

# Hidrodinamički kavitacijski reaktori - koncept, analiza hidrodinamičkih uvjeta i primjena

---

Škof, Marija

Master's thesis / Diplomski rad

2020

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Zagreb, Faculty of Food Technology and Biotechnology / Sveučilište u Zagrebu, Prehrambeno-biotehnološki fakultet**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:159:013237>

Rights / Prava: [Attribution-NoDerivatives 4.0 International/Imenovanje-Bez prerada 4.0 međunarodna](#)

Download date / Datum preuzimanja: **2024-07-29**



Repository / Repozitorij:

[Repository of the Faculty of Food Technology and Biotechnology](#)



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
PREHRAMBENO-BIOTEHNOLOŠKI FAKULTET

# DIPLOMSKI RAD

Zagreb, studeni 2020.

Marija Škof

1269/BPI

**HIDRODINAMIČKI  
KAVITACIJSKI REAKTORI –  
KONCEPT, ANALIZA  
HIDRODINAMIČKIH UVJETA I  
PRIMJENA**

Rad je izrađen u Kabinetu za osnove inženjerstva na Zavodu za procesno inženjerstvo Prehrambeno-biotehnološkog fakulteta Sveučilišta u Zagrebu pod mentorstvom izv.prof.dr.sc. Mirjane Čurlin.

Zahvaljujem mentorici izv.prof.dr.sc. Mirjani Čurlin na vremenu, znanju, podršci i toplim savjetima tijekom izrade diplomskog rada.

Veliko hvala dragoj Mariji na zajedničkom učenju, zabavljanju i smijehu jer bez nje moji studentski dani ne bi bili isti, a isto tako zahvaljujem svim mojim prijateljima na druženju i strpljenju.

Najveće hvala mojoj obitelji jer su oni uvijek tu kada je najteže. Hvala na podršci, ljubavi, ohrabrenju i vjeri u mene.

Hvala Tomi na pomoći, strpljenju, pažnji i što je vjerovao u mene.

## TEMELJNA DOKUMENTACIJSKA KARTICA

Diplomski rad

Sveučilište u Zagrebu  
Prehrambeno-biotehnološki fakultet  
Zavod za procesno inženjerstvo  
Kabinet za osnove inženjerstva

Znanstveno područje: Biotehničke znanosti  
Znanstveno polje: Biotehnologija

### HIDRODINAMIČKI KAVITACIJSKI REAKTORI – KONCEPT, ANALIZA HIDRODINAMIČKIH UVJETA I PRIMJENA

*Marija Škof, 1269/BPI*

**Sažetak:** *Hidrodinamička kavitacija je proces proizvodnje, rasta i implozije kavitacijskih mjehurića. Kavitacijom se generiraju velike količine energije sadržane u obliku visokih lokalnih temperatura i tlakova, stoga je primjenjiva u sklopu intenzifikacije procesa. Reakcije koje iziskuju ekstremne uvjete mogu se provoditi zahvaljujući učinku kavitacije unutar reaktora. Najčešće izvedbe reaktora vezane su uz kavitacijsku prigušnicu, za koju analiza hidrodinamičkih uvjeta daje najbolje rezultate. Cilj ovog rada je teorijski predstaviti tehnologiju, sukladno tome objasniti sam proces kavitacije, izvedbu reaktora, analizu hidrodinamičkih uvjeta te primjenu hidrodinamičkih kavitacijskih reaktora. Ova tehnologija ima veliku mogućnost primjene u tehnološkim procesima i ekoinženjerstvu, ali je još uvijek u istraživačkoj fazi. Glavni nedostatak hidrodinamičkih kavitacijskih reaktora je erozija, koja uništava površinu opreme.*

**Ključne riječi:** *kavitacija, hidrodinamička kavitacija, hidrodinamički kavitacijski reaktori, kavitacijska prigušnica i kavitacijski mjehurić*

**Rad sadrži:** 46 stranica, 21 slika i 67 literaturnih navoda

**Jezik izvornika:** hrvatski

**Rad je u tiskanom i elektroničkom (pdf format) obliku pohranjen u:** Knjižnica Prehrambeno-biotehnološkog fakulteta, Kačićeva 23, Zagreb

