Utjecaj tipa miješala na karakteristike raspršenja plina u kapljevini

Čović-Stanić, Ante

Master's thesis / Diplomski rad

2021

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

Permanent link / Trajna poveznica: https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:167:059434

Rights / Prava: In copyright / Zaštićeno autorskim pravom.

Download date / Datum preuzimanja: **2024-03-28**

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 TIPA MIJEŠALA NA KARAKTERISTIKE RASPRŠENJA PLINA U KAPLJEVINI

DIPLOMSKI RAD

ANTE ČOVIĆ – STANIĆ
Matični broj: 273

Split, ožujak 2021.

SVEUČILIŠTE U SPLITU
KEMIJSKO – TEHNOLOŠKI FAKULTET
DIPLOMSKI STUDIJ KEMIJSKE TEHNOLOGIJE
SMJER: ZAŠTITA OKOLIŠA

UTJECAJ TIPA MIJEŠALA NA KARAKTERISTIKE RASPRŠENJA PLINA U KAPLJEVINI

DIPLOMSKI RAD

ANTE ČOVIĆ – STANIĆ
Matični broj: 273

Split, ožujak 2021.

UNIVERSITY OF SPLIT

FACULTY OF CHEMISTRY AND TECHNOLOGY

GRADUATE STUDY OF CHEMICAL TECHNOLOGY

ORIENTATION: ENVIRONMENTAL PROTECTION

INFLUENCE OF IMPELLER TYPE ON CHARACTERISTICS OF GAS DISPERSION IN LIQUID

DIPLOMA THESIS

ANTE ČOVIĆ-STANIĆ

Parent number: 273

Split, March 2021

TEMELJNA DOKUMENTACIJSKA KARTICA

DIPLOMSKI RAD

Sveučilište u Splitu
Kemijsko-tehnološki fakultet u Splitu
Diplomski studij kemijskog inženjerstva, smjer: Zaštita okoliša

Znanstveno područje: Tehničke znanosti
Znanstveno polje: Kemijsko inženjerstvo
Tema rada je prihvaćena na 28. sjednici Fakultetskog vijeća Kemijsko-tehnološkog fakulteta od 25. rujna 2019.
Mentor dr. sc. Antonija Čelan, znanstvena suradnica
Pomoć pri izradi: prof. dr. sc. Nenad Kuzmanić

UTJECAJ TIPA MIJEŠALA NA KARAKTERISTIKE RASPRŠENJA PLINA U KAPLJEVINI

Ante Čović-Stanić, 273

Sažetak: Disperzija ili raspršenje plina u kapljevini se primjenjuje u nizu industrijskih procesa u kojima je potrebno ostvariti prijenos tvari između tih dviju faza, a često se provodi u miješalicama s mehaničkim miješanjem. Upravo o geometrijskim karakteristikama miješalice, prije svega o tipu miješala, ovisit će hidrodinamički uvjeti u sustavu, a koji se direktno odražavaju na intenzitet prijenosa tvari iz plinovite u kapljevitu fazu (ili obrnuto). Glavni zadatak ovog rada bio je ispitati utjecaj tipa miješala na karakteristike procesa raspršenja plina u kapljevini. Ispitivanje se provodilo u posudi za raspršenje plina volumena 10,85 dm^3. Korištena su dva turbinska miješala, miješalo s diskom i ravnim lopaticama te miješalo s diskom i konkavnim lopaticama. U prvom dijelu eksperimentalnog rada određene su brzine vrtnje miješala pri kojima se postiže režim potapanja miješala, režim opterećenja sustava te režim potpunog raspršenja plina u kapljevini. Na temelju dobivenih vrijednosti tih brzina određene su eksperimentalne vrijednosti Froudeove i aeracijske značajke. Iste su uspoređene s teorijskim vrijednostima. U drugom dijelu rada određen je relativni utrošak snage miješanja za različite brzine vrtnje miješala koji predstavlja jedan od najbitnijih parametara u procjeni ekonomske isplativosti procesa. Naposljetku je na temelju mjerenja koncentracije otopljenog kisika u vodi određen volumni koeficijent brzine prijenosa kisika, $k_L a$, a potom i brzina prolaza kisika iz zraka u vodu. Usporedbom dvaju korištenih tipova miješala utvrđeno je da se veće vrijednosti brzine prijenosa kisika postižu korištenjem miješala s diskom i ravnim lopaticama, no uz nešto veći utrošak snage. S obzirom na navedeno, isto se može smatrati prikladnijom opcijom u koliko je primaran cilj operacije ostvarenje većih brzina prolaza kisika u sustavu.

Ključne riječi: režim raspršenja plina, miješanje, međufazni prijenos kisika, volumni koeficijent brzine prijenosa kisika kLa.

Rad sadrži: 58 stranica, 29 slika, 6 tablica, 17 literaturnih referenci

Jezik izvornika: hrvatski

Sastav povjerenstva za obranu:

1. Prof. dr. sc. Nenad Kuzmanić — predsjednik
2. Doc. dr. sc. Ivona Nuić — član
3. Dr. sc. Antonija Čelan, zn. suradnica — član, mentor

Datum obrane: 31. ožujka 2021.

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

BASIC DOCUMENTATION CARD

DIPLOMA THESIS

University of Split
Faculty of Chemistry and Technology Split
Study Chemical engineering, Orientation: Environmental Protection

Scientific area:	Technical sciences
Scientific field:	Chemical engineering
Thesis subject	was approved by Faculty Council of Faculty of Chemistry and Technology, session No. 28 on September 25th 2019
Mentor	Research Associate Antonija Čelan, PhD
Technical assistance:	Full Professor Nenad Kuzmanić, PhD

INFLUENCE OF IMPELLER TYPE ON CHARACTERISTICS OF GAS DISPERSION IN LIQUID

Ante Čović-Stanić, 273

Summary: Gas dispersion in liquid is applied in a range of industrial processes in which mass transfer between these two phases is required. It is often carried out in mechanically agitated vessels. It is the geometrical characteristics of the vessel, primarily the type of mixer, that will determine the hydrodynamic conditions in the system, which directly affect the intensity of the mass transfer from the gaseous to the liquid phase (or vice versa). The main task of this research was to examine the influence of impeller types on the characteristics of gas dispersion in liquid. Experiments were conducted in a mixing vessel of 10,85 dm^3 volume. Two types of impellers were used: a concave-blade turbine with disk and a flat-blade turbine with disk. Firstly, agitator speeds at which different flow regimes are achieved were determined. The Froude and the aeration numbers at those flow regimes were calculated. Experimental aeration numbers were compared with theoretical values. Secondly, the relative power demand for different agitator speed was determined. This parameter is one of the most important parameters for assessing the economic viability of the process. Finally, based on the measurement of the concentration of dissolved oxygen in liquid, volumetric oxygen transfer coefficient, k_La, and the oxygen transfer rate from air into water were determined. By comparing the two types of impellers used, it was found that higher values of oxygen transfer rate are achieved by using the flat-blade turbine with disk, but with a higher power demand. Considering the stated, this impeller can be considered a more appropriate option if the primary goal of the operation is to achieve higher oxygen flow rates in the system.

Keywords: vessel flow regime, mixing, interfacial oxygen transfer, volumetric oxygen transfer coefficient k_La.

Thesis contains: 58 pages, 29 figures, 6 tables, 17 references

Original in: Croatian

Defence committee:

1.	Full Professor Nenad Kuzmanić, PhD	chair person
2.	Assistant professor Ivona Nuić, PhD	member
3.	Research Associate Antonija Čelan, PhD	member, supervisor

Defence date: March 31st 2021

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

Diplomski rad izrađen je na Zavodu za kemijsko inženjerstvo Kemijsko-tehnološkog fakulteta u Splitu pod mentorstvom dr. sc. Antonije Čelan, znanstvene suradnice, u razdoblju od veljače 2020. do ožujka 2021.

ZAHVALA

„Ljubav je velikodušna, dobrostiva je ljubav, ne zavidi, ljubav se ne hvasta, ne nadima se, nije nepristojna, ne traži svoje, nije razdražljiva, ne pamti zlo; ne raduje se nepravdi, a raduje se istini; sve pokriva, sve vjeruje, svemu se nada sve podnosi. Ljubav nikad ne prestaje.“ 1. Kor 13,1-8

Htio bih reći jedno veliko HVALA svima koji su me naučili što je to ljubav:

Prijateljima, kolegama, poznanicima koji su mi pokazali što znači ljubiti i biti dobar i kada nisam bio dobar prijatelj,

Neprijateljima i bivšim prijateljima, koji su me naučili da je najbolji način za „uništenje“ neprijatelja, postati im prijatelj,

Prolaznicima i ljudima koji su bili samo usputna stanica mog života, što su me naučili da jedan osmijeh, jedna lijepa riječ može i gvozdena vrata otvoriti,

Profesorima i asistentima, tehničarima i laborantima, što su mi pokazali da ništa nije teško dok god vjeruješ u to, što su me trpjeli i kada nisam bio dobar student,

Mentorici, dr. sc. Antoniji Čelan, koja mi je pokazala što znači bezuvjetno odlučiti biti dobar mentor i pomoći, čak i onda kad nisam bio baš dobar diplomant; prof. dr. sc. Nenadu Kuzmaniću koji je bio na raspolaganju uvijek kada je bilo potrebno i kada bi zagustilo, a i tehničaru Juri Škrapiću koji je uvijek bio tu, desna ruka vrijedna hvale,

Obitelji, roditeljima, sestri, braći, nećacima, nevjestama bez kojih danas ne bih bio ono što jesam, jer su bili moje utočište koliko god „lude“ stvari radio, bili su uvijek tu,

I na posljetku dragom Bogu, koji je uvijek tu, koji mi pokazuje da nisam ostavljen ni kada je najgore, da nisam zaboravljen ni kada svi odu i da će biti tu i kada ne zaslužujem.

Još jednom „Hvala Vam, svima“

Ante Čović-Stanić

ZADATAK

1. Primjenom dvaju tipa turbinskih miješala, vizualno odrediti režime potapanja miješala, opterećenje sustava te režim potpunog raspršenja plina u kapljevini pri konstantnom protok zraka (Q_g = 200 dm^3 h^{-1}), promjenom brzine vrtnje miješala. Za navedene režime odrediti eksperimentalne vrijednosti Froudeovu značajku (Fr) i značajke aeracije (N_A) te ih usporediti s teorijskim vrijednostima.

2. Za zadani protok zraka (Q_g = 200 dm^3 h^{-1}), pri različitim brzinama vrtnje, odrediti relativni utrošak snage (P_g/P_o) obaju tipova turbinskih miješala te ga prikazati kao funkciju aeracijske značajke, N_A.

3. Pri režimu potpunog raspršenja plina u kapljevini, odrediti promjenu koncentracije otopljenog kisika u vodi do postizanja koncentracije zasićenja (c_S) te ju grafički prikazati u ovisnost o vremenu aeracije za oba primijenjena tipa miješala.

4. Na temelju dobivenih rezultata, izvršiti usporedbu dvaju korištenih tipova turbinskih miješala.

.

SAŽETAK

Disperzija ili raspršenje plina u kapljevini se primjenjuje u nizu industrijskih procesa u kojima je potrebno ostvariti prijenos tvari između tih dviju faza, a često se provodi u miješalicama s mehaničkim miješanjem. Upravo o geometrijskim karakteristikama miješalice, prije svega o tipu miješala, ovisit će hidrodinamički uvjeti u sustavu, a koji se direktno odražavaju na intenzitet prijenosa tvari iz plinovite u kapljevitu fazu (ili obrnuto).

Glavni zadatak ovog rada bio je ispitati utjecaj tipa miješala na karakteristike procesa raspršenja plina u kapljevini. Ispitivanje se provodilo u posudi za raspršenje plina volumena 10,85 dm3. Korištena su dva turbinska miješala, miješalo s diskom i ravnim lopaticama te miješalo s diskom i konkavnim lopaticama. U prvom dijelu eksperimentalnog rada određene su brzine vrtnje miješala pri kojima se postiže režim potapanja miješala, režim opterećenja sustava te režim potpunog raspršenja plina u kapljevini. Na temelju dobivenih vrijednosti tih brzina određene su eksperimentalne vrijednosti Froudeove i aeracijske značajke. Iste su uspoređene s teorijskim vrijednostima. U drugom dijelu rada određen je relativni utrošak snage miješanja za različite brzine vrtnje miješala koji predstavlja jedan od najbitnijih parametara u procjeni ekonomske isplativosti procesa. Naposljetku je na temelju mjerenja koncentracije otopljenog kisika u vodi određen volumni koeficijent brzine prijenosa kisika, $k_L a$, a potom i brzina prolaza kisika iz zraka u vodu.

Usporedbom dvaju korištenih tipova miješala utvrđeno je da se veće vrijednosti brzine prijenosa kisika postižu korištenjem miješala s diskom i ravnim lopaticama, no uz nešto veći utrošak snage. S obzirom na navedeno, isto se može smatrati prikladnijom opcijom u koliko je primaran cilj operacije ostvarenje većih brzina prolaza kisika u sustavu.

Ključne riječi: režim raspršenja plina, miješanje, međufazni prijenos kisika, volumni koeficijent brzine prijenosa kisika $k_L a$.

SUMMARY

Gas dispersion in liquid is applied in a range of industrial processes in which mass transfer between these two phases is required. It is often carried out in mechanically agitated vessels. It is the geometrical characteristics of the vessel, primarily the type of mixer, that will determine the hydrodynamic conditions in the system, which directly affect the intensity of the mass transfer from the gaseous to the liquid phase (or vice versa). The main task of this research was to examine the influence of impeller types on the characteristics of gas dispersion in liquid.

Experiments were conducted in a mixing vessel of 10,85 dm3 volume. Two types of impellers were used: a concave-blade turbine with disk and a flat-blade turbine with disk. Firstly, agitator speeds at which different flow regimes are achieved were determined. The Froude and the aeration numbers at those flow regimes were calculated. Experimental aeration numbers were compared with theoretical values. Secondly, the relative power demand for different agitator speed was determined. This parameter is one of the most important parameters for assessing the economic viability of the process. Finally, based on the measurement of the concentration of dissolved oxygen in liquid, volumetric oxygen transfer coefficient, $k_L a$, and the oxygen transfer rate from air into water were determined.

By comparing the two types of impellers used, it was found that higher values of oxygen transfer rate are achieved by using the flat-blade turbine with disk, but with a higher power demand. Considering the stated, this impeller can be considered a more appropriate option if the primary goal of the operation is to achieve higher oxygen flow rates in the system.

Keywords: vessel flow regime, mixing, interfacial oxygen transfer, volumetric oxygen transfer coefficient $k_L a$.

Sadržaj

UVOD 1
1. OPĆI DIO 3
1.1. Miješanje u procesnom inženjerstvu 4
1.1.1. Opće značajke miješanja kapljevina 5
1.1.2. Utrošak snage miješanja 8
1.2. Miješanje u sustavima plin/kapljevina 11
1.2.1. Međufazni prijenos tvari (prolaz tvari) 20
2. EKSPERIMENTALNI DIO 24
2.1. Metodika 25
2.1.1. Opis aparature za provedbu eksperimenta 25
2.1.2. Provedba eksperimenta 31
2.1.2.1. Vizualno određivanje režima raspršenja plina u kapljevini 31
2.1.2.2. Određivanje relativnog utroška snage miješanja za različite režime 32
2.1.2.3. Određivanje brzine prolaza kisika iz zraka u vodu 33
3. REZULTATI 34
3.1. Vizualno određivanje režima raspršenja plina u kapljevini 35
3.2. Određivanje relativnog utroška snage miješanja za različite režime raspršenja 37
3.3. Određivanje brzine prolaza kisika iz zraka u vodu 39
4. RASPRAVA 48
5. ZAKLJUČAK 54
6. LITERATURA 56

UVOD

Disperzija ili raspršenje plina u kapljevini predstavlja miješanje dvofaznog sustava pri čemu se plinovita faza fino raspršuje u drugoj, kapljevitoj fazi. U kemijskoj industriji, operacija raspršenja je znatno zastupljena, primjerice kod halogeniranja, hidriranja ili pak obrade otpadnih voda, gdje se sustav mora aerirati. Kako bi raspršenje bilo što učinkovitije potrebno je osigurati što veću međufaznu površinu i produljiti vrijeme kontakta dviju faza, a to je moguće postići miješanjem.

Miješanje je jedna od najčešće primjenjivanih operacija, kako u svakodnevnom životu tako i u industrijskim procesima. Ono predstavlja tehnološku operaciju uzgibavanja materijala, najčešće mehaničkim miješalom, u cilju njegove homogenizacije u koncentracijskom ili termičkom smislu. Miješanjem se intenzivira prijenos tvari i energije te ubrzava kemijska reakcija ukoliko je ista prisutna u sustavu.[1]

U praksi, najčešće korišteni uređaji za miješanje sustava plin/kapljevina su jednostavne kolone s mjehurićima, kolone s pliticama, uređaji za površinsku aeraciju te mehaničke miješalice, koji se koriste uglavnom za niskoviskozne kapljevine. Izbor uređaja će ovisiti o specifičnosti zahtjeva koji se traže pri pojedinim operacijama. Međutim, u svim slučajevima je potrebno obratiti pozornost na ključne parametre koji određuju miješanje, kao što su: hidrodinamika u sustavu, utrošak snage miješanja, volumni udio plinske faze u sustavu te brzina prijenosa kisika.[2]

U ovom radu bilo je potrebno ispitati kako miješanje, odnosno tip miješala utječe na raspršenje kisika iz zraka u vodu, odnosno na brzinu prolaza kisika. Upravo se primjenom miješanja taj proces intenzivira. S obzirom na to da su plinsko-kapljevinski reaktori opremljeni miješalicama te da često rade s velikim utroškom snage i velikim zadržavanjem plina[3], prilikom projektiranja procesa je iste potrebno i odrediti. U radu su korištena dva tipa miješala, turbinsko miješalo s diskom i ravnim lopaticama, poznatije kao Rushtonovo miješalo te turbinsko miješalo s diskom i konkavnim lopaticama. Navedena miješala se danas najčešće koriste zbog čega su i uzeta kao predmet ispitivanja.

