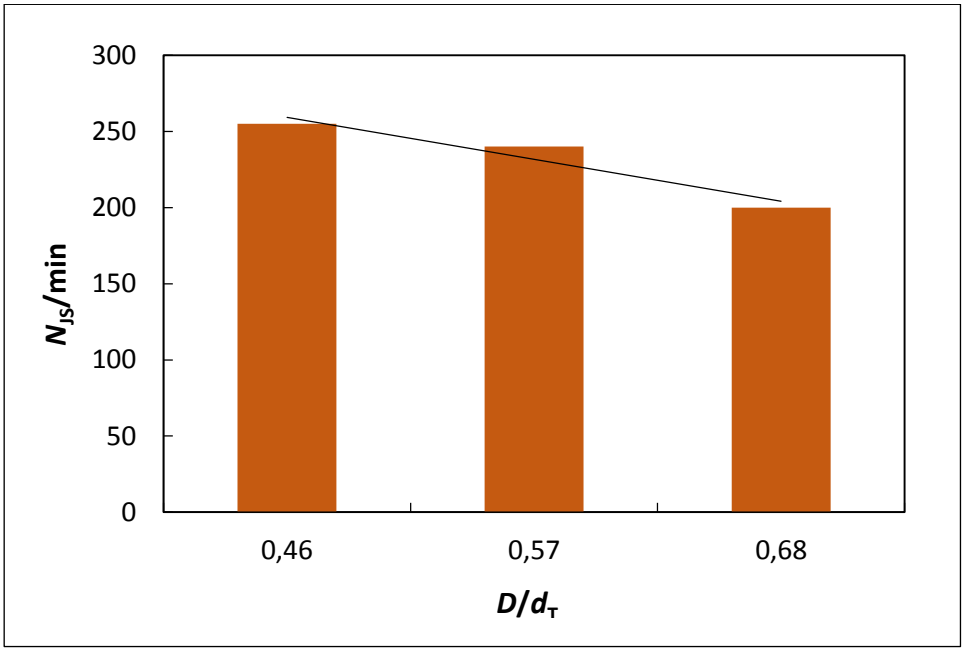
Slika 8. *Ovisnost kritične brzine vrtnje, N_{JS}, o promjeru miješala, D/d_T, pri γ_1 koncentraciji zeolita.*



Slika 9. *Ovisnost kritične brzine vrtnje, N_{JS}, o promjeru miješala, D/d_T, pri γ_2 koncentraciji zeolita.*