**Mentor:** *izv.prof.dr.sc. Mirjane Čurlin*

**Stručno povjerenstvo za ocjenu i obranu:**

- 1. Prof.dr.sc.Damir Stanzer*
- 2. Izv.prof.dr.sc.Mirjana Čurlin*
- 3. Prof.dr.sc.Jasna Mrvčić*
- 4. Prof.dr.sc.Tibela Landeka Dragičević (zamjena)*

**Datum obrane:** 20. studeni 2020.

## BASIC DOCUMENTATION CARD

University of Zagreb  
Faculty of Food Technology and Biotechnology  
Department of Process Engineering  
Section for Fundamental Engineering

Graduate Thesis

**Scientific area:** Biotechnical Sciences

**Scientific field:** Biotechnology

### CONCEPT, ANALYSIS OF HYDRODYNAMIC CONDITIONS AND APPLICATIONS OF HYDRODYNAMIC CAVITATION REACTORS

*Marija Škof, 1269/BPI*

**Abstract:** *Hydrodynamic cavitation is a process that consist of production, growth, and implosion of cavities. Cavitation produces large amounts of energy in the form of high local temperatures and pressures, thus it can be used in the process of intensification. Chemical reactions that require extreme conditions can be carried out due to the cavitation effect taking place inside the reactor. Most commonly found form of reactor is a reactor with orifice plate for which the analysis of hydrodynamic conditions gives the best results. The aim of this paper is to give theoretical background of cavitation reactor technology, explain the cavitation process, explain the different forms of cavitation reactors, analyse hydrodynamic conditions and explain different applications of hydrodynamic cavitation reactors. This technology has a lot of potential for application in technological processes and environmental engineering, but it is still in experimental phase. The main flaw of hydrodynamic cavitation reactors is erosion, which destroys the surface of equipment.*

**Keywords:** *cavitation, hydrodynamic cavitation, hydrodynamic cavitation reactors, orifice plate and cavities*

**Thesis contains:** 46 pages, 21 figures and 67 references

**Original in:** Croatian

**Graduate Thesis in printed and electronic (pdf format) version is deposited in:** Library of the Faculty of Food Technology and Biotechnology, Kačićeva 23, Zagreb.

**Mentor:** *PhD. Mirjana Čurlin*, Associate professor

**Reviewers:**

1. PhD. *Damir Stanzer*, Full professor
2. PhD. *Mirjana Čurlin*, Associate professor
3. PhD. *Jasna Mrvčić*, Full professor
4. PhD. *Tibela Landeka Dragičević*, Full professor

**Thesis defended:** 20 November 2020

<b>Sadržaj</b>	<b>stranice</b>
<b>1. UVOD .....</b>	<b>1</b>
<b>2. TEORIJSKI DIO.....</b>	<b>3</b>
2.1. KONCEPT HIDRODINAMIČKE KAVITACIJE .....	3
2.1.1. Hidrodinamička kavitacija.....	4
2.1.2. Vrste hidrodinamičke kavitacije .....	11
2.2. PARAMETRI I ZNAČAJKE HIDRODINAMIČKE KAVITACIJE.....	12
2.2.1. Weissler – ova reakcija.....	13
2.2.2. Parametri hidrodinamičke kavitacije .....	13
2.2.3. Značajke hidrodinamičke kavitacije .....	16
2.3. IZVEDBA HIDRODINAMIČKIH REAKTORA.....	18
2.3.1. LWR (Liquid Whistle Reactor) .....	18
2.3.2. Visokotlačni homogenizator .....	19
2.3.3. Kinetički homogenizator .....	20
2.3.4. Reaktor s kavitacijskom prigušnicom.....	21
2.3.5. Mikrofluidizator.....	23
2.4. ANALIZA HIDRODINAMIČKIH KAVITACIJSKIH SUSTAVA.....	24
2.4.1. Matematički modeli dinamike hidrodinamičkih kavitacijskih sustava .....	24
2.5. PRIMJENA HIDRODINAMIČKIH REAKTORA.....	29
2.5.1. Primjena hidrodinamičke kavitacije u tehnološkim procesima .....	29
2.5.2. Primjena hidrodinamičke kavitacije u ekoinženjerstvu .....	31
<b>3. ZAKLJUČAK.....</b>	<b>40</b>
<b>4. LITERATURA .....</b>	<b>41</b>



# 1. UVOD

Razvojem čovječanstva dolazi do sve veće potrebe za otkrivanjem novih tehnologija, koje će pospješiti sadašnje procese i uštedjeti energiju. Ušteda energije ili korištenje obnovljivih izvora energije težnja je današnjice. Također, glavni zahtjev svakog procesa je očuvanje okoliša, kako bi generacije poslije nas mogle nesmetano živjeti i uživati Zemlju (Stankiewicz i Mouljin, 2000).