Cilj ovog rada je ispitati utjecaj tipa miješala na sustav raspršenja plina unutar kapljevine te na snagu miješanja koju je pri tom stanju potrebno uložiti. Ova ispitivanja predstavljaju dio istraživanja kojima se nastoji odrediti optimalne uvjeti miješanja za provedbu procesa raspršenja plina u kapljevini.

1. OPĆI DIO

1.1. Miješanje u procesnom inženjerstvu

Miješanje je jedna od najčešće korištenih operacija u kemijskoj industriji kojom se postiže ujednačenost u mehaničkom, kemijskom i/ili termičkom smislu. Ovu je operaciju moguće provoditi u jednofaznim i višefaznim sustavima.

Kada je riječ o miješanju u jednofaznim sustavima, tada operacija miješanja podrazumijeva ili homogenizaciju mješljivih fluida ili miješanje prašaka, tj. suhih nasipina. Miješanje u višefaznim sustavima obuhvaća miješanje nemješljivih kapljevina, miješanje u sustavima čvrsto/kapljevito (suspendiranje) ili miješanje pri raspršivanju (disperzija) plina u kapljevini.

Tipičan primjer miješanja u jednofaznom sustavu je homogenizacija mješljivih kapljevina. Relativno se jednostavno i brzo postiže osim u slučajevima veće razlike u viskoznosti i gustoći tretiranih kapljevina, kada postaje složenija.

Specifičan primjer miješanja jednofaznih sustava u kemijskoj industriji je miješanje prašaka, suhih nasipina, koje se provodi bez prisustva fluida. Navedeni primjeri najčešće se provode u šaržnim postrojenjima, a u novije vrijeme sve češća je uporaba kontinuiranih postrojenja.

Ako je riječ o miješanju višefaznih sustava, tada operacija miješanja ima za cilj uspostavljanje uvjeta pogodnih za prijenos tvari i energije te što učinkovitije provođenje kemijske reakcije, ukoliko je ista prisutna u sustavu.[4,5,6]

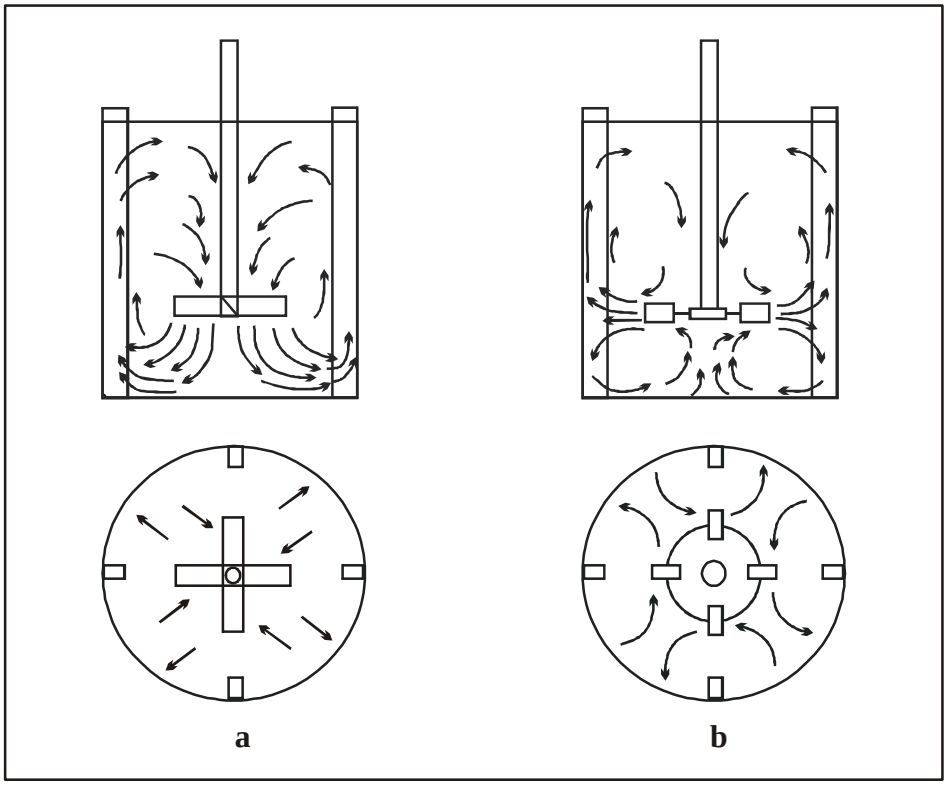
1.1.1. **Opće značajke miješanja kapljevina**

Razumijevanje toka mase kapljevine koja se miješa, osnova je za izbor i dimenzioniranje opreme za miješanje. Različiti oblici gibanja mase čine mehanizam miješanja koji se prikazuje kao laminaran i turbulentan režim strujanja. Hidrodinamičke karakteristike navedenih režima izrazito se razlikuju. Potrebno je također voditi računa i o tzv. prijelaznom području, gdje se uviđaju utjecaji i laminarnog i turbulentnog strujanja.[4]

Laminaran (slojeviti) režim strujanja se javlja pri nižim brzinama vrtnje miješala. U njemu se molekule kreću u pravilnim paralelnim slojevima koji se međusobno ne miješaju, a sile inercije brzo nestaju. Kako bi se u takvom sustavu uspostavila homogenost, miješalo mora zauzeti što veći dio posude gdje će, s obzirom na povećanu kontaktnu površinu miješalo-fluid, doći do smanjenja gradijenta koncentracije uslijed molekulske difuzije. Strujanje iz laminarnog prelazi u turbulentno kada iznos Reynoldsove značajke, koja je izražena kao omjer inercije i sile trenja, prijeđe kritičnu vrijednost. U miješalicama s miješalom ukupni tok kapljevine, kojeg generira miješalo, je u većini slučajeva turbulentan (uz pretpostavku da je viskoznost kapljevine koja se miješa manja od 10 mPa s). U takvim sustavima se slojevitost koja je prisutna kod laminarnog režima gubi, a gibanje fluida postaje kaotično zbog čega su prijenos topline i količina gibanja poboljšani. U tim uvjetima, definitivno, prevladava utjecaj sile inercije.[4]

Da bi operacija miješanja bila uspješna, mora se voditi računa o nekoliko čimbenika. Posuda u kojoj se provodi miješanje mora imati takav oblik da osigurava učinkovito strujanje mase bez prisustva područja u kojima je strujanje i efekt miješanja znatno smanjen. Nadalje, pri intenzivnijem miješanju često dolazi do nastanka virova i smanjenja učinkovitosti operacije miješanja. Da bi se ta pojava spriječila, ugrađuju se tzv. razbijala virova, čije su uobičajene dimenzije $b = (0{,}1 - 0{,}12)\ d_T$, gdje je d_T promjer posude za miješanje. Izvedba dijela razbijala uz dno posude treba biti takva da ne uzrokuje stvaranje tzv. mrtvih zona.[4]

Miješala koja se koriste za provedbu miješanja najčešće se svrstavaju u geometrijski slične kategorije i to s obzirom na tip ukupnog cirkulacijskog toka kapljevine kojeg razvijaju u miješalici. Razlikuju se dva osnovna tipa toka kapljevine – radijalan i aksijalan (*slika 1*).



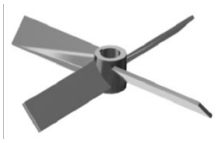
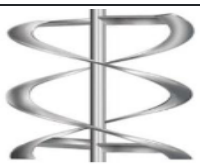
Slika 1. a. Aksijalan i b. radijalan tok kapljevine u posudi za miješanje.

Aksijalan tok (*slika 1a*) kapljevine paralelan je s osovinom – dio kapljevine struji niz osovinu, dok uzlazni struji uz stijenku posude. Miješala koja generiraju ovakav tip toka se uglavnom koriste u sustavima u kojima je potrebno ostvariti intenzivnu cirkulaciju kapljevine i/ili suspendirati čestice u kapljevini.[4]

Kod radijalnih miješala je tok kapljevine (*slika 1b*) usmjeren prema stijenci posude gdje se razdvaja na dvije struje – jedna koja struji prema površini i druga koja struji prema dnu posude, odakle ponovo dospijevaju u os vrtnje. U toku kapljevine kojeg generira radijalno miješalo, vrlo su izražene smične sile te se ovaj tip miješala često koristi za miješanje nemješljivih kapljevina.

Navedenim gibanjima mase kapljevine odvija se makroskopsko miješanje. Istovremeno, u masi fluida, odvija se miješanje na mikroskopskoj razini uzrokovano nastalom turbulencijom od strane miješala i razbijala virova. Makroskopsko miješanje značajno je za postizanje homogenosti smjese, a mikroskopsko utječe na prijenosne pojave kontrolirane unutarnjim trenjem kapljevine.[4]

Izbor tipa miješala ovisi isključivo o vrsti traženog miješanja, veličini posude i viskoznosti kapljevine. Na osnovu toka, tipovi miješala su svrstani u homologne, geometrijski slične serije (*slika 2*).

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
Propelersko miješalo		Aksijalan tok kapljevine
Turbinsko miješalo s lopaticama pod nagibom		Radijalno-aksijalan tok kapljevine
Spiralno miješalo		Aksijalan tok kapljevine s izraženom tangencijalnom komponentom strujanja

Slika 2. Osnovni tipovi miješala.

1.1.2. **Utrošak snage miješanja**

Jedan od osnovnih energetskih pokazatelja uspješnosti provođenja operacije miješanja, vrlo bitan pri konstrukciji i izboru uređaja za miješanje, jest utrošak snage miješanja. Utvrđeno je da navedeni utrošak snage ovisi o: brzina vrtnje miješala (N), promjeru miješala (D), gustoći kapljevine (ρ_L), viskoznosti (μ_L) i ubrzanju sile teže (g). Stoga se snaga miješanja može prikazati kao funkcija navedenih parametara:[7]

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

ili korelacijskom jednadžbom:

$$P = K \cdot N^a \cdot D^b \cdot \rho_L^c \cdot \mu_L^d \cdot g^e \tag{2}$$

gdje je:

K – konstanta ovisna o geometrijskim karakteristikama reaktorskog sustava [-],

a,b,c,d,e – eksponenti korelacijske jednadžbe [-],

N – brzina vrtnje miješala [okr. s^{-1}],

D – promjer miješala [m],

ρ_L – gustoća fluida [kg m^{-3}],

μ_L – dinamička viskoznost [Pa s].

Ukoliko se zadane varijable zamjene odgovarajućim dimenzijama *MTL* sustava primjenom Ryaleighove metode dobije se:

$$\frac{ML^2}{T^3} = \left[\frac{1}{T}\right]^a \cdot \left[\frac{L}{1}\right]^b \cdot \left[\frac{M}{L^3}\right]^c \cdot \left[\frac{M}{LT}\right]^d \cdot \left[\frac{L}{T^2}\right]^e \tag{3}$$

Po principu dimenzijske homogenosti eksponenata, eksponenti pojedinih osnovnih dimenzija u izrazu (3), moraju biti isti s lijeve i desne strane:

M: $\quad 1 = c + d \quad \rightarrow \quad c = 1 - d$

L: $\quad 2 = b - 3c - d + e \quad \rightarrow \quad b = 5 - 2d - e$ gdje je $c = 1 - d$

T: $\quad -3 = -a - d - 2e \quad \rightarrow \quad a = 3 - d - 2e$

Kada se snaga P u izrazu (2) prikaže pomoću dobivenih eksponenata, izraz će poprimiti sljedeći oblik:

$$P = K \cdot N^{3d-2e} \cdot D^{5-2d-e} \cdot \rho_L^{1-d} \cdot \mu_L^d \cdot g^e \tag{4}$$

$$P = K \cdot N^3 \cdot D^5 \cdot \rho_L \cdot \left[\frac{\mu_L}{\rho_L \cdot N \cdot D^2}\right]^d \cdot \left[\frac{g}{N^2 \cdot D}\right]^e \tag{5}$$

Sređivanjem izraza (5) dobije se:

$$\frac{P}{N^3 \cdot D^5 \cdot \rho_L} = K \cdot \left[\frac{\rho_L \cdot N \cdot D^2}{\mu_L}\right]^{-d} \cdot \left[\frac{N^2 \cdot D}{g}\right]^{-e} \tag{6}$$

Zamjenom ($-d = m$) i ($-e = n$), izraz (6) poprima oblik:

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

gdje je:

N_P – značajka snage miješanja [-],

Re_m – modificirana Reynoldsova značajka [-],

Fr – modificirana Froudeova značajka [-].

Međusobna ovisnost bezdimenzijskih značajki može se prikazati i na sljedeći način:

$$\Phi = \frac{N_p}{Fr^n} = K \cdot {Re_m}^m \tag{8}$$

gdje je:

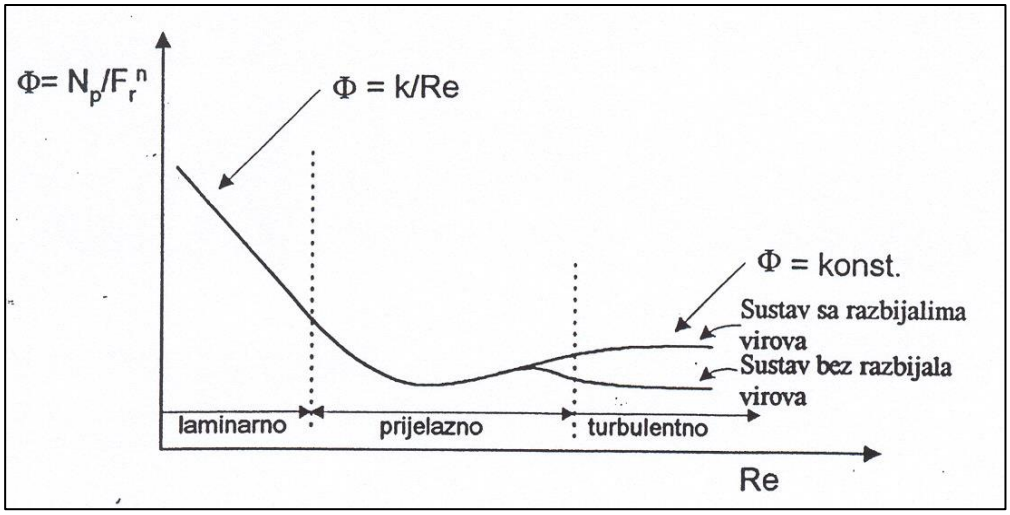
ϕ – značajka funkcije snage [-].

Za sustave, gdje ne dolazi do stvaranja vrtloga unutar mase koja se miješa, radi prisustva razbijala virova, gravitacijska sila zanemarivo utječe na sustav, pa je eksponent modificirane Froudeove značajke jednak nuli, a $Fr^n = 1$ i jednadžba (8) poprima oblik:

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

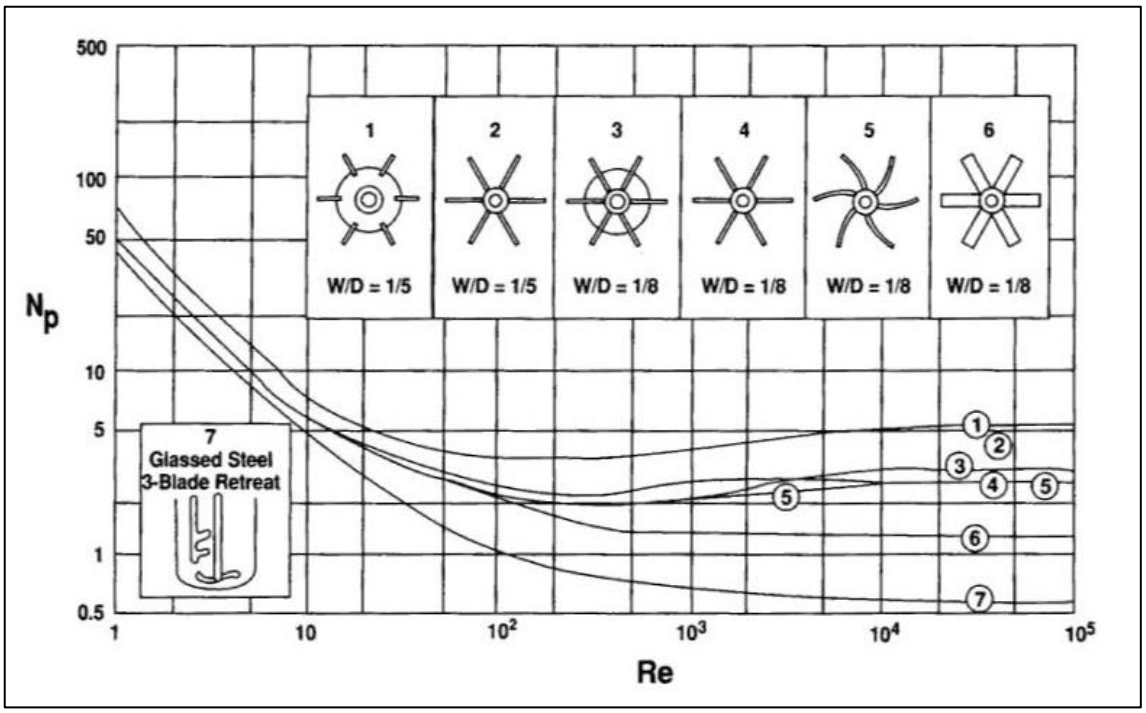
Grafički prikaz izraza (8) predstavlja tzv. „krivulju snage“ (*slika 3*). Svakoj geometrijskoj konfiguraciji i svakom tipu i obliku miješala pripada odgovarajuća krivulja.