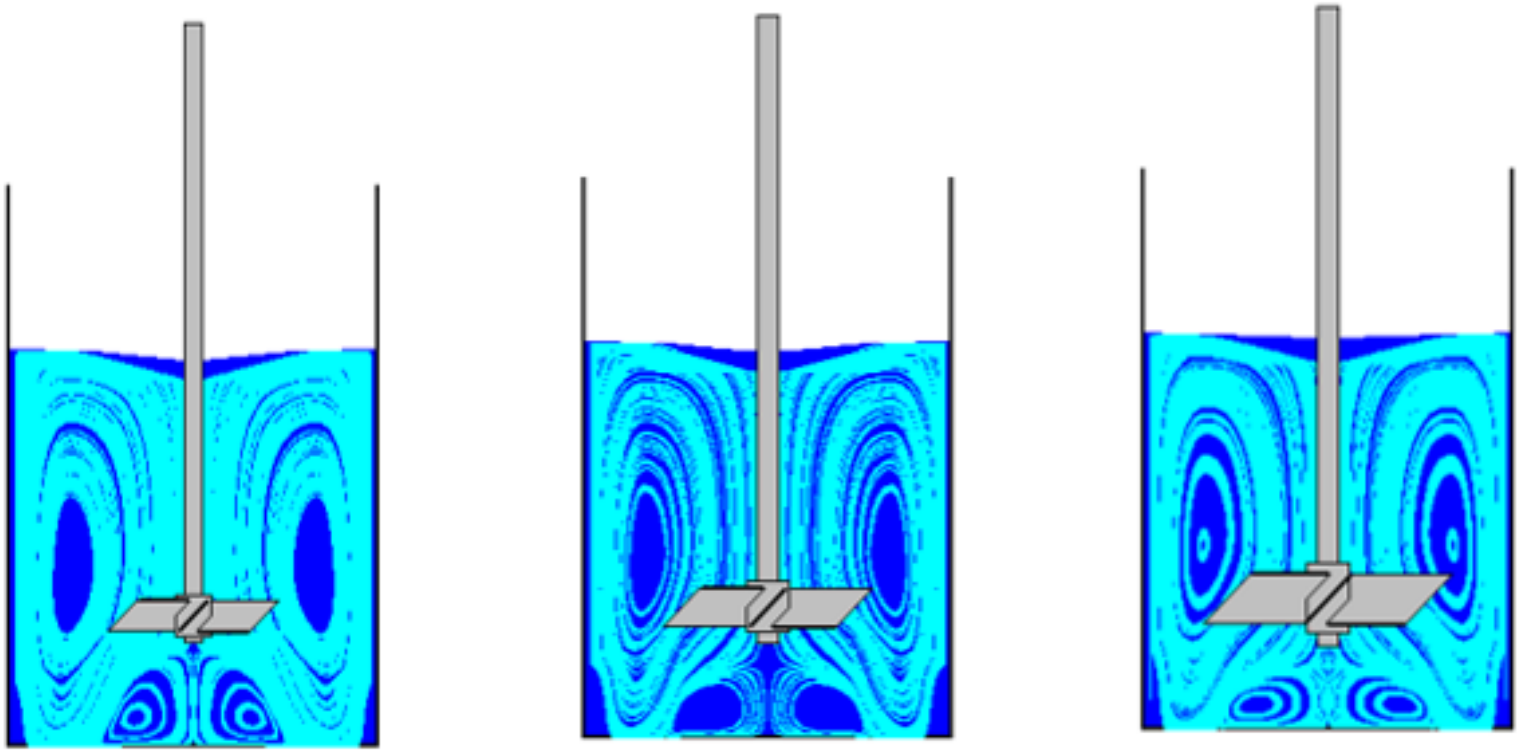
Slika 10. *Ovisnost kritične brzine vrtnje, N_{JS}, o promjeru miješala, D/d_T, pri γ_3 koncentraciji zeolita.*



Slika 11. *Ovisnost kritične brzine vrtnje, N_{JS}, o promjeru miješala, D/d_T, pri γ_4 koncentraciji zeolita.*

Tablica 4. *Funkcionalana ovisnost kritične brzine vrtnje miješala o promjeru miješala pri ispitivanim koncentracijama zeolita*.

γ_1	$N_{JS} = -24{,}5 \cdot D/d_T + 264{,}33$
γ_2	$N_{JS} = -25{,}0 \cdot D/d_T + 271{,}33$
γ_3	$N_{JS} = -26{,}5 \cdot D/d_T + 280{,}33$
γ_4	$N_{JS} = -27{,}5 \cdot D/d_T + 286{,}7$



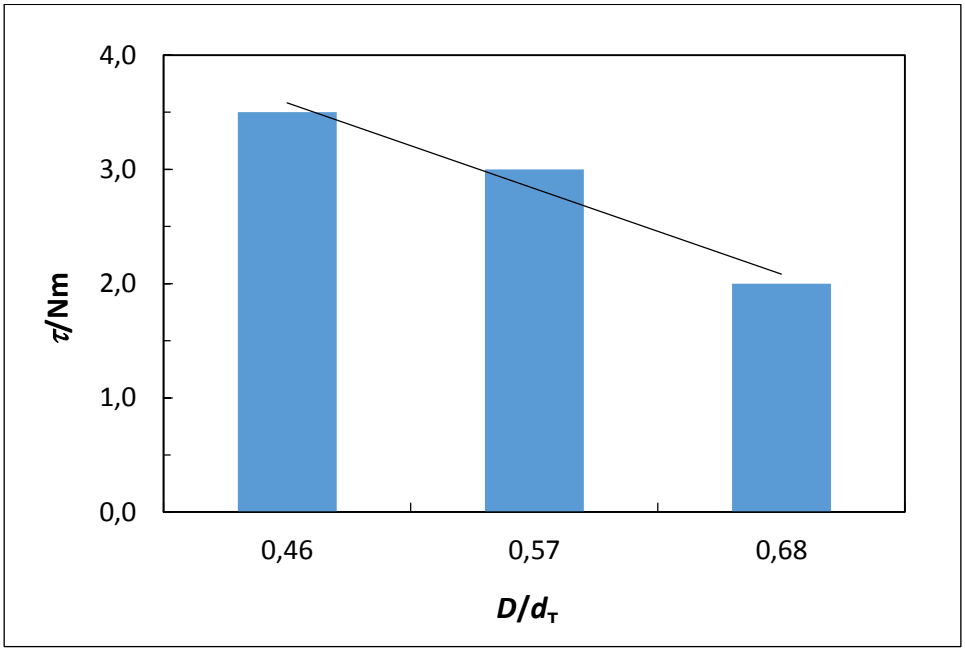
a. $D_1\ d_T = 0{,}46$ ***b)*** $D_2/d_T = 0{,}57$ ***c)*** $D_3/d_T = 0{,}68$