Hidrodinamička kavitacija kao jedna od novih tehnologija pojavljuje se u tekućinama koje struje velikim brzinama. Tekućina koja struji u cijevi dolazi do dijela gdje je cijev smanjenog promjera, do tzv. suženja. Tok tekućine se ubrzava, kako bi sveukupan tlak ostao konstantan. Upravo na tom mjestu nastaje kavitacija u obliku kavitacijskih mjehurića. Kavitacija je zanimljiva zbog procesa raspršenja mjehurića, prilikom čega nastaje velika količina energije u obliku visokih tlakova i temperature. Energija može služiti za provođenje kemijskih reakcija, reakcija emulgiranja, biokemijskih reakcija, ili za zagrijavanje sustava. Za provođenje kemijskih i biokemijskih reakcija zaslužni su  $\text{OH}^-$  radikali, generirani prilikom raspršenja mjehurića. Emulgiranje provode mikromlazovi, dok se sustav zagrijava oslobađanjem topline (Gogate i sur., 2001a).

Teorijski opis kavitacije prvi je korak prilikom konstrukcije reaktora. Važno je biti upućen u sve moguće događaje za vrijeme procesa (erozija, superkavitacija, itd.), kako bi se negativni događaji mogli ukloniti. Također, iz literaturnih radova može se odabrati vrsta reaktora pogodna za željeni proces. Nakon teorijskog saznanja slijedi konstrukcija matematičkog modela koji najbolje odgovara odabranom reaktoru. Matematički model sadrži varijable, a to su parametri kavitacije (ulazni tlak, fizikalno-kemijska svojstva fluida, početni polumjer mjehurića). Svaki matematički model sadrži pojednostavljenja, koja više ili manje odstupaju od realnog sustava. Najkompliciraniji i najtočniji model jest matematički model hidrodinamičke kavitacije u kavitacijskoj prigušnici pomoću određivanja kinetike kemijske reakcije. On u svom izračunu uzima u obzir kinetiku kemijske reakcije koja se želi provesti i njoj pridružuje parametre koji se trebaju postaviti (Mustapić, 2012).

Od četiri vrste kavitacije, akustična i hidrodinamička jedine se istražuju. Razlog tome je njihova moguća primjena u industriji. Kavitacija je puno bolja od konvencionalnih metoda jer proizvodi puno više energije, a njezin rasap je manji, odnosno manji je gubitak energije kroz prijenos od električne do kemijske energije. Danas je povećana osviještenost ljudi o uštedi energije i intenzifikaciji procesa, stoga bi to mogao biti presudan faktor za uvođenje kavitacije

u industriju (Stankiewicz i Mouljin, 2000). Ako se uspoređuje akustična i hidrodinamička kavitacija, prednost akustične je u proizvodnji jačeg učinka kavitacije, dok hidrodinamički kavitacijski reaktori imaju procese kavitacije unutar cijelog volumena (Gogate i sur., 2001a).

U ovom radu naglasak je na hidrodinamičkom kavitacijskom reaktoru, konceptu, izvedbi i analizi hidrodinamičkih uvjeta i primjeni. Mogu se koristiti za pročišćavanje otpadnih voda, za degradaciju mikroorganizama, mogu biti uklopljeni unutar nekog tehnološkog procesa ili se mogu koristiti za čišćenje okoliša od zagađivača. Međutim, ovi reaktori imaju manu koja se ne može otkloniti, a to je erozija materijala. Naime, mikromlazovi, koji nastaju urušavanjem mjehurića, pogađaju i stjenku opreme i uzrokuju njezino odlamanje. Ovaj utjecaj kavitacije prvi put je otkriven na propelerima brodova (Ozonek, 2012).