Ukoliko se u literaturi ne može pronaći krivulja koja odgovara korištenoj geometrijskoj konfiguraciji tada treba provesti eksperimentalna mjerenja i „snimiti“ krivulju za tu geometriju.[4]



Slika 3. Tipičan izgled "krivulje snage.

Na *slici 4*[8] prikazani su primjeri krivulja snage za različite oblike turbinskih miješala.[8]

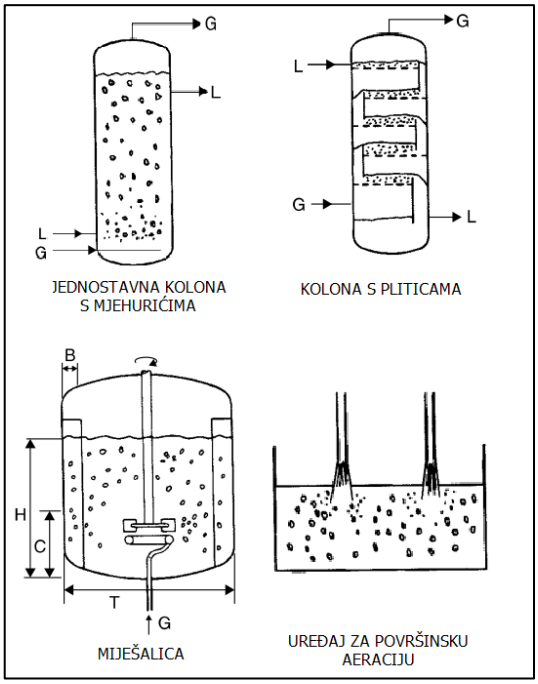


Slika 4. Krivulje snage za različite geometrije turbinskih miješala.

1.2. **Miješanje u sustavima plin/kapljevina**

Postupak dispergiranja ili raspršivanja plina u kapljevitoj fazi se primjenjuje u brojnim operacijama koje imaju izuzetan značaj u kemijskoj i srodnim industrijama. Tipični primjeri takvih procesa i operacija su hidriranje, halogeniranje, oksidacija, sušenje plina, razni tipovi fermentacije itd. Ova vrsta miješanja je posebno bitna pri aeraciji otpadnih voda. Aeracija je operacija kojom se plinovita faza dovodi u kontakt s vodom preko odgovarajućih sustava raspršivanja. U tom slučaju se operacija provodi radi što intenzivnijeg prijenosa kisika, odnosno obogaćivanja vode s kisikom kako bi postupak njenog pročišćavanja bio što učinkovitiji. Ona se primjenjuje u obradi otpadnih voda, ali i pri obradi prirodnih voda, kao i pri pripremi vode za ljudsku potrošnju. Najveću primjenu aeracija ipak ima u biološkoj aerobnoj obradi otpadnih voda, ali i u postupcima koji prethode tom tipu obrade.[2,9]

S obzirom na specifičnosti zahtjeva koji se traže pri pojedinim operacijama konstruirane su različite aparature za raspršivanje plina u kapljevini. Sve one moraju osigurati „razbijanje“ plina u što manje mjehuriće, tj. postojanje velikih smičnih sila, izraziti stupanj turbulencije i homogenost sustava. Na *slici 5*[2] prikazane su najčešće korišteni uređaji u praksi, a to su: kolone s mjehurićima, kolone s pliticama, mehaničke miješalice i uređaji za površinsku aeraciju.[2,10]



Slika 5. Uređaji za sustave plin/kapljevina.

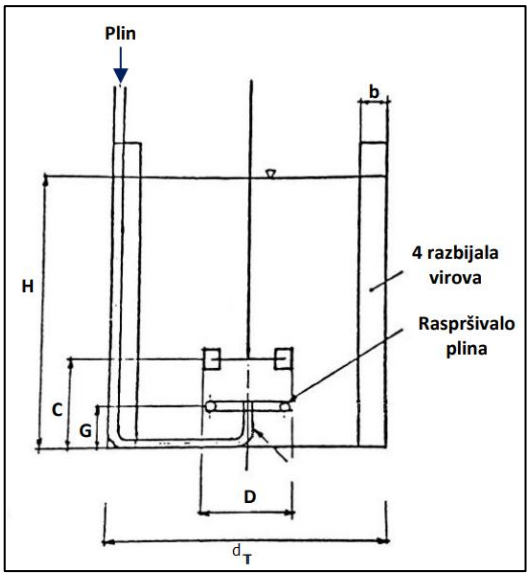
Prikazani uređaji (*slika 5*) koriste se uglavnom za niskoviskozne kapljevine ($\mu \leq 0{,}2$ Pa s). U njima je moguće postići intenzivnu turbulenciju kojom se postiže dobra izmiješanost sustava plin/kapljevina te veliki koeficijent prijenosa tvari i energije. S druge strane, za izrazito viskozne kapljevine ($\mu \geq 0{,}2$ Pa s) intenzivna turbulencija se ne može postići pa se za te slučajeve, da bi se provela ugradnja plina u kapljevinu, koriste mehanizmi laminarnog smicanja.[2,10]

Bitni parametri pri postupku miješanja sustava plin/kapljevina su:

- hidrodinamika sustava,
- utrošak snage potrebne za miješanje sustava,
- volumni udio plinske faze u sustavu,
- brzina prijenosa tvari.

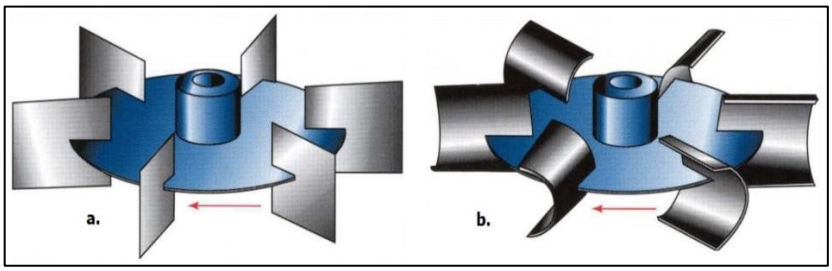
- ***Hidrodinamika u miješalici pri mehaničkom miješanju sustava plin/kapljevina***

Uređaji koji se zbog svoje jednostavnosti i učinkovitosti najčešće koriste za dispergiranje plina u laboratorijskoj i industrijskoj praksi je miješalica s mehaničkim miješanjem. Čimbenici koji utječu na hidrodinamiku u miješalici su: fizikalna svojstva faza (gustoća, viskoznost …), geometrijski parametri (geometrija posude, oblik, tip i veličina miješala) te radni uvjeti (vrste tokova u sustavu, brzina vrtnje miješala, protok plina). Empirijski je utvrđeno da se u većini slučajeva dobar učinak dispergiranja plina u kapljevini postiže ukoliko je visina stupca kapljevine u posudi identična promjeru posude za miješanje ($H = d_T$), promjer miješala jednak trećini promjera posude za miješanje ($D = d_T/3$), dok je isto postavljeno na trećinu visine stupca kapljevine ($C = H/3$). Raspršivalo plina se u tom slučaju postavlja ispod miješala na udaljenost od dna posude za miješanje koja iznosi $G = H/6$. Posuda mora sadržavati i četiri razbijala virova čija je širina, b, jednaka desetini promjera posude ($b = d_T/10$).[9]



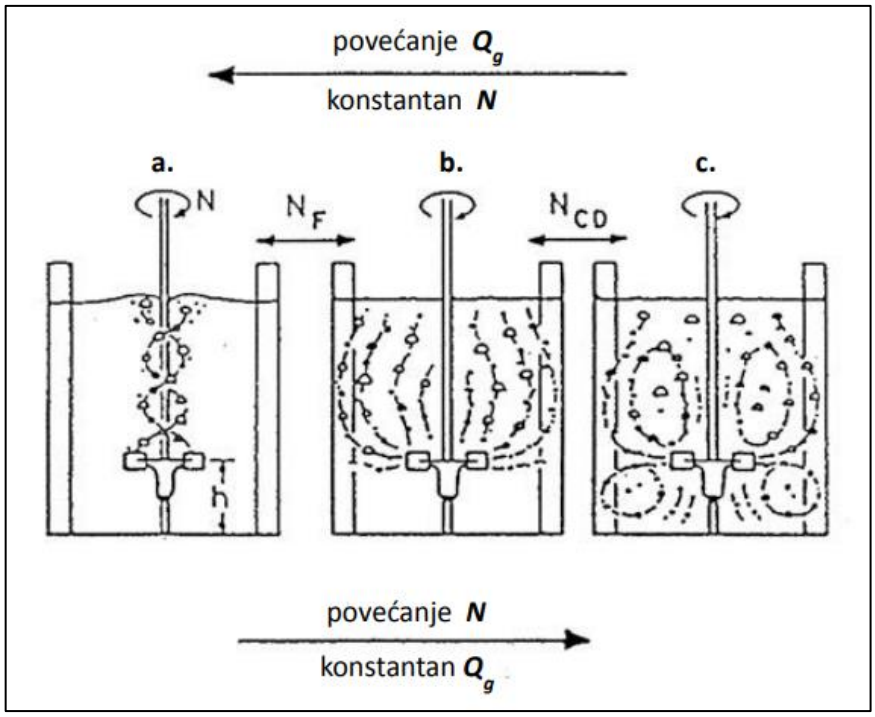
Slika 6. Geometrija posude za raspršenje plina u kapljevini.

Cilj miješanja, a samim time i korištenog miješala, je uzrokovati što veći gradijent brzine kapljevine, kako bi raspršenje plina unutar kapljevine bilo što bolje. Potrebno je intenzivirati u sustavu međufazne prijenosne pojave, tj. povećati kontaktnu površinu između plina i kapljevine, a što se postiže usitnjavanjem i raspršivanjem mjehurića plina kroz cijeli volumen posude. Hicks i Gates (1976.) su u svojim radovima uočili veliki utjecaj vrste miješala na raspršivanje plina u kapljevini, naglašavajući pri tome prednosti korištenja turbinskih miješala s diskom. Napretkom računalne dinamike fluida (*eng.* Computational Fluid Dynamics, CFD) tehnika analize miješanja, posljednjih desetljeća razvijaju se modificirani tipovi tih vrsta miješala (*slika 7*).[3]



Slika 7. Miješala koja se najčešće koriste pri disperziji plina u kapljevini (a. turbinsko miješalo s diskom i ravnim lopaticama, b. turbinsko miješalo s diskom i konkavnim lopaticama).

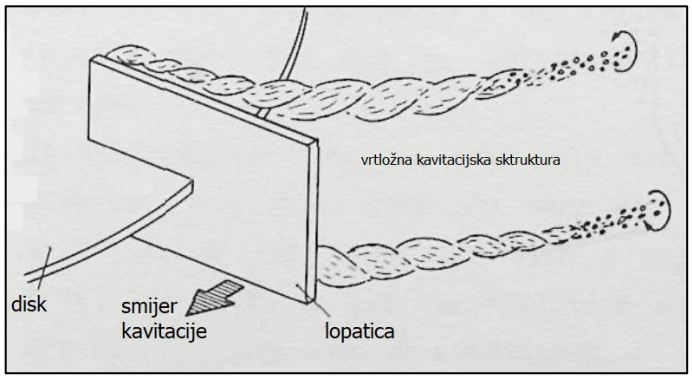
Prikazana turbinska miješala s diskom uzrokuju radijalan tok kapljevine. Međutim, na tok u sustavu, osim vrtnje miješala utječe i protok plina (Q_g), kao i brzina vrtnje miješala, *N*. Tokovi su definitivno bitni za stupanj homogenosti disperzije, volumni udio plina u kapljevini, brzinu prijenosa tvari kao i za lokalnu koncentraciju otopljenog plina. Ovisno o odnosu protoka plina i brzini vrtnje korištenog miješala, razlikuju se tri režima raspršenja (*slika 8*): režim potapanja miješala, točka opterećenja sustava i režim potpunog raspršenja disperzije.[3,11]



Slika 8. Vrste režima raspršenja u sustavu plin/kapljevina (a. režim potapanja miješala, b. režim opterećenja sustava, c. režim potpunog raspršenja plina u kapljevini).

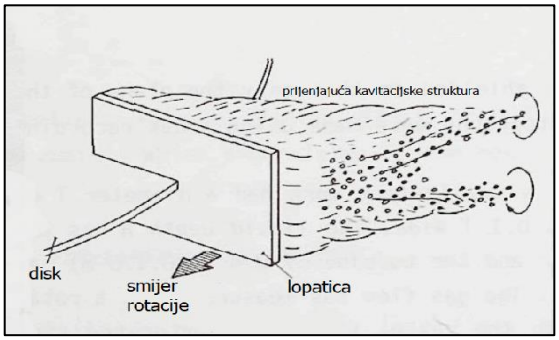
Pri određenom konstantnom protoku plina (Q_g = konst.), režim raspršenja u sustavu ovisit će o brzini vrtnje miješala (*N*). Pri manjim brzinama vrtnje dolazi do potapanja miješala (*slika 8a*), gdje se plin uz miješalo i osovinu podiže do vrha kapljevite faze. Oznaka brzine vrtnje miješala pri kojoj dolazi do režima potapanja miješala je N_F. Povećanjem intenziteta miješanja dolazi do radijalnog raspršivanja plina u kapljevini, ali samo u području iznad miješala i takav režim predstavlja točku opterećenja sustava (*slika 8b*). Daljnjim povećanjem brzine vrtnje miješala dolazi do režima potpunog raspršenja plina u kapljevini (*slika 8c*), a brzina vrtnje miješala pri kojoj dolazi do potpunog raspršenja se označava kao N_{CD}. Za vrijednosti brzina vrtnje miješala iznad vrijednosti N_{CD}, nema promjene vrste režima u sustavu.

Osim navedenih promjena režima u sustavu s promjenom N ili promjenom Q_g, također postoje i promjene tokova oko samog miješala. Naime, oko lopatica miješala s diskom formiraju se kavitacijske strukture koje imaju veoma važnu ulogu pri raspršivanju plina u kapljevini. Pri manjim protocima plina dolazi do stvaranja tzv. vrtložne kavitacije (*slika 9*)[12]. Vrtložne kavitacijske strukture formiraju se uslijed ulaženja plina u vrtlog koji se pojavljuje iza lopatica rotirajućeg miješala. Prostor unutar vrtloga karakterizira podtlak što uzrokuje ulaženje novih mjehurića plina u tu strukturu. Ovaj oblik kavitacijske strukture nije pričvršćen za lopaticu miješala već se slobodno vrti. „Rep" vrtloga se radijalno odmiče od miješala.[12]



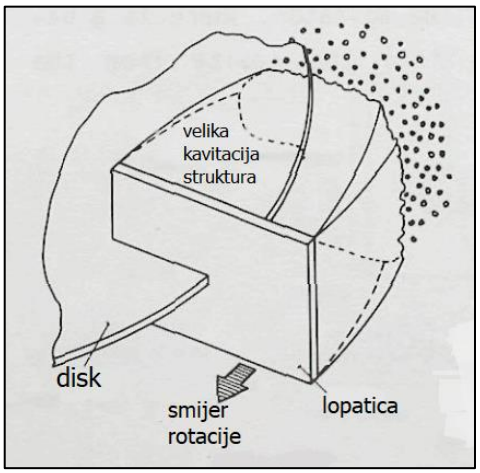
Slika 9. Vrtložne kavitacijske strukture.

Povećanjem protoka plina pri konstantnoj brzini vrtnje miješala rezultira rastom vrtložne strukture koja postupno prelazi u tzv. prijanjajuću kavitaciju (*slika 10*)[12]. Prijanjajuća kavitacija ispunjena je mnoštvom malih mjehurića, a kapljevina zajedno s plinom zadržava radijalni tok te plin napušta strukturu kroz vrtloge formirane na njenoj stražnjoj strani.[12]



Slika 10. Prijanjajuće kavitacijske strukture.

Daljnjim povećavanje protoka plina, formiraju se velike kavitacijske strukture (*slika 11*)[12]. Kod velikih kavitacijskih struktura, plin tangencijalno napušta tu strukturu, dok su prateći kavitacijski vrtlozi nestali. Prednja strana strukture stabilno je prilijepljena uz lopaticu, dok sa stražnje strane, vrlo fini mjehurići, napuštaju kavitacijsku strukturu. Njihovo raspršenje definitivno je potpomognuto turbulentnim uvjetima koji vladaju u posudi za miješanje.[12]



Slika 11. Velike kavitacijske strukture.

Velike kavitacijske strukture su stabilnije od prijanjajućih i vrtložnih te su mnogo učinkovitije pri raspršenju plina u kapljevini. Međutim, mora se biti oprezan s povećanjem protoka plina, jer velike kavitacijske strukture mogu toliko narasti da dovedu do potapanja miješala, što bi uzrokovalo drastično smanjenje raspršenja plina.[12]

Bezdimenzijske značajke vrlo bitne pri raspršivanju plina u kapljevini su:

- *aeracijska značajka* (N_A) koja predstavlja odnos volumnog protoka plina i dobave miješala:

$$N_A = \frac{Q_g}{ND^3} \tag{10}$$

- *modificirana Froudeova značajka* (Fr) koja daje odnos sile inercije i sile gravitacije:

$$Fr = \frac{N^2 D}{g} \tag{11}$$

U navedenim značajkama:

N_A – aeracijska značajka [-],

Fr – Froudeova značajka [-],

Q_g – protok plina [$m^3\ s^{-1}$],

N – brzina vrtnje miješala [okr. s^{-1}],

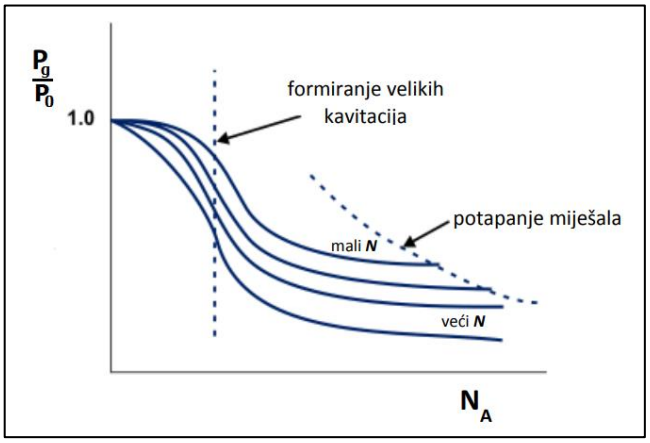
D – promjer miješala [m],

g – ubrzanje sile teže [m min^{-2}].