Slika 12. *Simulacija toka kapljevine pri različitim promjerima PBT miješala od dna reaktora*

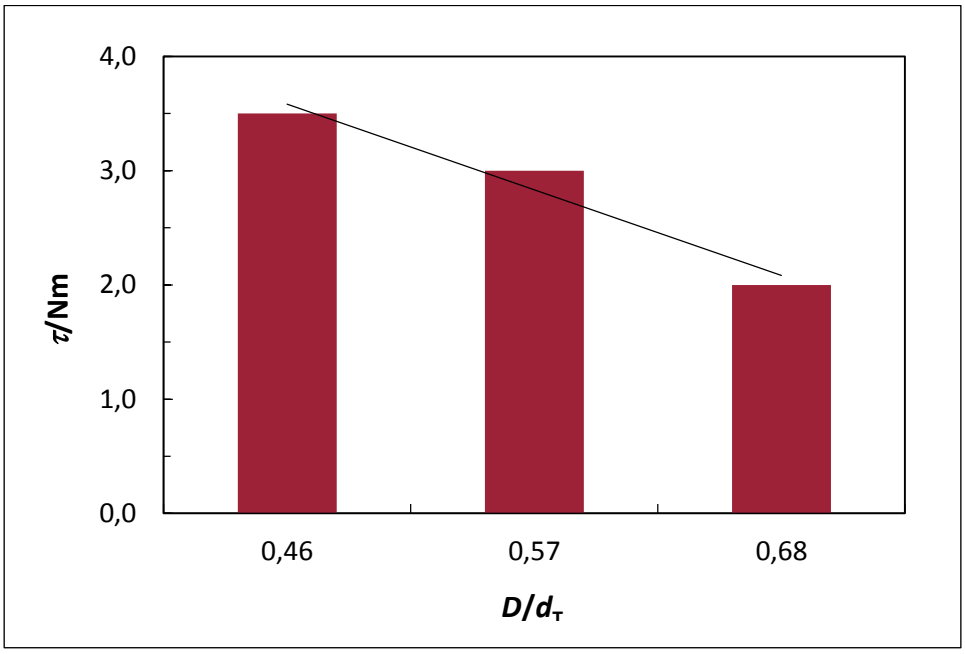
3.2. ODREĐIVANJE ZAKRETNOG MOMENTA MIJEŠALA PRI STANJU POTPUNE SUSPENZIJE ZEOLITA

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.