## 2. TEORIJSKI DIO

### 2.1. KONCEPT HIDRODINAMIČKE KAVITACIJE

Kavitacija je proces nastanka, rasta (ekspanzije) i implozije (urušavanja) mjehurića u tekućini (Crnić, 2015). Jedan mjehurić prođe ova tri stadija kavitacije u jednom trenutku, odnosno  $10^{-6}$  sekunde (Mustapić, 2012). Zadnji proces u sklopu kavitacije, implozija, uzrokuje lokalno povišenje temperature i tlaka koji mogu doseći vrijednosti i do 5000 °C i 1000 bara. Uz povišenje temperature i tlaka dolazi i do nastanka mikromlazova koji se gibaju kroz fluid i to brzinom 100 m/s (Crnić, 2015). Zaustavljaju se tek kad udare u kruto tijelo pa ga razaraju (erozija), ili udaraju u drugi mjehurić uzrokujući njegovu imploziju (Gogate i sur., 2001a).

S obzirom na način pobuđivanja kavitacije mogu se istaknuti četiri tipa kavitacije:

- Akustična kavitacija
- Optička kavitacija
- Čestična kavitacija
- Hidrodinamička kavitacija

Akustična kavitacija nastaje pod utjecajem ultrazvuka frekvencije od 20 do 100 kHz. Ova vrsta kavitacije nastaje pod djelovanjem mehaničkih uređaja, koji pretvaraju mehanički rad u ultrazvučni val. U ovom rasponu frekvencija i povećanjem amplitude ultrazvuka dolazi do naglog smanjenja tlaka, koji uzrokuje nastanak tek malog mjehurića od zraka i pare. Mjehurić oscilira ovisno o tlaku koji ga tlači, a kada je tlak najveći, dolazi do implozije mjehurića i otpuštanja velike količine energije koja se očituje preko povećane temperature i tlaka (Žeravica, 2017).

Optička kavitacija nastaje pod djelovanjem svjetlosti visokog intenziteta na fluide, a čestična kavitacija nastaje pod djelovanjem čestica visoke energije, na primjer protona (Crnić, 2015). Hidrodinamička kavitacija pojavljuje se u tekućinama koje struje velikim brzinama kroz

cijevi sa suženjem pri čemu se tok tekućine ubrzava, kako bi sveukupan tlak ostao konstantan. Upravo na tom mjestu nastaje kavitacija u obliku kavitacijskih mjehurića.

Uspoređujući hidrodinamičku kavitaciju s akustičnom Gogate i sur. (2001b), su naveli kako akustična kavitacija ima veći lokalni učinak na kemijske reakcije, ali hidrodinamička kavitacija je postojana unutar cijelog volumena. Mehanički uređaji koji proizvode ultrazvuk imaju doseg najviše 5 cm, zbog čega se ne mogu koristiti reaktori većeg volumena (Crnić, 2015). Sukladno tome ultrazvučnim se reaktorima povećanjem volumena treba povećati i broj mehaničkih pretvornika, što je u pravilu komplicirano i skupo. Isto tako, izvedbe ovakvih mehaničkih pretvornika kompliciranije su spram hidrodinamičke opreme. Hidrodinamički reaktori su najčešće velike zapremnine, jer je kavitacija prisutna u cijelom volumenu, te je povećanje mjerila lako izvedivo. Zanimljivo je što se povećanjem u veće mjerilo sustavu povećava energetska učinkovitost, odnosno u većim volumenima potrošnja energije nije znatno veća (Gogate i sur., 2001b). Zbog lake primjene u industriji i najveće energetske učinkovitosti brojne istraživačke studije obrađuju upravo ove dvije vrste kavitacije (Gogate i sur., 2001a).