Za sve vrste turbinskih miješala s diskom eksperimentalno je utvrđeno da se režim potpunog raspršenja plina u kapljevini postiže pri vrijednostima Froudeove značajke većim od 0,045.[9]

- ***Utrošak snage miješanja pri raspršivanju plina u kapljevini***

Pri raspršivanju plina u kapljevini jedan od najvažnijih parametara pri dizajniranju miješalice za sustave plin/kapljevina je utrošak snage miješala. Navedeni utrošak usko je povezan s kavitacijskim strukturama i režimom raspršenja u sustavu. Povećanjem kavitacijskih struktura smanjuje se utrošak snage miješanja. U sustavima plin/kapljevina koristi se relativni utrošak snage miješanja (P_g/P_0) koji predstavlja odnos utrošaka snage u aeriranom i neaeriranom sustavu. Pri konstantnoj Froudeovoj značajci relativni utrošak snage je funkcija aeracijske značajke (*slika 12*).[3,9]



Slika 12. Relativni utrošak snage miješanja kao funkcija aeracijske značajke za različite brzine vrtnje miješala.

Utrošak snage za aerirani sustav (P_g) pri korištenju turbinskih miješala postavljenih iznad raspršivala zraka, može se odrediti i pomoću izraza:[3]

$$P_g = P_0(1 - (b - a\mu)Fr^d \cdot tg(cN_A) \qquad (12)$$

gdje su:

a, b, c, d – konstante i eksponent [-] koji za turbinsko miješalo s diskom i ravnim lopaticama iznose: a = 0,72; b = 0,72; c = 24; d = 0,25; dok za turbinsko miješalo s diskom i konkavnim lopaticama: a = 0,12; b = 0,44; c = 12; d = 0,37. [3]

- ***Volumni udio plinske faze u sustavu***

Bitan parametar u postupku miješanja sustava plin/kapljevina je i volumni udio plinske faze u sustavu (*eng.* holdup). Zadržavanje plinske faze u kapljevitoj izravno utječe na brzinu prijenosa tvari, ali on može utjecati i na razinu kapljevine, odnosno na raspoloživi volumen kapljevine u posudi. Zadržavanje plina definirano je izrazom:

$$\alpha = \frac{V_G}{V_G + V_L} \qquad (13)$$

gdje je:

α – volumni udio plinske faze u sustavu [-],

V_L – volumen kapljevite faze [dm^3],

V_G – volumen plinovite faze [dm^3].

Ova veličina je funkcija fizikalnih svojstava kapljevine, sustava miješanja, ulazne snage i sastava plinovite faze i može se predvidjeti sljedećom korelacijom:

$$\alpha = C_\alpha \left(\frac{P_g}{V_L}\right)^A \cdot v_{sg}^B \qquad (14)$$

gdje je:

C_α – konstanta proporcionalnosti [-] (za sustav zrak/voda: C_α = 0,16 ± 0,04),

A, B – konstante [-] (za sustav zrak/voda: A = 0,33, B = 0,67),

V_L – volumen kapljevite faze [m^3],

v_{sg} – površinska brzina plina [m^2 h^{-1}].

Navedene konstante, općenito ovise o geometrijskim karakteristikama sustava za miješanje, tipu miješala i fizikalnim karakteristikama fluida. [3] Protok plina iskazan je preko površinske brzine plina, v_{sg}:

$$v_{sg} = \frac{Q_g}{\frac{2\pi d_T}{4}} \qquad (15)$$

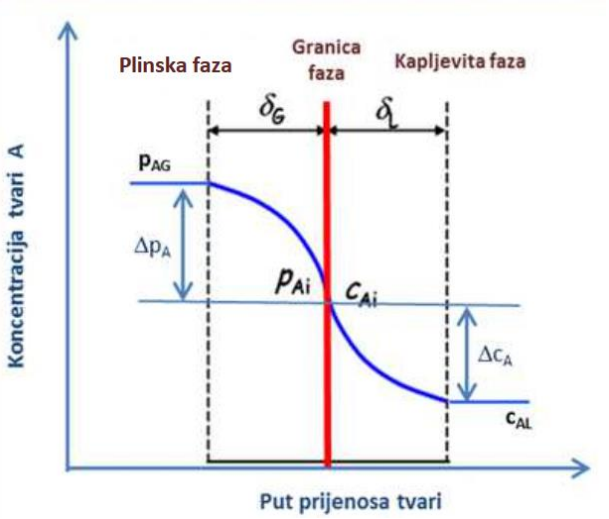
1.2.1. **Međufazni prijenos tvari (prolaz tvari)**

Za razumijevanje disperzije plina u kapljevini potrebno je poznavati proces prijenosa tvari koji se odvija između dva nemješljiva fluida, poznatiji pod nazivom međufazni prijenos tvari ili jednostavnije prolaz tvari. Općenito, ako je neka komponenta *A* topljiva i u *fluidu 1* i u *fluidu 2*, tada je zadovoljen preduvjet za odvijanje prolaza tvari. Osim navedenog preduvjeta, također je potrebno zadovoljiti:

- da su *fluidi 1* i *2* u međusobnom kontaktu,
- da postoji razlika koncentracija komponente *A* u *fluidima 1* i *2*, budući da je razlika koncentracija pokretačka sila međufaznog prijenosa tvari.[13]

Teorija koja objašnjava međufazni prijenos tvari je teorija dvaju otpora ili filmova. Po toj teoriji ukupni otpor prolazu tvari je rezultanta otpora koje pružaju hidrodinamički laminarni granični slojevi u plinskoj i kapljevitoj fazi, a koji se uslijed trenja formiraju neposredno uz granicu faza. Prema toj teoriji, prolaz tvari odvija se kroz tri stupnja (*slika 13*):

- prijenos tvari iz mase plinske faze do granice faza kroz hidrodinamički granični sloj,
- prijenos tvari kroz granicu faza,
- prijenos tvari s granice faza u masu kapljevine.[14,15]



Slika 13. Dijagram teorije dvaju filmova.

Brzina prijelaza unutar pojedinih faza može se prikazati na sljedeći način:

$$\ddot{n}_A = k_G \cdot (p_{AG} - p_{Ai}) = \frac{(p_{AG} - p_{Ai})}{\frac{1}{k_G}} \tag{16}$$

$$\ddot{n}_A = k_L \cdot (c_{Ai} - c_{AL}) = \frac{(c_{Ai} - c_{AL})}{\frac{1}{k_L}} \tag{17}$$

gdje je:

$\ddot{n}_A$ – množinski fluks ili gustoća toka [mol s^{-1} dm^2],

k_G – koeficijent prijelaza tvari u plinovitoj fazi [mol dm^{-2} s^{-1} Pa^{-1}],

k_L – koeficijenti prijelaza tvari u kapljevitoj fazi [dm s^{-1}],

$(p_{AG}-p_{Ai})$ – Δp, pokretačka sila prijelaza tvari u plinovitoj fazi [Pa],

$(c_{Ai}-c_{AL})$ – Δc, pokretačka sila prijelaza tvari u kapljevitoj fazi [mol dm^{-1}].

Veličine p_{Ai} i c_{Ai} predstavljaju parcijalni tlak, odnosno koncentraciju komponente *A* na granici faze. Njihove vrijednosti je teško eksperimentalno odrediti pa se uvodi tzv. ukupna pokretačka sila prolaza tvari. Naime, uz pretpostavku stacionarnih uvjeta, ukupna količina tvari koja je došla do granice faza prolazi kroz granicu faza. Zato se koncentracije te tvari na granici faza mogu smatrati jednakima. Pri zbrajanju fluksova za pojedine faze ti članovi se onda mogu kratiti. Međutim, u navedenim izrazima koeficijent prijelaza tvari za plinsku i kapljevitu fazu imaju potpuno različite mjerne jedinice i nije ih moguće zbrajati. Stoga je potrebno pronaći njihovu međusobnu vezu. Ta veza je ravnotežna krivulja, odnosno Henryjev zakon.

Uvrštavanjem ekvivalentnih koncentracija i parcijalnih tlakova dobivenih primjenom Henryjevog zakona u izraze (16) i (17), dobije se množinski fluks ukupnog prijenosa tvari, odnosno množinski fluks prolaza tvari koji je dan izrazom:

$$\ddot{n}_A = \frac{(p_{AG} - p^*_{AL})}{\frac{1}{k_G} + \frac{1}{k_L} \cdot H} = \frac{(c^*_{AG} - c_{AL})}{\frac{1}{k_G \cdot H} + \frac{1}{k_L}} \tag{18}$$

gdje su p_{AL}^* i c_{AG}^* članovi određeni pomoću Henryjevog zakona, dok H predstavlja Henryjevu konstantu. Iz jednadžbe se uočava da je ukupna ekvivalentna pokretačka sila jednaka razlici koncentracija u pojedinim fazama (izraženom ili parcijalnim tlakovima ili koncentracijama).

Nazivnici u izrazu (18) mogu se prikazati na sljedeći način:

$$K_G = \frac{1}{\frac{1}{k_G} + \frac{H}{k_L}} \quad ili \quad K_L = \frac{1}{\frac{1}{k_G \cdot H} + \frac{1}{k_L}} \tag{19}$$

Oni predstavljaju ukupan koeficijent prijenosa tvari ili koeficijent prolaza tvari, koji može biti iskazan ili kao K_L ili kao K_G. U biti, oni predstavljaju sumu otpora koji se pojavljuju u plinskoj ili kapljevitoj fazi pri prolazu tvari. Njihov međusobni odnos je: [9,13,14,15]

$$K_G = \frac{K_L}{H} \tag{20}$$

Iz navedenog slijedi da se fluks ukupnog prijenosa tvari ili fluks prolaza tvari može pisati na sljedeći način:

$$\ddot{n}_A = K_G \cdot (p_{AG} - p_{AL}^*) = K_L \cdot (c_{AG}^* - c_{AL}) \tag{21}$$

Iz množinskog fluksa (21) slijedi da je brzina prolaza plina definirana izrazom:

$$\frac{n_A}{t} = K_G \cdot A \cdot (p_{AG} - p_{AL}^*) = K_L \cdot A \cdot (c_{AG}^* - c_{AL}) \tag{22}$$

gdje je:

A – kontaktna površina između plinovite i kapljevite faze [dm^2],

n_A/t – brzina prolaza kisika [mol s^{-1}].

Ako se želi sagledati brzinu prolaza tvari po jedinici volumena reaktorskog sustava, jednadžbu (18) potrebno je podijeliti s volumenom kapljevine (V_L):

$$\frac{c_A}{t} = K_G a \cdot \Delta p = K_L a \cdot \Delta c \qquad (23)$$

gdje je:

a – specifična površina kroz koju se odvija prolaz tvari [m^2/m^3],

$K_L a$, $K_G a$ – volumni koeficijent prolaza tvari [s^{-1}],

c_A/t – brzina prolaza tvari po jedinici volumena reaktora [mol dm^{-3} s^{-1}].

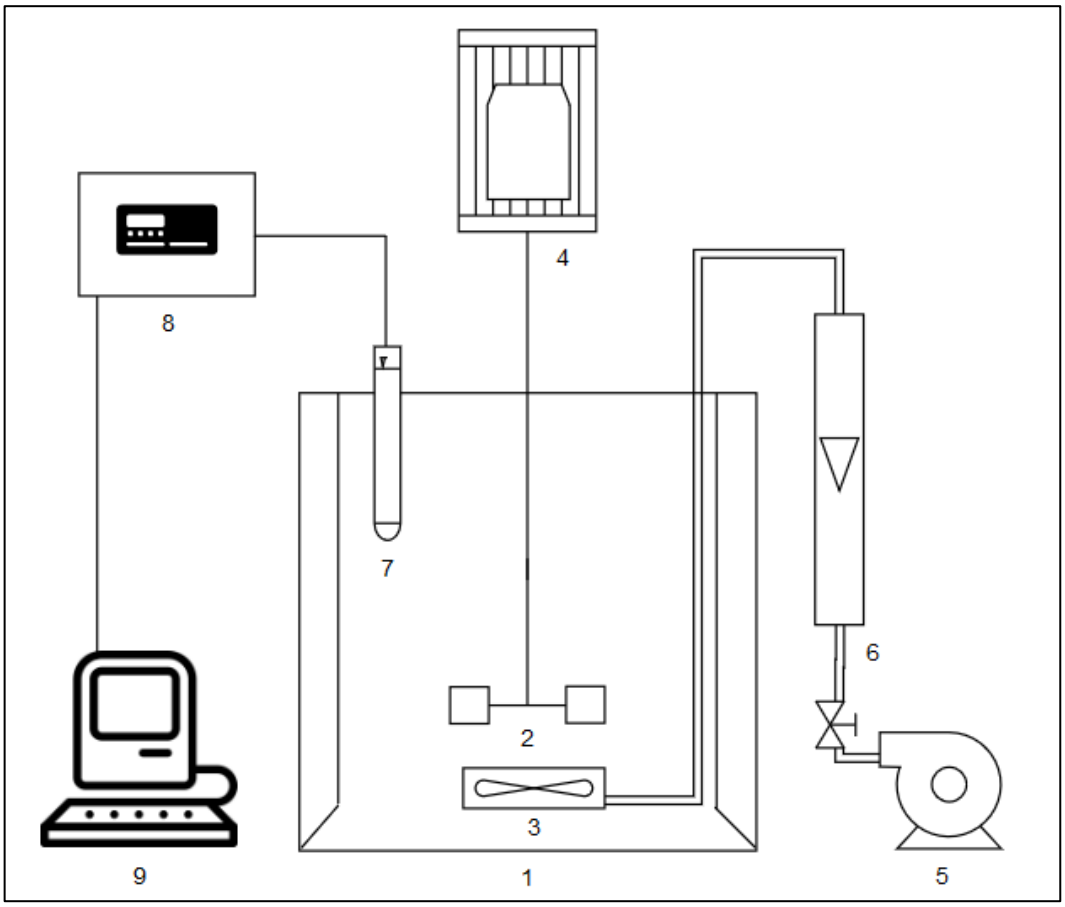
Vrijednosti specifične površine kroz koju se odvija prolaz tvari, a, je vrlo teško eksperimentalno odrediti te se ona određuje zajedno s konstantom K_L. U sustavima plin/kapljevina glavni otpor prolazu tvari je na strani kapljevine, tako da se otpor na strani plinske faze obično zanemaruje. Na taj način volumni koeficijent prolaza tvari postaje identičan volumnom koeficijentu prijelaza tvari, $k_L a$.[9,13,14,15]

2. EKSPERIMENTALNI DIO

2.1. **Metodika**

2.1.1. **Opis aparature za provedbu eksperimenta**

Shematski prikaz aparature za raspršenje plina u kapljevini prikazan je na *slici 14*, a izgled aparature je na *slici 15.*



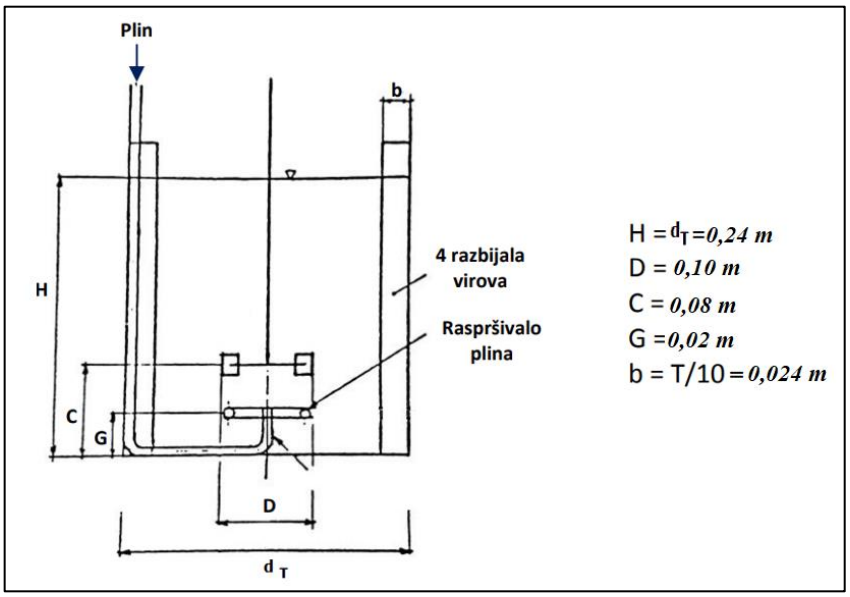
Slika 14. Shematski prikaz aparature za provedbu eksperimenta (1. Posuda za raspršenje plina u kapljevini; 2. Miješalo; 3. Raspršivalo plina; 4. Miješalica s regulatorom brzine vrtnje miješala i mjerilom zakretnog momenta; 5. Puhaljka za zrak s ventilom; 6. Rotametar, 7. Kisikova elektroda; 8. Oksimetar; 9. Računalo).