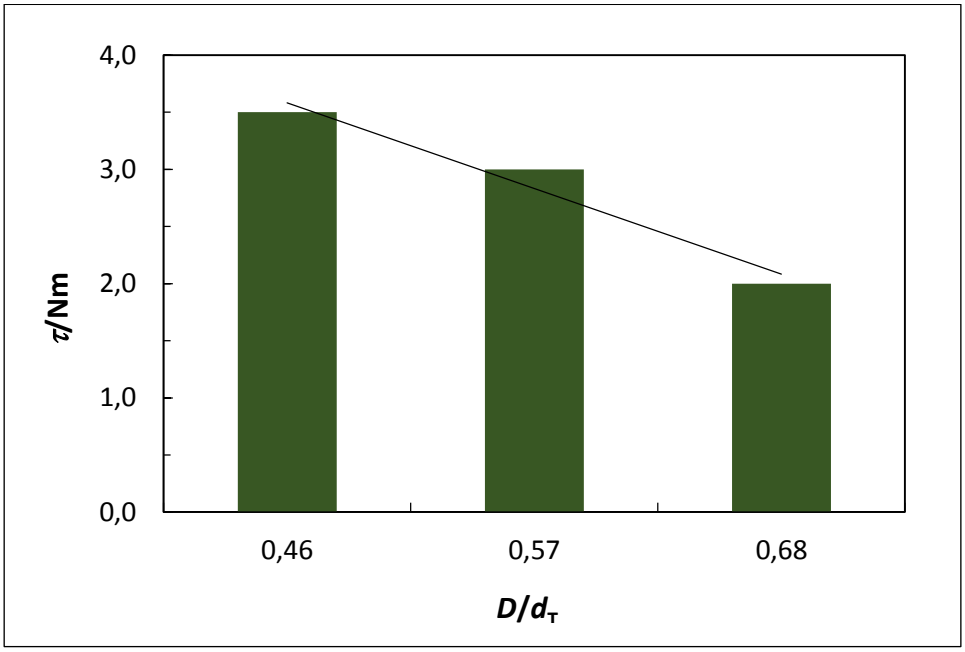
Rezultati ispitivanja prikazani su na *Slikama 13 do 16.*



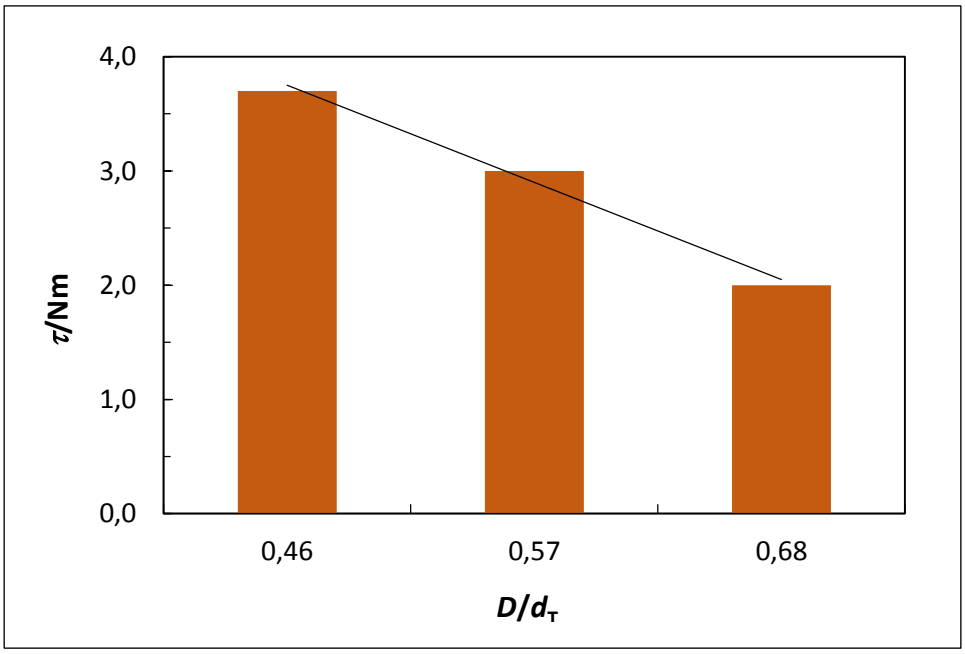
Slika 13. *Ovisnost zakretnog momenta,τ, o promjeru miješala, D/d_T, za koncentraciju, γ_1.*



Slika 14. *Ovisnost zakretnog momenta,τ, o promjeru miješala, D/d_T, za koncentraciju, γ_2.*



Slika 15. *Ovisnost zakretnog momenta,τ, o promjeru miješala, D/d_T, za koncentraciju, γ_3*