### 2.1.1. Hidrodinamička kavitacija

Hidrodinamička kavitacija je kavitacija proizvedena u toku fluida. Kao i svaka druga vrsta kavitacije nastaje zbog pada tlaka. Najčešće se hidrodinamička kavitacija proizvodi protjecanjem fluida kroz cijev sa suženjem. Unutar suženja dolazi do povećanja kinetičke energije na račun pada statičkog tlaka. Smanjenjem statičkog tlaka dostiže se vrijednost tlaka isparavanja fluida i formiraju se tek mali kavitacijski mjehurići ispunjeni parom i plinom. Nakon nastanka i rasta, implodiraju oslobađajući veliku količinu energije. Jakost hidrodinamičke kavitacije najviše ovisi o podešenim procesnim parametrima kao i o geometrijskim karakteristikama reaktora. Ovisno o jakosti, kavitacija utječe na provođenje kemijskih reakcija, koje se ne mogu provoditi u normalnom okruženju. Za takve je reakcije potrebno proizvesti ekstremne uvijete. Pomoću hidrodinamičke kavitacije neke se reakcije ubrzavaju kao i cijeli metabolički putevi (Crnić, 2015). Implzijom kavitacijskih mjehurića nastaju područja visoke energije i to na puno mjesta u reaktoru, čime se dobiva dobra disperzija energije unutar sustava (Gogate i sur., 2001b). Takva područja imaju visoku temperaturu i tlak

(5000 °C i 1000 bara), uz proizvodnju mikromlazova koji pokreću kemijske reakcije (Mustapić, 2012).

Za pokretanje kavitacije u reaktorskim sustavima potrebna je ulazna energija. Ulazna energija električna je energija koja se zatim pretvara u mehaničku, što znači da se pumpa pokreće električnom energijom i obavlja rad tako što tlači fluid (mehanička energija). Na kraju se mehanička energija pretvara u kavitaciju, urušavanje mjehurića i provođenje kemijskih reakcija. Tijekom pretvorbe energije u svakom stadiju dolazi do njezina rasipanja. Količina rasipane energije ovisi o izvedbi sustava. Energija se na kraju iskorištava ili za provođenje kemijskih reakcija ili za grijanje sustava (Gogate i sur, 2001b).

Hidrodinamička kavitacija može se predstaviti i u okviru intenzifikacije procesa. Intenzifikacija procesa po definiciji Stankiewicz i Moulijn (2000) je pojam koji se odnosi na razvoj nove opreme i metoda rada, koje u usporedbi sa dosadašnjima, donose značajna poboljšanja u proizvodnji na način da smanjuju omjer proizvodnog kapaciteta i potrošnje energije ili proizvodnje otpada. Intenzifikacijom se stvara tehnologija koja je jeftinija i održiva, ali omogućuje proizvodnju sigurnijeg i kvalitetnijeg proizvoda. Ovaj pojam nastao je 1995. godine s ciljem da se stare tehnologije, koje imaju velike nedostatke, poboljšaju uz uštedu energije i očuvanje okoliša. Glavni nedostaci današnjih tehnologija i opreme su nedovoljna izmiješanost sustava, te slab prijenos mase i topline (Stankiewicz i Moulijn, 2000).

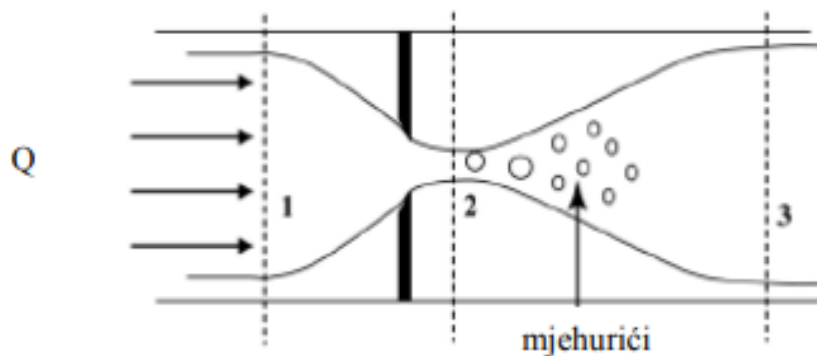
Strategija intenzifikacije procesa temelji se na 3P pravilima („profit, planet, people“). Profit ili dobit ostvaren je zahvaljujući porastu kapaciteta i prelasku šaržnog procesa na kontinuirani. Drugo pravilo je „planet“, koje podrazumijeva očuvanje okoliša preko bolje pročišćenosti otpadnih struja i veće osviještenosti o mogućim zagađivačima. „People“, odnosno ljudi, predstavlja treće pravilo. Ovo pravilo prvenstveno gleda na sigurnost hrane i kvalitetu proizvoda (Čurlin i sur., 2018).