Slika 15. Aparatura za provedbu eksperimenta.

Raspršenje plina u kapljevini provodilo se u staklenoj posudi ravnog dna u kojoj je volumen kapljevine iznosio 10,85 dm^3. Ovaj tip posude, osnovnih karakteristika prikazanih na *slici 16*, omogućavao je vizualno praćenje stanja ispitivanog sustava tijekom raspršenja plina u kapljevini. Kao kapljevina, korištena je vodovodna voda pri sobnoj temperaturi (t = 18 ºC, ρ_{H2O} = 0,9989 g dm^{-3}, μ_{H2O} = 0,001 $m^2\ s^{-1}$), dok je kao plin koji se u njoj raspršivao, koristio zrak, također pri sobnoj temperaturi. Visina stupca kapljevine u posudi za miješanje bila je istovjetna promjeru posude ($H = T$). S unutarnje strane stijenke posude nalazila su se četiri razbijala virova standardnih dimenzija ($b = d_T/10$ = 0,024 m), postavljena pod kutom od 90° u odnosu na stijenku. Razbijala virova u neposrednoj blizini dna posude izvedena su pod kutom od 45°, čime se nastojalo spriječiti eventualno nagomilavanje plina u donjem dijelu posude za miješanje, tj. nastajanje tzv. "mrtvih zona".

.



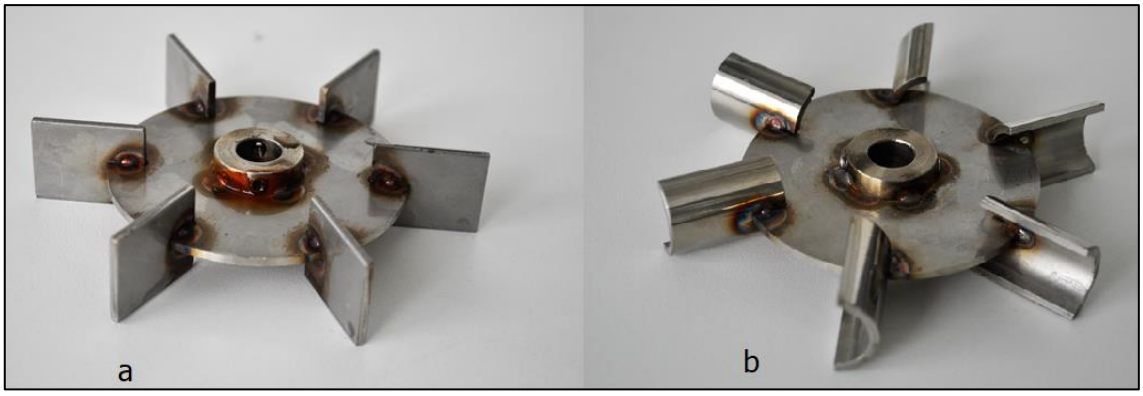
Slika 16. Osnovne karakteristike posude za miješanje.

Brzina miješanja u posudi regulirana je miješalicom tipa *SPXFLOW Lightnin* (*slika 17*) koja je opremljena osjetilom te mjerilom zakretnog momenta. Preciznost kontrole brzine vrtnje miješala iznosila je 1 okr. min^{-1}. Uređaj je omogućavao i kontinuirano praćenje utroška snage miješanja tijekom raspršenja zraka u vodi.



Slika 17. Miješalica *SPXFLOW Lightnin*.

U ovom radu, za miješanje kapljevine, korištena su dva različita tipa turbinskih miješala, koji su u sustavu generirali radijalan tok disperzije (*slika 18*). Oba miješala imaju diskove koji usmjeravaju plin u prostor između lopatica radi što učinkovitijeg raspršenja plina u kapljevini, odnosno radi postizanja što veće kontaktne površine tih dviju faza.



Slika 18. Turbinska miješala s diskom i a. ravnim (TD-6RL), b. konkavnim (TD-6KL) lopaticama.

Prvo miješalo ima 6 ravnih lopatica (*slika 18a*) i njegova će oznaka u daljnjem dijelu rada biti TD-6RL (turbulentno miješalo s diskom i šest ravnih lopatica). Drugo korišteno miješalo na svom disku ima 6 konkavnih lopatica, kao što je prikazano na *slici 18b*. Ovo miješalo će u radu biti označeno kao TD-6KL. Promjer turbulentnih miješala iznosio je 0,10 m, tako da je simpleks koji predstavlja omjer promjera miješala i posude, D/d_T, bio 0,42. Osnovne geometrijske značajke korištenih miješala prikazane su u *tablici 1*.

Tablica 1. Geometrijske značajke korištenih turbinskih miješala.

Geometrijske značajke miješala	**Tip miješala**	
	TD-6RL	TD-6KL
Promjer miješala, *D*	0,10 m (D/d_T = 0,42)	0,10 m (D/d_T = 0,42)
Nagib lopatica miješala, α	90º	Konkavne lopatice
Udaljenost miješala od dna posude, *C*	0,08 m (C/H = 0,33)	0,08 m (C/H = 0,33)
Udaljenost raspršivala od dna posude, *G*	0,02 m (G/H = 0,08)	0,02 m (G/H = 0,08)
Tok kapljevine u posudi	Radijalan	Radijalan

Na *slici 19* prikazan je dio aparature koji služi za dovod plina u sustav. Njegov je osnovni dio membransko puhalo zraka *Interplan ET-120* čiji je maksimalni kapacitet 120 dm^3 zraka min^{-1}. Protok zraka regulirao se rotametrom, da bi potom taj zrak preko raspršivala bio uvođen u kapljevinu. Raspršivalo plina izrađeno je od inox cijevi unutarnjeg promjera 6,5 mm. Dio raspršivala kroz koji se plin uvodi u kapljevinu je kružnog oblika, promjera 65 mm, a na njegovoj površini su se nalazili otvori promjera 1 mm za izlaz plina.



Slika 19. Aparatura za dovod zraka u sustav.

Tijekom raspršenja dolazi do međufaznog prijenosa tvari gdje kisik iz zraka prolazi u vodu. Za određivanje brzine prijenosa kisika korišten je digitalni oksimetar s kisikovom elektrodom tipa *YSI ProODO* (*slika 20*). Digitalnim oksimetrom s kisikovom elektrodom mjeri se koncentracija otopljenog kisika u vodi sve do koncentracije zasićenja. Računalo bilježi, svaku sekundu, podatke o koncentraciji kisika u vodi i automatski ih pohranjuje.



Slika 20. Digitalni oksimetar *YSI ProODO* s kisikovom elektrodom.

2.1.2. **Provedba eksperimenta**

S namjerom utvrđivanja te uspoređivanja učinkovitosti korištenih turbinskih miješala s diskovima, eksperimentalni postupak za svako miješalo provodio se u tri koraka:

- vizualno određivanje režima raspršenja plina u kapljevini pri različitim brzinama vrtnje miješala i konstantnom protoku plina,
- određivanje relativnog utroška snage miješanja pri različitim režimima raspršenja,
- određivanje brzine prolaza kisika iz zraka u vodu pri režimu potpunog raspršenja plina u kapljevini.

Pri svim eksperimentima, volumen kapljevine, tj. vode iznosio je 10,85 dm^3, protok zraka 200 $dm^3\ h^{-1}$, dok je brzina vrtnje miješala mijenjana do postizanja režima potpunog raspršenja.

2.1.2.1. **Vizualno određivanje režima raspršenja plina u kapljevini**

U prvom dijelu eksperimenta, bilo je potrebno vizualno odrediti režime potapanja miješala, opterećenje sustava i režim potpunog raspršenja plina u kapljevini mijenjanjem brzine vrtnje miješala pri konstantnom protoku zraka od 200 $dm^3\ h^{-1}$. Režimi raspršenja plina u kapljevini prikazani su i detaljno opisani u *poglavlju 1.2*. Nakon puštanja zraka u sustav, brzina vrtnje miješala se postupno povećavala te je vizualno praćeno stanje sustava. Brzina vrtnje miješala se povećavala za 5 okr. min^{-1}. Po izvršenoj promjeni, sustav se stabilizirao oko 5 minuta, kako bi se vizualno odredio režim raspršenja plina u kapljevini. Brzina vrtnje miješala je povećana sve do postizanja režima potpunog raspršenja plina u kapljevini. Posebna pozornost je usmjerena na određivanje brzine vrtnje miješala za režime potapanja miješala (N_F) i za režim potpunog raspršenja (N_{CD}). Mjerenja su ponavljana pet puta, a kao konačni rezultat uzeta je srednja vrijednost tih mjerenja.

Iz eksperimentalnih vrijednosti su određene Froudeove i aeracijske značajke korištenjem izraza (10) i (11). Tako eksperimentalno određene vrijednosti aeracijskih značajki za režime potapanja miješala i potpunog raspršenja, uspoređene su s teorijskim vrijednostima dobivenim korištenjem izraza:**Pogreška! Knjižna oznaka nije definirana.**

$$N_{A,FL} = C_{FL} \cdot Fr \cdot \left(\frac{D}{d_T}\right)^{3,5} \tag{24}$$

$$N_{A,CD} = C_{CD} \cdot Fr^{0,5} \cdot \left(\frac{D}{d_T}\right)^{0,5} \tag{25}$$

gdje je:

$N_{A,FL}$ – teorijska aeracijska značajka pri režimu potapanja miješala,

$N_{A,CD}$ – teorijska aeracijska značajka pri režimu potpunog raspršenja,

C_{FL} – konstanta koja ovisi o geometrijskim karakteristikama miješala (C_{FL} = 30 za TD-6RL; C_{FL} = 70 za TD-6KL),

C_{CD} – konstanta koja ovisi o geometrijskim karakteristikama miješala (C_{CD} = 0,2 za TD-6RL; C_{CD} = 0,4 za TD-6KL),

Fr – Froudeova značajka [-],

D – promjer miješala [m],

d_T – promjer posude za miješanje [m].

2.1.2.2. Određivanje relativnog utroška snage miješanja za različite režime

Relativni utrošak snage miješanja predstavlja odnos utroška snage u aeriranom i neaeriranom sustavu (P_g/P_0). Snaga miješanja određivana je mjerenjem zakretnog momenta (τ) pri svim ispitivanim uvjetima raspršenja plina u kapljevini.

Na temelju zakretnog momenta i brzine vrtnje miješala, N, utrošak snage, P, određen je prema izrazu

$$P = 2 \cdot \pi \cdot \tau \cdot N \tag{26}$$

Istovjetnim postupkom određivan je i utrošak snage miješanja za neaerirani sustav.

2.1.2.3. **Određivanje brzine prolaza kisika iz zraka u vodu**

Kako bi se odredila brzina prolaza kisika iz zraka u vodu, potrebno je kontinuirano mjeriti koncentraciju otopljenog kisika u vodi. To mjerenje je provođeno uporabom digitalnog oksimetra *YSI ProODO* s kisikovom elektrodom. Prije početka mjerenja uklanja se kisik iz vodovodne vode koji je u njoj prirodno otopljen dodavanjem približno 2 g Na_2SO_3 (anhidrid) p.a. čistoće koji uslijed kemijske reakcije potroši gotovo sav kisik u vodi. Kada koncentracija otopljenog kisika u vodi padne na 0,5 mg dm^{-3} može se započeti s uvođenjem i raspršenjem zraka u vodi, te mjerenjem koncentracije kisika koja se iz zraka otapa u vodi.

Digitalni oksimetar registrira koncentracije otopljenog kisika svaku sekundu, a mjerenja traju sve do postizanja koncentracija zasićenja vode kisikom pri sobnim uvjetima, koja približno iznosi 8 mg O_2 $(dm^3\ H_2O)^{-1}$. Sva mjerenja ponavljana su četiri puta, a za svako mjerenje korištena je svježa voda. Brzina prijenosa kisika iz zraka u vodu određena je izrazom:

$$\frac{dc}{dt} = k_L a \cdot (c_S - c_0) \tag{27}$$

gdje c_S predstavlja koncentraciju zasićenja kisika u vodi, a c_0 koncentraciju kisika na samom početku mjerenja (c_0 = 0,5 mg dm^{-3}).

Numeričku vrijednost volumnog koeficijenta brzine prijenosa kisika, $k_L a$, moguće je odrediti grafički. Naime izraz za brzinu prijelaza kisika:

$$\frac{dc}{dt} = k_L a \cdot (c_S - c_L) \tag{28}$$

preuređuje se u oblik:

$$\frac{dc}{(c_S - c_L)} = k_L a \cdot dt \tag{29}$$

da bi se potom integriranjem dobila jednadžba pravca:

$$\ln(c_S - c_L) = -k_L a \cdot t + konst. \tag{30}$$

gdje c_S predstavlja koncentraciju zasićenja kisika u vodi, a c_L koncentraciju kisika u vodi u vremenu *t*. Iz grafičkog prikaza jednadžbe (30) u obliku *ln* Δc – *t*, moguće je odrediti vrijednost $k_L a$, koja je jednaka negativnoj vrijednosti nagiba pravca.

3. REZULTATI

3.1. **Vizualno određivanje režima raspršenja plina u kapljevini**

U prvom dijelu rada vizualno su određeni režimi raspršenja plina u kapljevini. Kao plin je korišten zrak, dok se kao kapljevina koristila voda pri sobnoj temperaturi. Protok zraka bio je konstantan i iznosio je $Q_g = 200\ dm^3\ h^{-1}$. Za raspršenje plina u kapljevini korištena su dva tipa turbinskih miješala: TD-6RL i TD-6KL i za svako od njih određeni su režimi raspršenja. Uporabom miješalice *SPXFLOW Lightnin* postupno se povećavala brzina vrtnje miješala do postizanja režima potpunog raspršenja. Detaljan postupak vizualnog određivanja raspršenja plina u kapljevini opisan je u *poglavlju 2.1.2.1*.

Sva su se mjerenja ponavljala pet puta te je kao konačni rezultat korištena srednja vrijednost tih mjerenja.

U *tablici 2* prikazane su brzine vrtnje korištenih turbinskih miješala potrebne za postizanje režima potapanja miješala i potpunog raspršenja plina u kapljevini, dok se u *tablici 3* nalaze eksperimentalno i teorijski određene vrijednosti aeracijskih i Froudeovih značajki za korištena turbinska miješala. Teorijske vrijednosti aeracijskih značajki određene su korištenjem izraza (24) i (25).

Tablica 2. Brzine vrtnje korištenih turbulentnih miješala potrebne za postizanje režima potapanja miješala i potpune disperzije plina u kapljevini.

a) TD - 6RL

Q_g = 200 dm^3 h^{-1} = 3,33 dm^3 min^{-1}				
Br. mjerenja	**Režim potapanja miješala**		**Režim potpunog raspršenja**	
	N_F		**N_{CD}**	
	okr. min^{-1}	**okr. s^{-1}**	**okr. min^{-1}**	**okr. s^{-1}**
1.	90	1,50	215	3,58
2.	85	1,42	211	3,52
3.	89	1,48	214	3,57
4.	91	1,52	207	3,45
5.	90	1,50	209	3,48
Srednja vrijednost	**89**	**1,48**	**212**	**3,52**

b)TD - 6KL

Q_g = 200 dm^3 h^{-1}= 3,33 dm^3 min^{-1}				
Br. mjerenja	**Režim potapanja miješala**		**Režim potpunog raspršenja**	
	N_F		**N_{CD}**	
	okr. min^{-1}	**okr. s^{-1}**	**okr. min^{-1}**	**okr. s^{-1}**
1.	76	1,27	205	3,42
2.	77	1,28	203	3,38
3.	79	1,32	200	3,33
4.	77	1,28	207	3,45
5.	75	1,25	199	3,32
Srednja vrijednost	**77**	**1,28**	**203**	**3,38**

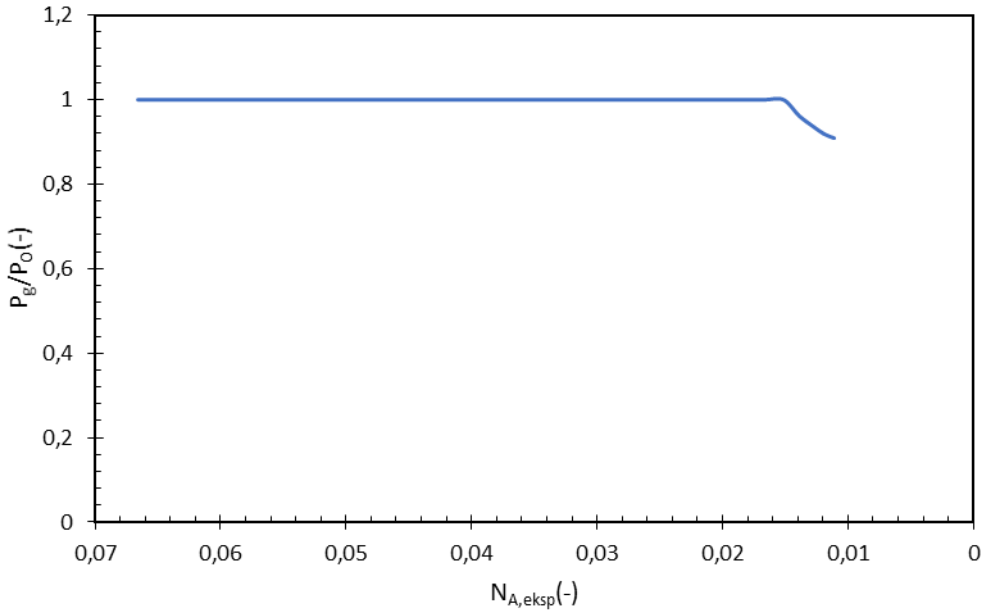
Tablica 3. Eksperimentalno i računski određene vrijednosti aeracijskih i Froudeovih značajki za korištena turbinska miješala.