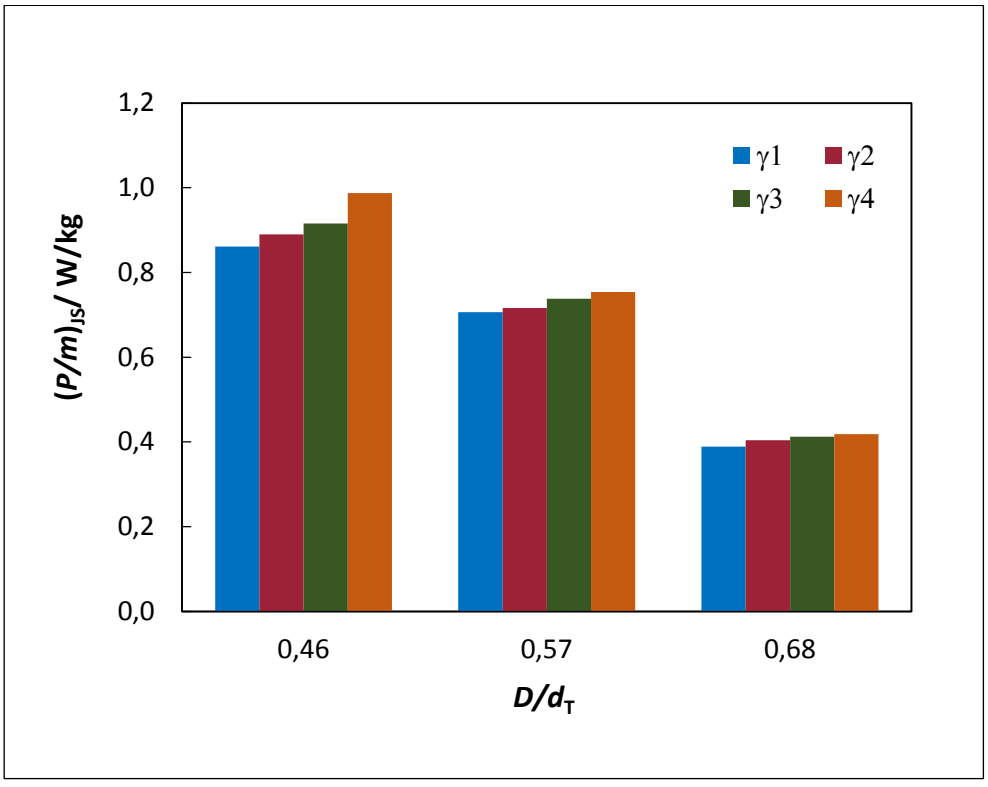
Slika 16. *Ovisnost zakretnog momenta,τ, o promjeru miješala, D/d_T, za koncentraciju, γ_4.*

3.3. 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 (10), 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 17* kao funkcija ovisnosti utroška snage po jediničnom volumenu suspenzije o promjeru ispitivanog miješala.



Slika 17. *Ovisnost snage miješanja o promjeru miješala, $D/d_{T,}$ za ispitivane masene koncentracije zeolita*

4. RASPRAVA

Suspendiranje čvrstih čestica u kapljevitoj fazi jedan je od važnijih postupaka u kemijskoj industriji. Primjenjuje se kada se želi postići ravnomjerna raspodjela čestica u reaktorskom sustavu, ubrzati kemijska reakcija ili nastajanje određenog produkta. Kako bi suspendiranje bilo što učinkovitije treba odabrati pogodne uvjete provedbe operacije miješanja. Tijekom suspendiranja u sustavu su prisutne kapljevita i čvrstih faza, miješanjem se nastoji ostvariti stanje potpune suspenzije pri kojem se sve čestice nalaze se u stanju gibanja. Pri tome cjelokupna površina čestice izložena je prijenosnim pojavama u reaktoru ili kemijskoj reakciji, ukoliko je ista prisutna. Brzina pri kojom se to stanje postiže naziva se minimalna brzina vrtnje miješala potrebna za suspendiranje čestica, ili kritična brzina vrtnje miješala, N_{JS}.

U ovom radu izvršit će se suspendiranje čestica zeolita NaX u otopini bakrovog (II) nitrata koncentracije 7 mmol/dm^3. Ovaj rad predstavlja dio istraživanja kojima je svrha utvrđivanje eksperimentalnih uvjeta pri kojima će se naknadno izvršiti ionska izmjena bakra s ionima natrija iz čestica zeolita, a koja se trebaju provoditi pri stanju potpune suspenzije.

Sva eksperimentalan istraživanja provedena su na aparaturi prikazanoj na *Slici 6.* Reaktor je predstavljao staklenu posudu promjera d_t = 0,14 m s četiri razbijala virova standardnih dimenzija. Omjer visine stupca kapljevine i promjera reaktora, (H/d_T), iznosio je 1,0, a omjer udaljenosti miješala od dna posude i visine stupca kapljevine (C/H) je iznosio 0,33, dok je u cilju analize utjecaja promjera PBT miješala na stanje potpune suspenzije zeolita omjer promjera miješala i promjera reaktora, (D/d_T), mijenjan u području od 0,46 do 0,68. Suspendiranje se za sve veličine PBT miješala provodilo pri četiri masene koncentracije zeolita. Fizikalne karakteristike čestica zeolita i masene koncentracije suspenzije prikazane su u *Tablici 3.* 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 pri zadanim masenim koncentracijama zeolita analiziran je utjecaj promjera PBT miješala na minimalnu brzinu vrtnje miješala potrebnu za postizanje tog stanja, N_{JS}, tzv. kritičnu brzinu vrtnje miješala. Stanje potpune suspenzije određivano je vizualnom Zwieteringovom metodom ″1s″, koji definira stanje potpune suspenzije čestica kao brzinu vrtnje miješala pri kojoj se čestice ne zadržavaju na dnu posude duže od 1 s.

Rezultati ispitivanja za sve masene koncentracije zeolita prikazani su na *Slikama 8-11* kao ovisnost kritične brzine vrtnje o promjeru PBT miješala.

Iz prikazanih rezultata je jasno da se pri svim masenim koncentracijama zeolita kritična brzina vrtnje miješala, N_{JS}, smanjuje s povećanjem promjera miješala. Ovakav rezultat posljedica je strukture toka kapljevine kojeg razvija aksijalno PBT miješalo. Na *Slici 12* prikazana je simulacija toka kapljevine pri ispitivanim promjerima miješala. Iz slike se vidi da je pri sva tri omjera (D/d_T), prisutna istovjetna struktura toka kapljevine karakteristična za ovo miješalo. Naime PBT miješalo odbacuje kapljevinu prema kutu kojeg čine stijenka i dno posude, te potom struji prema površni kapljevine. Navedeni tok označava primarni cirkulacijski tok. Kako ovaj tok nije usmjeren direktno prema dnu posude, tj. u smjeru osovine on, osim aksijalne sadrži i radijalnu komponentu brzina kapljevine. U području ispod miješala, a zbog međudjelovanja primarnog cirkulacijskog toka i okoline, stvara se drugi manji tok. Baker i suradnici[21] su prilikom i istraživanja strukture toka PBT miješala utvrdili da je ova tok suprotnog smjera od primarnog toka tj. da je usmjeren od kuta posude prema miješalu, te su ga nazvali reverznim tokom. Za suspendiranje čestica zeolita odgovoran je onaj dio toka koji se nalazi u blizini dna posude. U tom dijelu brzine kapljevine trebaju biti dovoljno velike da bi česticu podignule s dna i ugradile ju u kontinuiranu fazu. Općenito je poznato da je za suspendiranje čvrstih čestica u miješalici s mehaničkim miješanjem odgovorna veličina primarnog vrtloga ili tzv. makromjerilo turbulencije. Veličina primarnog vrtloga funkcija je pak promjera miješala. Tako se prilikom suspendiranja zeolita PBT miješalom većeg promjera povećava primarni cirkulacijski tok, a sam tim i intenzitet reverznog toka jača, te se sedimentirajuće čestice zeolita dovode u stanje potpune suspenzije već pri manjoj brzini vrtnje miješala.

Nadalje, iz rezultata prikazanih na *Slikama 8* do *11* teško je vizualno procijeniti utjecaj koncentracije zeolita na N_{JS} pri ispitivanim promjerima miješala. U tu svrhu za svaku masenu koncentraciju zeolita ovisnost N_{JS} o omjeru D/d_T procijenjen linearnom funkcijom. Izrazi dobivenih jednadžbi pravca prikazani u *Tablici 4* ukazuju da sa povećanjem masene koncentracije zeolita raste i nagib pravca, a što pak ukazuje na izraženiji porast N_{JS} povećanjem koncentracije zeolita, pri korištenim promjerima miješala. Međutim, trend povećanja kritične brzine vrtnje s povećanjem koncentracije zeolita na stanje potpune suspenzije je puno manje izražen od utjecaja promjera miješala.