	TD-6RL		**TD-6KL**	
	Režim potapanja miješala	**Režim potpunog raspršenja**	**Režim potapanja miješala**	**Režim potpunog raspršenja**
Fr	0,022	0,126	0,017	0,117
$N_{A,eksp}$	0,038	0,016	0,043	0,026
$N_{A,teor}$	0,031	0,015	0,055	0,028

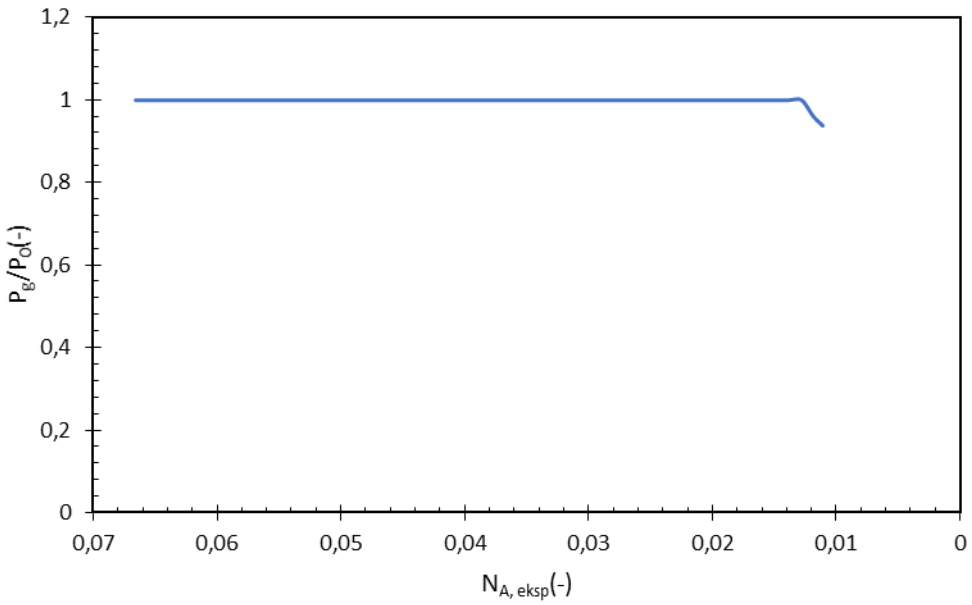
3.2. Određivanje relativnog utroška snage miješanja za različite režime raspršenja

U drugom dijelu rada eksperimentalno je određen utrošak snage miješanja za korištena miješala pri različitim brzinama njihove vrtnje. Utrošak snage određen je u aeriranom (P_g) i neaeriranom (P_0) sustavu kako bi se mogao odrediti relativni utrošak snage (P_g/P_0). Utrošak snage određen je na temelju zakretnog momenta i brzine vrtnje miješala uporabom izraza (26). Pri aeraciji sustava protok zraka iznosio je Q_g = 200 dm^3 h^{-1}, dok se brzina vrtnje miješala postupno povećavala do postizanja režima potpunog raspršenja plina u kapljevini.

Podatci dobiveni za korištene tipove turbinskih miješala s diskom prikazani su na *slikama 21* i *22*, kao odnos relativnog utroška snage miješanja o eksperimentalno određivanoj aeracijskoj značajci.



Slika 21. Odnos relativnog utroška snage miješanja o aeracijskoj značajci za TD-6RL.



Slika 22. Odnos relativnog utroška snage miješanja o aeracijskoj značajci za TD-6KL.

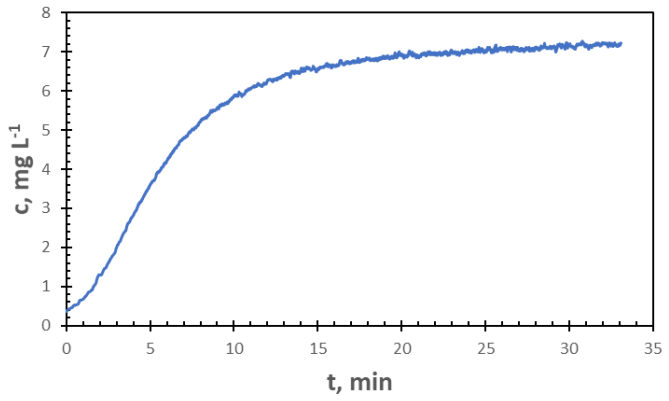
3.3. **Određivanje brzine prolaza kisika iz zraka u vodu**

U ovom dijelu rada određen je utjecaj tipa turbinskog miješala na brzinu prolaza kisika iz zraka u vodovodnu vodu. Brzina prolaza kisika određena je pri režimu potpunog raspršenja plina u kapljevini, tj. pri brzinama vrtnje od 212 okr. min^{-1} za miješalo tipa TD-6RL i 203 okr. min^{-1} za miješalo tipa TD-6KL.

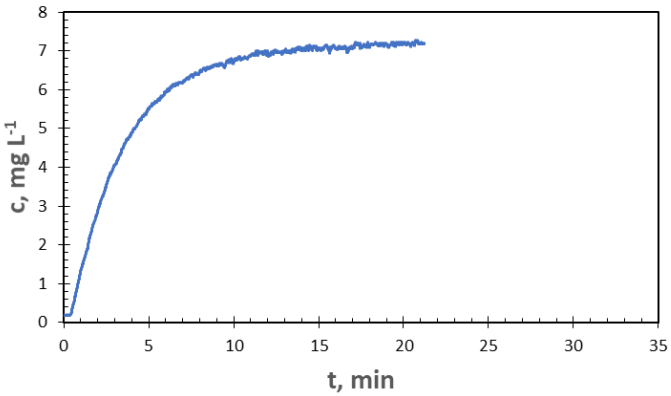
Protok zraka tijekom eksperimenata bio je konstantan i iznosio je Q_g = 200 dm^3 h^{-1}. Koncentracija otopljenog kisika u vodi kontinuirano je mjerena digitalnim oksimetrom s kisikovom elektrodom. Detaljan postupak mjerenja opisan je u *poglavlju 2.1.2.3.*

Na *slikama 23* i *24* prikazani su rezultati mjerenja, tj. promjena koncentracije otopljenog kisika s vremenom aeracije pri uporabi miješala tipova TD-6RL i TD-6KL. Mjerenja su ponavljana četiri puta, a u radu su prikazani rezultati svih mjerenja.

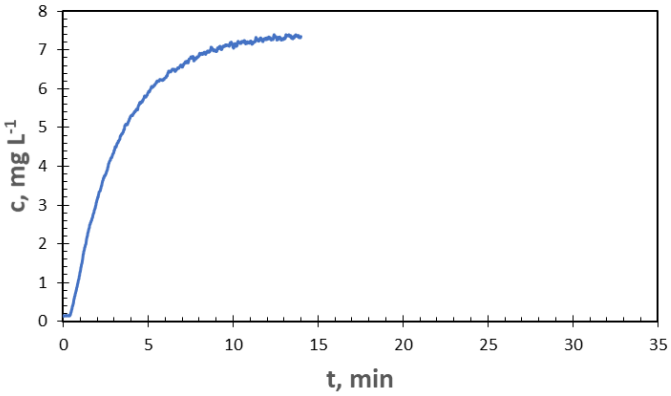
S ciljem određivanja numeričke vrijednosti volumnog koeficijenta prijelaza kisika, k_La, iz podataka prikazanih na *slikama 23* i *24* dobiven je odnos $ln\ \Delta c - t$ za svako korišteno miješalo te je prikazan na *slikama 25* i *26.*



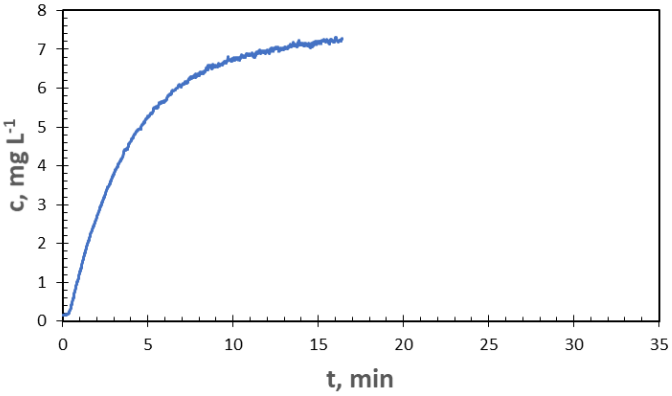
Mjerenje 1



Mjerenje 2

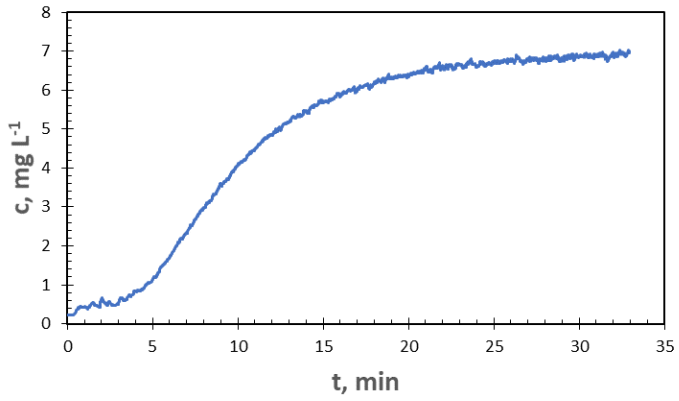


Mjerenje 3

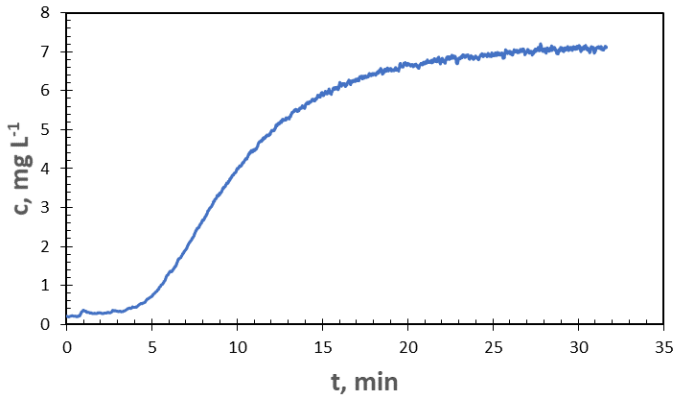


Mjerenje 4

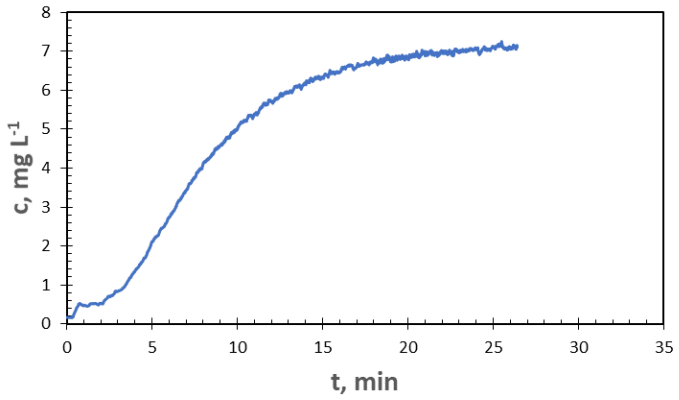
Slika 23. Promjena koncentracije otopljenog kisika u vodi s vremenom aeracije pri uporabi TD-6RL miješala (Q_g = 200 dm^3 h^{-1}; N_{CD} = 212 okr. min^{-1}; 4 mjerenja pri istim uvjetima).



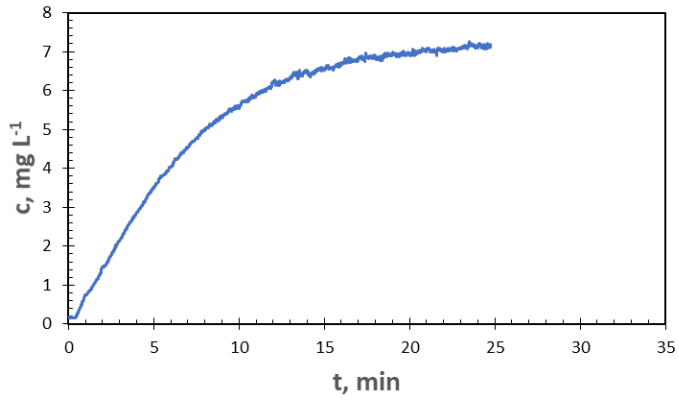
Mjerenje 1



Mjerenje 2



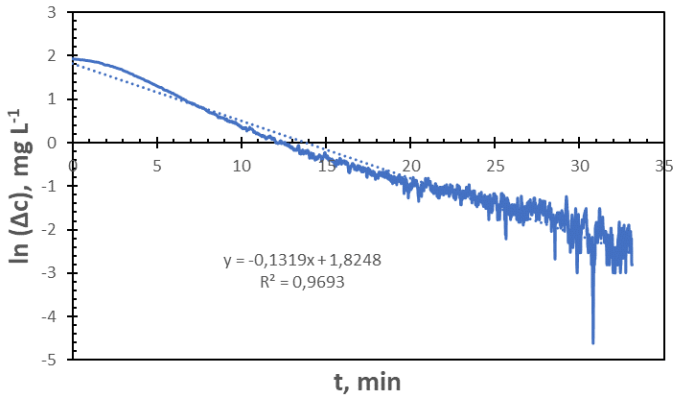
Mjerenje 3



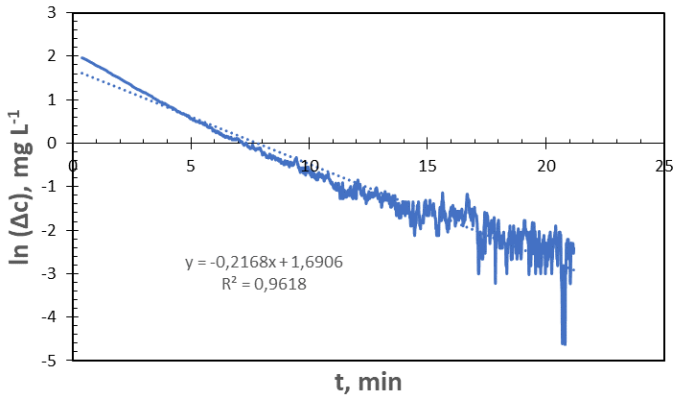
Mjerenje 4

Slika 24. Promjena koncentracije otopljenog kisika u vodi s vremenom aeracije pri uporabi TD-6KL miješala (Q_g = 200 dm^3 h^{-1}; N_{CD} = 203 okr. min^{-1}; 4 mjerenja pri istim uvjetima).

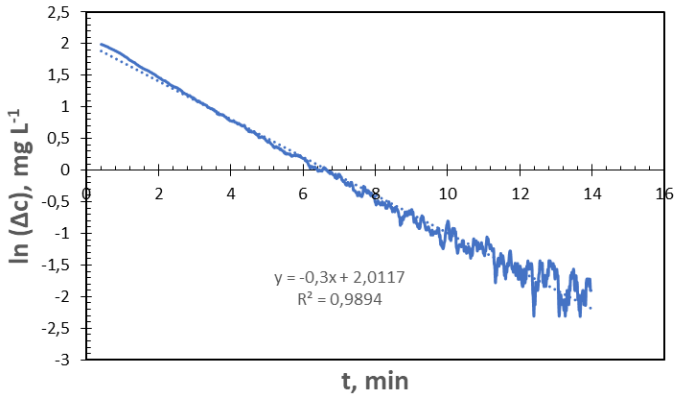
Mjerenje 1



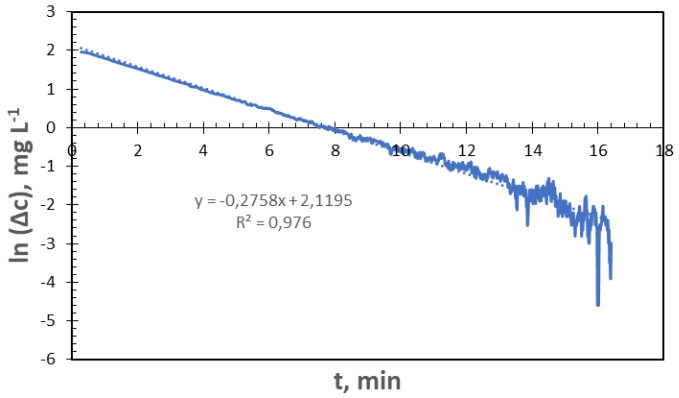
Mjerenje 2



Mjerenje 3

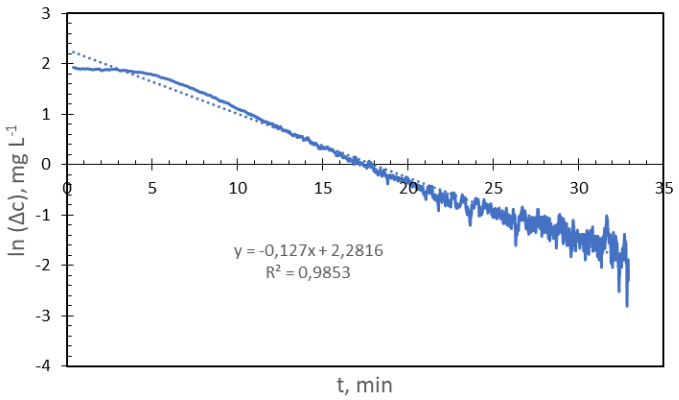


Mjerenje 4

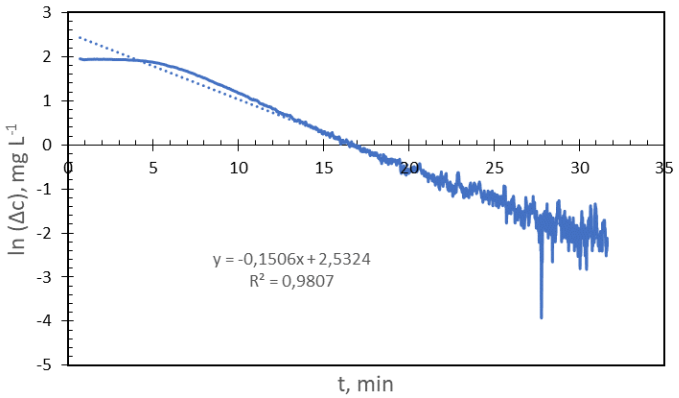


Slika 25. Logaritamska promjena koncentracije otopljenog kisika u vodi s vremenom aeracije pri uporabi TD-6RL miješala

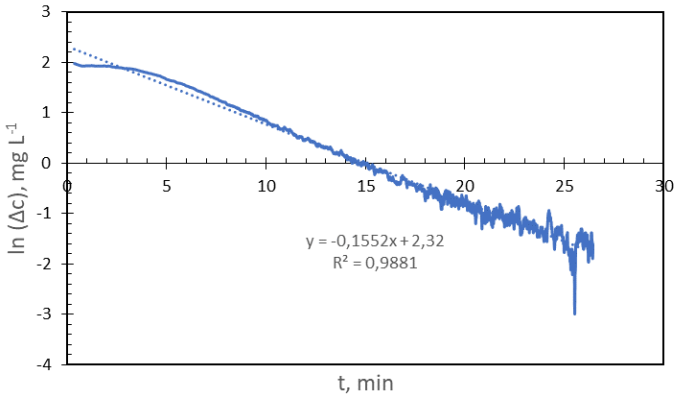
(Q_g = 200 dm^3 h^{-1}; N_{CD} = 212 okr. min^{-1}; 4 mjerenja pri istim uvjetima).