Kako su u ovom radu sagledavani i energetski utrošci, pri postignutim stanjima potpune suspenzije, određivan je i zakretni moment miješala, τ.

Na *Slikama 13* do *16* prikazane su eksperimentalne vrijednosti zakretnog momenta pri korištenim masenim koncentracijama zeolita. Iz rezultata je razvidno da se zakretni moment miješala smanjuje s povećanjem promjera miješala pri svim masenim koncentracijama. Istovjetan oblik prikazane ovisnosti τ o omjeru o omjeru D/d_T pri ispitivanim koncentracijama zeolita ukazuje da je utjecaj na zakretni moment zanemariv.

Iz vrijednosti kritične brzine vrtnje miješala i zakretnog momenta pri stanju potpune suspenzije, primjenom izraza (10) izračunat 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 17*.

Iz prikazanih rezultata ispitivanja razvidno je da se utrošak snage miješanja smanjuje s povećanjem promjera miješala za sve korištene koncentracije zeolita. Iz istih slika uočava se također da utrošak snage $(P/m)_{JS}$ se povećava s povećanjem masene koncentracije zeolita, pri svim ispitivanim promjerima PBT miješala. 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 za značajku snage miješanja (3). Naime, iz izraza je jasan odnos utroška snage i promjera miješala ($P \propto D^5$), dok je odnos utroška snage i masene koncentracije zeolita sadržan u odnosu utroška snage i gustoće suspenzije, a koji je značajno manje izražen ($P \propto \rho$).

Sagledavajući utrošak snage pri ispitivani uvjetima miješanja može se reći da bi energetski najisplativija opcija bila provoditi suspendiranje zeolita NaX u otopini bakrovog(II) nitrata primjenom PBT miješala okarakteriziranog omjerom $D/d_T = 0{,}68$, i pri najnižoj ispitivanoj masenoj koncentraciji zeolita. Međutim, budući da su ova ispitivanja dio ispitivanja kojim se utvrđuju optimalni uvjeti miješanja pri provedbi ionska izmjena iona bakra na zeolitu NaX pri stanju potpune suspenzije, tek utvrđivanjem količine izmijenjenih, pri ovdje ispitivanim uvjetima miješanja, 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 aksijalnog PBT miješala na stanje potpune suspenzije zeolita NaX u otopini bakrovog(II) nitrata, mogu se donijeti sljedeći zaključci:

- Pri uporabi PBT miješala povećanjem omjera D/d_T od 0,46 do 0,68 opada minimalna brzina vrtnje potrebna za postizanje stanja potpune suspenzije.
- Ovisnost brzina vrtnje miješala pri stanju potpune suspenzije o promjeru miješala je posljedica je strukture toka suspenzije kojeg razvija PBT miješalo, te veličine primarnog vrtloga koji se povećava s povećanjem omjera D/d_T.
- Pri svi ispitivanim promjerima PBT miješala povećanje masene koncentracije zeolita uzrokuje povećanje vrijednosti N_{JS}.
- Utjecaj promjera PBT miješala na postizanje stanja potpune suspenzije je izraženije od utjecaja masene koncentracije zeolita.
- Utrošak snage miješanja smanjuje se s povećanjem promjera PBT miješala i sa smanjenjem masene koncentracije zeolita. Međutim, promjer miješala ima značajno izraženiji utjecaj na ovu veličinu.
- S obzirom na vrijednosti utroška snage pri ispitivanim promjerima PBT miješala energetski najpovoljnijom se pokazala primjena miješalu s najvećim omjerom ($D/d_T = 0,68$) pri najnižoj primijenjenoj masenoj koncentraciji zeolita. Međutim, optimalni uvjeti provedbe suspendiranja moći će se utvrditi tek sagledavanjem količine izmijenjenih iona pri provedenim uvjetima suspendiranja.

6. LITERATURA

1. *Gordana, Matijašić*: Jedinične operacije u ekoinženjerstvu. Zagreb, 2016, str. 70-102.

2. URL: http://www.dynamixinc.com/mixing-101-the-basic-principles-of-mixing-and-impellers. (20. 10. 2015.)

3. URL:http://www.sharpemixers.com/radial.html. (20. 10. 2015.)

4. *M. Zlokarnik*, Stirring: Theory and Practice, Wiley- Verlag Chemie, Weinheim, 2002, str. 206-211.

5. *A. Kaćunić.* Utjecaj miješanja na kinetiku nukleacije i rasta kristala boraksa u šaržnom kristalizatoru s dvama miješalim, Doktorski rad, Split, Kemijsko - tehnološki fakultet, Studeni 2016.

6. *W. D. Einenkel, A. Mersmann,* Verfahrenstehnik, The Agitator Speed for Particle Suspension, **11**, 1977, str. 90-94.

7. *N. Zwietering,* Suspending of Solid Particles in Liquid by Agitators, Chem. Eng. Sci. **8**, 1958, str. 224-253.

8. *F. A. Holland, F. S. Chapman,* Liquid Mixing and Processing, New York, Reinhold Publishing Company, 1966, str. 1-38.

9. *S. Chandrasekhar,* Investigation on the Synthesis of Zeolite NaX from Kerala Kaolin, P.N. Pramada. 4, Journal of Porous Materials **6**, 1999, str. 283-297.

10. *C. Colella* Mineral, Deposita **31**, 1996, str. 554.

11. *H. S. Sherry* The Ion Exchange Properties of Zeolites, Marcel Dekke, 1969, str. 89-133.

12. *S.M. Kresta, R. S. Brodkey,* Turbulence in Mixing Applications, u: Handbook of Industrial Mixing, E. L. Paul, V.A. Atiemo-Obeng, S.M. Kresta, 2003, str. 19-83.

13. *W. L. Mcabe, J. C. Smith, P. Harriott,* Unit Operations of Chemical Engineering, McGraw-Hill, 2001, str. 902-941.

14. *G. E. H. Joosten, J. G. M. Schilder and A. M. Broere,* The Suspension of Floating Solids in Stirred Vessels, Trans. Inst. Chem. Eng. **55**, 1977, str. 220-222.

15. *E. L. Paul, V. A. Atiemo-Obeng, S. M. Kresta,* Handbook of Industrial Mixing - Science and Practice , John Wiley and Sons Inc., Hoboken, New Jersey 2004, str. 1057-1069.

16. *J. J. Ulbrecht, G. K. Patterson*, Mixing of Liquids by Agitation. New York, Gordan and Breach Science Publishers, 1985, str. 1-59.

17. *Ulman*, F. Ulmann´s Chemical Engineering and Plant Dwsign, John Wiley and Sons, 2005, str. 17-420.

18. *M. Hraste*, Mehaničko procesno inženjerstvo, Hinus, Zagreb 2003, str. 120-134.

19. *G.B Tatterson*, Scaleup and Design of Industrial Mixing Processes, New York inc., 1994, str. 1-53.

20. *J. R. Bourne, R. N. Sharma*, Homogenous Particle Suspension in Propeller-agitated Flat Bottomed Tanks, Chem. Eng.**1**, 1974, str. 243.

21. *A. Bakker, K.J. Myer, R.W. Ward, C. K. Lee*, The Laminar and Turbulent Flow Pattern of a Pitched Blade Turbine, Trans.IChemE, 1996, str.486-491.

7. SIMBOLI

C – udaljenost miješala od dna posude za miješanje (m)

D – promjer miješala, (m)

d_p – promjer suspendiranih čestica

d_T – promjer reaktora, (m)

Fr – Froudova značajka

g – gravitacijsko ubrzanje (m/s^2)

H – visina stupca kapljevine u posudi za miješanje (m)

K – konstanta ovisna o geometrijskim karakteristikama reaktorskog sustava

m – masa uzorka (g)

N – brzina vrtnje miješala (o./min)

N_p – značajka snage

N_{JS} – brzina vrtnje miješala pri stanju potpune suspenzije, (o./min)

P – snaga miješala, (W)

Re – Reynoldsova značajka

R_v – širina razbijala virova, (m)

v – obodna brzina

V – volumen kapljevine u posudi za miješanje (m^3)

w – širina lopatica miješala (m)

α – kut između razbijala i dna posude za miješanje (°)

β – nagib lopatica miješala (°)

γ – koncentracija suspendiranih čestica (kg/m^3)

μ_L – dinamička viskoznost kapljevine (Pas)

ρ_P – gustoća čestica (kg/m^3)

τ – zakretni moment (Nm)

Φ – funkcija snage