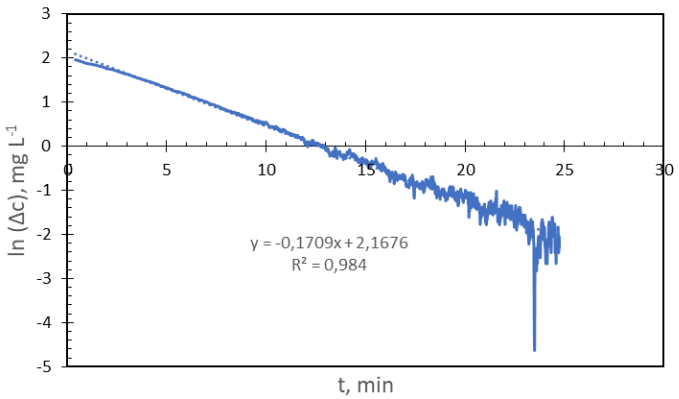
Mjerenje 1



Mjerenje 2



Mjerenje 3

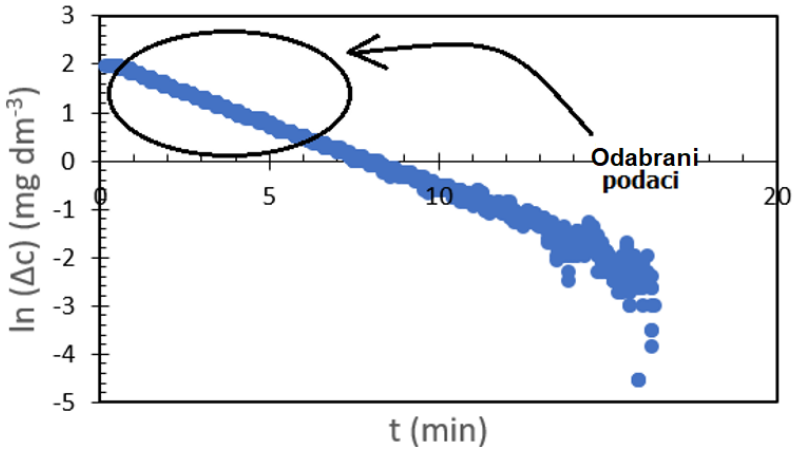


Mjerenje 4

Slika 26. Logaritamska promjena koncentracije otopljenog kisika u vodi s vremenom aeracije pri uporabi TD-6KL miješala

(Q_g = 200 dm^3 h^{-1}; N_{CD} = 203 okr. min^{-1}; 4 mjerenja pri istim uvjetima).

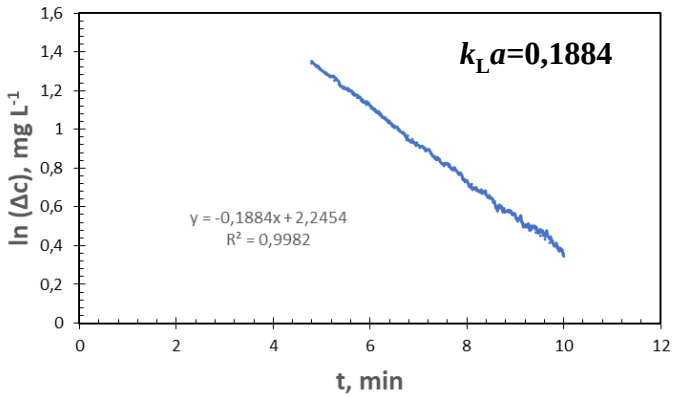
Za preciznije određivanje vrijednosti k_La, u obzir su uzete samo pozitivne vrijednosti na grafovima *ln* Δc – *t*. Razlog tome je izbjegavanje područja rasipanja podataka koji se pojavljuju pri koncentraciji zasićenja što bi znatno utjecalo na vrijednosti nagiba pravca (*slika 27*).



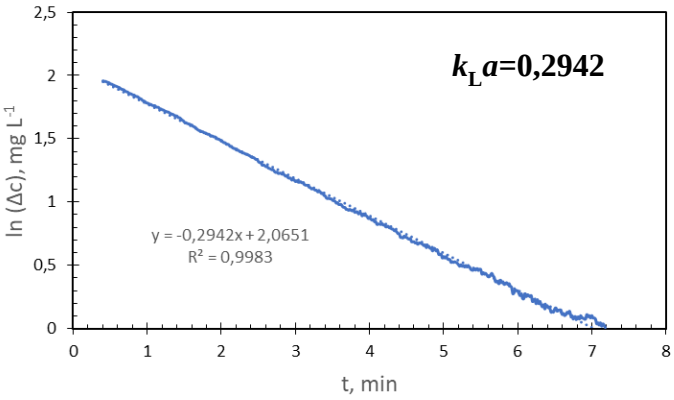
Slika 27. Primjer odabira podataka iz dijagrama ln Δc-*t*, pri određivanju vrijednosti k_La.

Na *slikama 28* i *29* prikazani su izdvojeni rezultati ln Δc-*t* za oba korištena tipa miješala i za uvjete pri kojima su eksperimenti izvođeni.

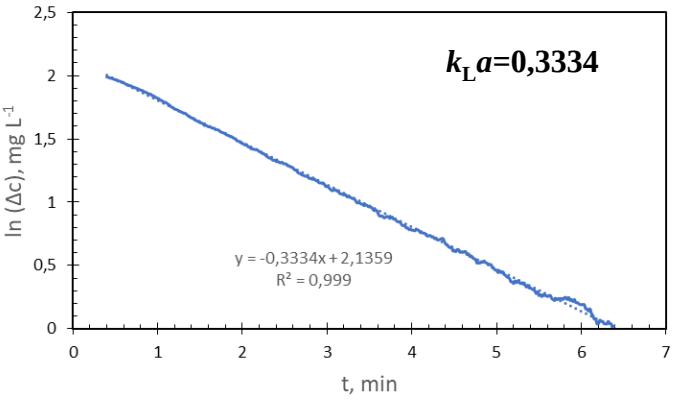
Mjerenje 1



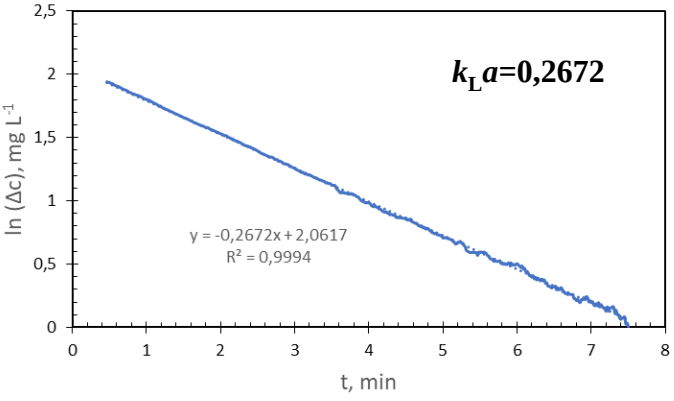
Mjerenje 2



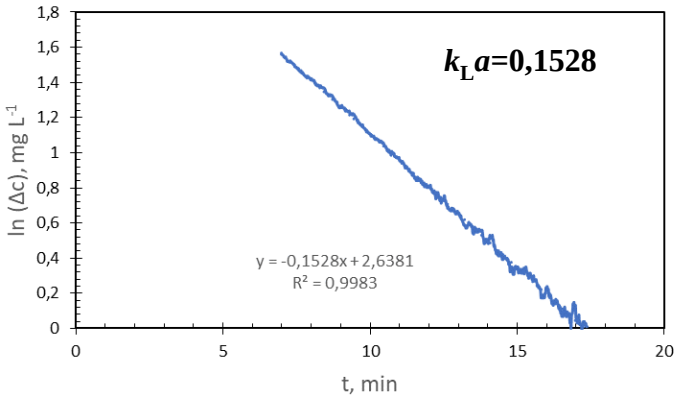
Mjerenje 3



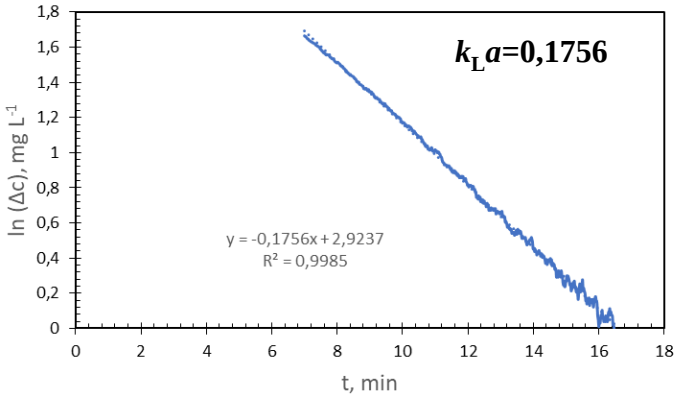
Mjerenje 4



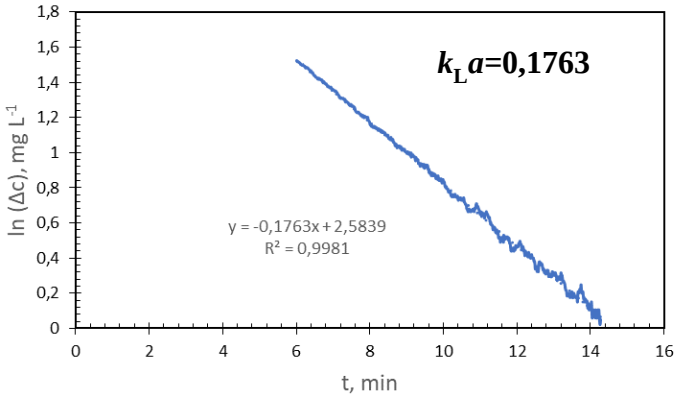
Slika 28. Određivanje vrijednosti k_La korištenjem odabranih podataka promjene koncentracije otopljenog kisika u vodi s vremenom aeracije (TD-6RL, Q_g = 200 dm^3 h^{-1}, N_{CD} = 212 okr. min^{-1}).



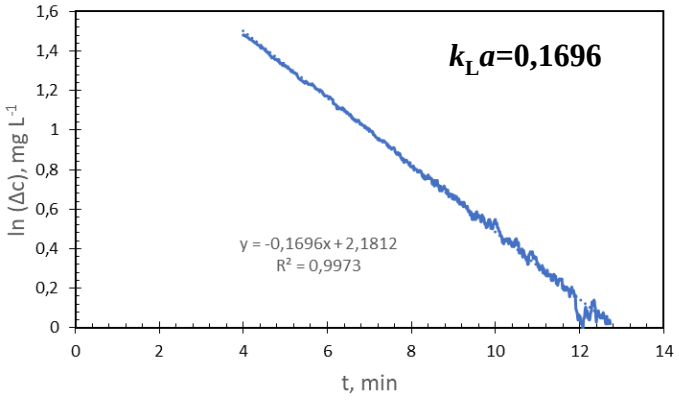
Mjerenje 1



Mjerenje 2



Mjerenje 3



Mjerenje 4

Slika 29. Određivanje vrijednosti k_La korištenjem odabranih podataka promjene koncentracije otopljenog kisika u vodi s vremenom aeracije (TD-6KL, Q_g = 200 dm^3 h^{-1}, N_{CD} = 203 okr. min^{-1}).

U *tablici 4* prikazane su vrijednosti k_La za sva provedena mjerenja. Za miješalo tipa TD-6RL srednja vrijednost k_La određena je na temelju podataka dobivenih za drugo, treće i četvrto mjerenje, dok je srednja vrijednost za miješalo tipa TD-6KL određena na temelju svih mjerenja.

Tablica 4. Eksperimentalno određene vrijednosti volumnog koeficijenta prijenosa kisika, k_La.

	Tip miješala	
Br. Mjerenja	**TD-6RL (Q_g = 200 dm^3 h^{-1}; N_{CD} = 212 okr. min^{-1}; 4 mjerenja pri istim uvjetima)**	**TD-6KL (Q_g = 200 dm^3 h^{-1}; N_{CD} = 203 okr. min^{-1}; 4 mjerenja pri istim uvjetima)**
	k_La (s^{-1})	k_La (s^{-1})
1	(0,188)	0,153
2	0,294	0,176
3	0,333	0,176
4	0,267	0,170
Srednja vrijednost	**0,298**	**0,169**

Vrijednosti brzine prolaza kisika (*dc/dt*) određene su uporabom izraza (27). U *tablici 5* prikazane su vrijednosti brzine prolaza kisika za oba korištena miješala pri stanju potpunog raspršenja plina u kapljevini i protoku zraka od 200 dm^3 h^{-1}. Za srednju vrijednost brzine prolaza kisika za miješalo tipa TD-6RL korišteni su podaci za drugo, treće i četvrto mjerenje što je obrazloženo u raspravi.

Tablica 5. Eksperimentalno određene vrijednosti brzine prolaza kisika, *dc/dt*.

	Tip miješala	
Br. mjerenja	**TD-6RL (Q_g = 200 dm^3 h^{-1}; N_{CD} = 212 okr. min^{-1})**	**TD-6KL (Q_g = 200 dm^3 h^{-1}; N_{CD} = 203 okr. min^{-1})**
	***dc/dt* (mg s^{-1} dm^{-3})**	***dc/dt* (mg s^{-1} dm^{-3})**
1	(1,279)	1,040
2	1,995	1,183
3	2,338	1,199
4	1,818	1,151
Srednja vrijednost	**2,048**	**1,159**

4. RASPRAVA

Raspršenje, odnosno disperzija plina u kapljevini se odvija u dvofaznom sustavu gdje se plinovita faza raspršuje unutar kapljevite faze. Procesi i operacije poput hidriranja, halogeniranja, oksidacije te mnoge fermentacije nezamislive su bez raspršenja. Da bi raspršenost plina u kapljevini bila što učinkovitija cilj je postići što kvalitetniju izmiješanost sustava plin/kapljevina. Ova vrsta miješanja je posebno bitna pri aeraciji otpadnih voda koje nastaju pri provedbi većine tehnoloških procesa. Aeracija je operacija kojom se plinovita faza, obično zrak ili kisik, dovodi u kontakt s vodom preko odgovarajućeg sustava raspršivanja. Cilj ove operacije je obogatiti vodu kisikom kako bi postupak njenog pročišćavanja bio što učinkovitiji. Aeracija se provodi pri obradi otpadnih voda, ali i pri obradi prirodnih voda za pripremu vode za ljudsku potrošnju. U praksi, plinsko-kapljevinski reaktori u kojima je raspršenje plina u kapljevini glavni zadatak, često su opremljeni mehaničkom miješalicom. Korištenje mehaničke miješalice povećava kontaktno vrijeme i međufaznu površinu između plinske i kapljevinske faze te je u takvom sustavu važno obratiti pozornost na hidrodinamiku, utrošak snage potreban za miješanje sustava, volumni udio plinske faze u sustavu te brzinu prijenosa tvari. Upravo su navedeni parametri predmet istraživanja ovoga rada.

U ovom radu su eksperimenti provedeni u miješalici volumena 10,85 dm^3. Korištena su dva tipa miješala: turbinsko miješalo s diskom i šest ravnih lopatica (TD-6RL) te turbinsko miješalo s diskom i šest konkavnih lopatica (TD-6KL). Oba miješala imaju disk čiji je cilj usmjeriti plin u prostor između lopatica radi što učinkovitijeg raspršenja plina u kapljevini. Lopatice miješala razbijaju velike mjehure plina u sitne mjehuriće što za rezultat ima povećanje međufazne površine. Također, oba miješala uzrokuju radijalan tok kapljevine. Korištena miješala TD-6RL i TD-6KL bila su postavljena iznad aeratora, a njihov promjer iznosio je 0,10 m, što je približno 1/3 d_T. Iskustveno se pokazalo da taj omjer promjera posude i miješala daje najveću učinkovitost. Prstenasti aerator za dovod zraka je bio postavljen 2 cm iznad dna posude, što je jednako 1/12 *H*. Iako se pokazalo da za maksimalnu učinkovitost aerator treba postaviti na 1/6 *H,* u ovome slučaju to nije bilo moguće izvesti zbog konstrukcijskih ograničenja. Cilj rada bio je ispitati kako dva različita tipa turbinskih miješala utječu na učinkovitost raspršenja zraka u vodi.

Kako bi se na to pitanje odgovorilo bilo je potrebno odrediti brzine vrtnje miješala (N) pri kojima se javljaju dvije krajnje vrste tokova i to: režim potapanja miješala te režim potpunog raspršenja plina u kapljevini. Za te dvije vrste tokova određene su aeracijska (N_A) i Froudeova (Fr) značajka. Na temelju zakretnog momenta određen je relativni utrošak snage miješanja (P_g/P_0) pri različitim brzinama vrtnje miješala. Relativni utrošak snage je jedan od osnovnih energetskih pokazatelja uspješnosti provođenja operacije miješanja te je vrlo bitan pri konstrukciji i izboru uređaja za miješanje. Naime, relativno velike količine električne energije se troše na pokretanje miješala što se direktno odražava na konačnu cijenu procesa. Na kraju je određen i volumni koeficijent brzine prolaza kisika (k_La) te brzina prolaza kisika (dc/dt) s ciljem utvrđivanja kod kojeg od korištenih miješala se ostvaruju povoljniji uvjeti za intenzivniji prijenos tvari, u ovom slučaju kisika, iz zraka u vodu.

Postupak vizualnog određivanje režima raspršenja plina u kapljevini pri različitim brzinama vrtnje miješala i konstantnom protoku od 200 $dm^3\ h^{-1}$, opisan je u *poglavlju 2.1.2.1.* S ciljem određivanja vrijednosti aeracijske i Froudeove značajke, bilo je potrebno mjeriti brzine vrtnje miješala za različite režime raspršenja, odnosno odrediti minimalnu brzinu vrtnje miješala (N_{CD}) pri kojoj se javlja režim raspršenja plina u kapljevini te maksimalnu brzinu vrtnje miješala (N_F) pri kojoj dolazi do režima potapanja miješala kako je prikazano na *slici 8*. Navedene brzine vrtnje miješala su prikazane u *tablici 2*. Ukoliko se usporede podatci dobiveni za oba tipa miješala, vidljivo je da se režim potpunog raspršenja plina u kapljevini postiže pri nižim brzinama vrtnje miješala za turbinsko miješalo s diskom i konkavnim lopaticama (TD-6KL) nego za turbinsko miješalo s diskom i ravnim lopaticama (TD-6RL).

Za oba tipa miješala su potom, pri režimima potpunog raspršenja i potapanja miješala određene aeracijska i Froudeova značajka korištenjem izraza (10) i (11). Rezultati su prikazani u *tablici 3*.

Aeracijska značajka (N_A), predstavlja odnos volumnog protoka plina i dobave miješala. Iz *tablice 3* vidljivo je da miješalo tipa TD-6KL ima veće vrijednosti aeracijske značajke od miješala tipa TD-6RL. S obzirom na to da su oba tipa miješala bila jednakog promjera te da su se ispitivanja provodila pri konstantnom volumnom protoku plina, vrijednosti aeracijske značajke ovisile su isključivo o brzini vrtnje miješala potrebnoj za

ostvarivanje stanja potpunog raspršenja. Kako je ta brzina za TD-6RL miješalo bila viša, vrijednost aeracijske značajke je posljedično bila niža.

Eksperimentalno određene aeracijske značajke su uspoređene s teorijskim vrijednostima koje su izračunate za oba tipa miješala pri režimima potpunog raspršenja i potapanja miješala korištenjem izraza (24) i (25). Rezultati su prikazani u *tablici 3*. Vidljivo je kako navedene vrijednosti ne odstupaju značajno jedne od drugih za oba korištena miješala i oba režima u sustavu.

Druga bezdimenzijska značajka koja je određena u radu je Froudeova značajka čije vrijednosti govore odnosu sile inercije i sile gravitacije. U *tablici 3* je vidljivo da su za oba režima, vrijednosti *Fr* manje pri korištenju miješala tipa TD-6KL. Froudeova značajka se može smatrati mjerom otpora kojeg gravitacija pruža raspršenju plina u kapljevini pri određenim uvjetima provedbe raspršenja. S obzirom na navedeno, pri režimu potpunog raspršenja gravitacija ima manji utjecaj na raspršenje plina kada se koristi miješalo s diskom i ravnim lopaticama, jer je vrijednost *Fr* veća, nego kod miješala s diskom i konkavnim lopaticama.

U drugom dijelu rada bilo je potrebno odrediti *relativni utrošak snage pri različitim režimima raspršenja* na temelju mjerenja zakretnog momenta, postupkom koji je opisan u *poglavlju 2.1.2.2.* Ovisnost relativnog utroška snage miješanja (P_g/P_0) o aeracijskoj značajci (N_A) prikazana je grafički na *slikama 21* i *22*. Svaka pojedina krivulja predstavlja eksperimentalne podatke za dano miješalo pri konstantnom protoku plina, tj. za svaku krivulju, vrijednost N_A se mijenja samo zbog promjene brzine vrtnje miješala. Iz navedenih prikaza je vidljivo da je utrošak snage pri manjim brzinama vrtnje za aerirani sustav gotovo jednak utrošku neaeriranog sustava, zbog čega je relativni utrošak snage neovisan o vrijednosti N_A sve dok se ne postigne „kritična“ vrijednost aeracijske značajke nakon koje on pada. Na sličan način je relativni utrošak snage u ovisnosti o aeracijskoj značajci određivan u radovima Warmoeskerken et al. za miješalo tipa TD-6RL.[12,16,17] U navedenim radovima je do vidljivog pada relativnog utroška snage došlo pri većim vrijednostima aeracijske značajke od onih koje su prikazane u ovome radu, odnosno pri većim volumnim protocima plina. Dakle, budući da se radi o relativno niskom protoku zraka, promjene zakretnog momenta s i bez zraka su relativno male te je očigledno potrebna veća osjetljivost uređaja da bi se vidjela razlika. Također, za daljnja ispitivanja

potrebno bi bilo osigurati veće protoke zraka, kako bi razlika utrošene snage aeriranog i neaeriranog sustava bila značajnija.

Vidljivo je da se pad relativnog utroška snage javlja s povećanjem brzine vrtnje miješala. Razlog tome je nastanak zračnih šupljina iza lopatica miješala. Naime, dovedeni zrak utječe na hidrodinamičko ponašanje kapljevine oko lopatica i diska miješala što se odražava i na utrošenu snagu miješanja. Iza lopatica miješala nastaju šupljine ispunjene zrakom uzrokujući smanjenje sile otpora gibanju miješala, uslijed čega dolazi do pada snage utrošene za pogon miješala. U sustavu s miješalom tipa TD-6RL do pada relativnog utroška snage dolazi pri većoj vrijednosti aeracijske značajke nego kod miješala tipa TD-6KL, iz čega se može zaključiti kako se manje snage troši korištenjem miješala tipa TD-6KL.

Postupak *određivanja brzine prolaza kisika iz zraka u vodu* pri režimu potpunog raspršenja plina u kapljevini opisan je u *poglavlju 2.1.2.3*. Na *slikama 23* i *24* prikazane su promjene koncentracije otopljenog kisika u vodi s vremenom aeracije pri uporabi obaju tipova miješala. Na *slici 23* za miješalo tipa TD-6RL, podaci za *mjerenje 1* su odbačeni zbog odstupanja u daljnjem proračunu. Ukoliko se promotre dobivene ovisnosti, vidljivo je da je ovisnost koncentracije otopljenog kisika o vremenu logaritamska. Koncentracija na početku naglo raste i s vremenom aeriranja brzina rasta opada sve dok se ne postigne koncentracija zasićenja pri kojoj je koncentracija otopljenog kisika u kapljevini izjednačena s koncentracijom kisika u zraku koji se upuhuje. Za miješalo tipa TD-6KL, gdje su grafovi promjene koncentracije otopljenog kisika u vodi s vremenom aeriranja za sva mjerenja prikazani na *slici 24*, vidljivo je da na početku mjerenja nema promjene koncentracije otopljenog kisika. Mogući razlog tome je u nastanku kavitacijskih struktura. Tijekom ovog dijela eksperimenta vizualno je primijećeno kako se oko lopatica konkavnog miješala zadržavaju zračne strukture (pretpostavka da su kavitacijske strukture) koje mogu utjecati na prolaz kisika, a kako bi se ovo potvrdilo, potrebno je provesti dodatna istraživanja.

Na kraju je iz podataka o promjeni koncentracije u ovisnosti o vremenu aeriranja, bilo potrebno odrediti volumni koeficijent brzine prijenosa kisika (k_La) te brzinu prolaza kisika (dc/dt) koji su glavni pokazatelji uspješnosti procesa. Volumni koeficijent brzine prijenosa kisika i brzina prolaza kisika određeni su postupkom opisanim u *poglavlju 2.1.2.3.*, a rezultati su prikazani na *slikama 28* i *29* te u *tablicama 4 i 5*.

Vrijednosti za *mjerenje 1* za tip miješala TD-6RL su odbačene zbog znatnog odstupanja kako je i ranije navedeno. Kako bi se precizno odredio k_La, zanemaren je drugi dio *ln* $\Delta c - t$ krivulje zbog rasipanja podataka do kojeg dolazi kada se koncentracija kisika u vodi približi koncentraciji zasićenja. Iz vrijednosti volumnog koeficijenta navedenog u *tablici 4* vidljivo je da je za tip miješala TD-6RL vrijednost k_La veća nego za tip miješala TD-6KL. Veće vrijednosti k_La ukazuju na brži prolaz kisika iz zraka u vodu. Iz dobivenih podataka za k_La, izračunate su brzine prolaza kisika za svako miješalo, a podatci su navedeni u *tablici 5.* Iz tablice je vidljivo da je brzina prolaza kisika za miješalo tipa TD-6RL veća od brzine prolaza za miješalo tipa TD-6KL iz čega se može zaključiti da je prijenos tvari intenzivniji za miješalo s diskom i ravnim lopaticama (TD-6RL). No, kako bi se stekao uvid u učinkovitost pojedinog miješala, potrebno je osim podataka o brzini prolaza kisika istovremeno sagledati i podatke o utrošku snage, prikazane u *tablici 6.*

Tablica 6. Usporedba eksperimentalnih vrijednosti ispitivanih parametara za oba korištena tipa miješala.

Tip miješala	k_La	dc/dt	P_g
	s^{-1}	mg s^{-1} dm^{-3}	W
TD-6RL	0,298	2,050	1,790
TD-6KL	0,168	1,104	1,180

Iz tablice je vidljivo da su volumni koeficijenti prolaza kisika, ali i brzine prolaza gotovo dvostruko veći pri korištenju miješala s diskom i ravnim lopaticama, ali uz veći utrošak snage. Utrošak snage je direktno vezan uz stanje potpunog raspršenja koje se za miješalo s diskom i ravnim lopaticama postiže pri nešto višim brzinama vrtnje u odnosu na miješalo s diskom i konkavnim lopaticama.

Prema tome može se zaključiti da je miješalo s diskom i ravnim lopaticama (TD-6RL) prikladnije za provedbu onih procesa u kojima je prioritet ostvarenje većih brzina prolaza kisika, neovisno o utrošku snage. No, ako je ušteda energije prioritet, onda je miješalo tipa TD-6KL pogodnije za uporabu pri procesu raspršenja uz ostvarenje zadovoljavajućih vrijednosti brzina prolaza kisika. Treba naglasiti da se ovi podatci odnose na proces prolaza kisika iz zraka u vodovodnu vodu kada je protok zraka konstantan i iznosi 200 dm^3 h^{-1}. Poželjno bi bilo da se u daljnjem istraživanju ispitaju i drugi protoci zraka, kako bi se vidjelo kako protok utječe na ispitivane parametre.

5. ZAKLJUČAK

Na osnovu eksperimentalnih rezultata dobivenih pri ispitivanju utjecaja tipa miješala na raspršenja plina u kapljevini mogu se izvesti sljedeći zaključci:

- U prvom dijelu eksperimenta određeno je da se pri konstantnom protoku plina od 200 dm^3 h^{-1} režim potpunog raspršenja plina u kapljevini postiže pri nižim brzinama vrtnje miješala za turbinsko miješalo s diskom i konkavnim lopaticama (TD-6KL) nego za turbinsko miješalo s diskom i ravnim lopaticama (TD-6RL). Pri tom režimu je vrijednost aeracijske značajke (N_A) bila veća za turbinsko miješalo s diskom i konkavnim lopaticama (TD-6KL), nego za turbinsko miješalo s diskom i ravnim lopaticama (TD-6RL). Također, vrijednost Froudeove značajke (Fr) za isto miješalo je bila manja nego za miješalo s diskom i ravnim lopaticama. Usporedbom eksperimentalno određenih aeracijskih značajki s teorijskim vrijednostima vidljiva su zanemariva odstupanja.

- Na temelju prikazanih ovisnost relativnog utroška snage miješanja (P_g/P_0) o aeracijskoj značajci (N_A) za oba tipa miješala, može se zaključiti kako je relativni utrošak snage neovisan o vrijednosti N_A sve dok se ne postigne „kritična“ vrijednost aeracijske značajke nakon koje on pada. U sustavu s miješalom tipa TD-6RL do pada relativnog utroška snage dolazi pri većoj vrijednosti aeracijske značajke nego kod miješala tipa TD-6KL, iz čega se može zaključiti kako se manje snage troši korištenjem miješala tipa TD-6KL te se isto, s energetske strane, može smatrati učinkovitijim.

- Podatci o promjeni koncentracije otopljenog kisika u vodi s vremenom aeracije ukazuju na to da se koncentracija zasićenja kapljevine kisikom ranije postiže za tip miješala s diskom i ravnim lopaticama. Za isti tip miješala je volumni koeficijent prijenosa kisika gotovo dvostruko veći te se očigledno prolaz kisika brže odvija u sustavu s miješalom s diskom i ravnim lopaticama.

- Na temelju vrijednosti određenih parametara vidljivo je da se korištenjem miješala s diskom i konkavnim lopaticama, pri istom režimu raspršenja plina, ostvaruju niže vrijednosti brzine prolaza kisika, ali i utroška snage. No, u slučajevima u kojima je prioritet ostvarenje većih brzina prolaza kisika bez obzira na utrošak snage, može se zaključiti kako je miješalo s diskom i ravnim lopaticama prikladniji izbor.

6. LITERATURA

[1] G. Matijašić, *Jedinične operacije u ekoinženjerstvu, (skripta) – 2.dio*, Fakultet kemijskog inženjerstva i tehnologije u Zagrebu, 2016, str. 70-91.

[2] J. C. Middleton, J. M. Smith, *Gas-Liquid Mixing in Turbulent Systems*, Handbook of Industrial Mixing (science and practice) – chapter 11, Wiley-Interscience, Canada, 2004, str. 558-638.

[3] A. Bakker, K. J. Myers, J. M. Smith, *How to Disperse Gases in Liquids*, Chemical Engineering, USA, 1994.

[4] M. Hraste, *Mehaničko procesno inženjerstvo*, Hinus, Zagreb, 2003, str 120-134.

[5]J. J. Ulbrecht, G. K. Šatterson, *Mixing of Liquids by Mechanical Agitation*, Gordon and Breach Science Publishers, New York, 1985, str. 1-59.

[6] S. Nagata, *Mixing – Principles and Applications*, Kodansha LTD and John Wiley & Sons, Tokyo i New York, 1975, str. 297-331.

[7] F. A. Holland, F. S. Chapman, *Liquid Mixing and Processing*, Reinhold Publishing Comp., New York, 1966, str. 1-38.

[8] https://www.researchgate.net/figure/Power-number-for-different-impellers-Reynolds-number-From-Bates-et-al-1963-Np_fig3_327438976 (28. 11. 2020.)

[9] N. Kuzmanić, M. Kliškić, M. Akrap, *Procesno inženjerstvo u zaštiti okoliša*, Priručnik za predavanje (za internu uporabu), Kemijsko-tehnološki fakultet u Splitu, Split, 2019.

[10] N. Harnby, M. F. Edwaeds, A. W. Nienow, *Mixing in the Process Industries*, 2nd ed., Butterworth-Heinemann, Oxford, 1992, str. 332-363.

[11] W. L. McCabe, J. C. Smith, P. Harriott, *Unit Operations in Chemical Engineering*, 5th ed., McGraw-Hill, Inc., New York, 1993.

[12] M. M. C. G. Warmoeskerken, *Gas-Liquid Dispersing Characteristics of Turbine Agitators*, doktorska disertacija, Applied Sciences, 1986, str. 21-39.

[13] A. Glasnović, A. Sander, *Prijenos tvari i energije*, Fakultet kemijskog inženjerstva i tehnologije, Zagreb, 2008.

[14] N. Kuzmanić, *Prijenos tvari i energije*, Priručnik za predavanje (za internu uporabu), Kemijsko-tehnološki fakultet u Splitu, Split, 2019.

[15] R. B. Brid, W. E. Stewart, E. N. Lightfoot, *Transport phenomena*, 2nd ed., John Wiley & Sons, Inc., New York, 2002.

[16] M. M. C. G. Warmoeskerken, J. M. Smith, M. Konno, *On the flooding/loading transition and the complete dispersal condition in aerated vessels agitated by a Rushton-turbine,* Mixing, Proc. 5th European Conference on Mixing, 1985, str. 143–154.

[17] M. M. C. G. Warmoeskerken, J. Feijen, J. M. Smith, *Hydrodynamics and power consumption in stirred gas–liquid dispersions*, Fluid Mixing, IChemE Symposium Series, No. 64, 1981, str. J1–J14.