Hidrodinamička kavitacija u sklopu intenzifikacije može se primijeniti kao inovativna metoda za stvaranje OH radikala, povećanje koeficijenta prijenosa, povećanje temperature i tlaka, te za emulgaciju i degradaciju mikrobnih stanica. Ako se hidrodinamička kavitacija pogleda preko 3P pravila, vidljivo je kako se dobit odnosno profit ostvaruje ubrzavanjem reakcija, bez štetnih utjecaja na okoliš, čime je pokriven i „planet“ zahtjev. Što se tiče sigurnosti i kvalitete proizvoda, ona je poboljšana, pogotovo za slučaj prehrambene industrije kada se kavitacija koristi u procesima pasterizacije hrane. Naime, pasterizacija konvencionalnim

metodama uništava kvalitetu proizvoda visokim temperaturama, što kod kavitacije nije slučaj. (Čurlin i sur., 2018). Kako bi se najbolje razumjela intenzifikacija, odnosno potreba hidrodinamičkih kavitacijskih reaktora, treba ih usporediti s konvencionalnim reaktorima. Reaktori s miješalom, odnosno konvencionalni reaktori, ne mogu postići toliku distribuciju energije kao ni njezinu ravnomjernu raspodjelu, dok hidrodinamički kavitacijski reaktori uz veliku oslobođenu energiju za kemijske reakcije postižu prijenos mase i tvari unutar cijelog volumena (Gogate i sur., 2001b).

*Koncept hidrodinamičke kavitacije najbolje se može opisati preko strujanja kroz prigušnicu.*

Prigušnica je izvedena pomoću dvije cijevi koje su spojene prirubnicom (Pearce i Lichtarowicz, 1971). Prirubnica predstavlja mehaničko rješenje za spajanje dviju cijevi, te se u ovom slučaju unutar nje ugradilo suženje (Gogate i sur., 2001b, Mustapić, 2012).



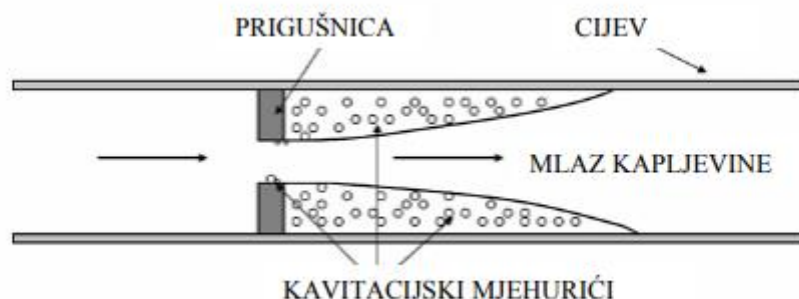
Slika 1. Prikaz toka fluida kroz prigušnicu (Mustapić, 2012).

Reaktorska izvedba s prigušnicom jedan je od najčešćih primjera kako u istraživanju tako i u industriji (Yamaguchi i Suzuki, 1980). Na slici 1. prikazan je tok fluida kroz prigušnicu, te je na temelju iscrpnih istraživanja dobiven režim strujanja fluida kroz prigušnicu (Mustapić, 2012):

Strujanje fluida kroz prigušnicu započinje ulaznim protokom  $Q$  koji je ostvaren zbog ulaznog tlaka  $P_1$ . Prvi režim je *jednofazno strujanje fluida* i on se očituje kao fluid bez plina (Yan i Thorpe, 1990). Ubrzavanjem kroz prigušnicu dolazi do smanjenja tlaka fluida, što dovodi do početka kavitacije. U tom trenutku prestaje jednofazno strujanje fluida na mjestu koje se naziva vena contracta. Na slici 1. vena contracta prikazana je brojem 2 te označava područje niskog tlaka i obilježava početak kavitacije (Ball i sur., 1975).

*Početak kavitacije* očituje se dvofaznim sustavom, odnosno dolazi do nastanka mjehurića u fluidu. U veni contracti tlak se smanjuje do one vrijednosti pri kojoj nastaju mjehurići otopljenih plinova (Ramamurthi i sur., 1999). Što bi značilo da tlak isparavanja fluida nije dostignut te u tim mjehurićima nije prisutna parna faza. Ova vrsta kavitacije naziva se plinska kavitacija (Koivula i Ellman, 1998). Poslije prigušnice i vene contracte dolazi do snažnog turbulentnog strujanja i nastajanja vrtloga. Unutar tih vrtloga dolazi do još većeg pada tlaka koji dostiže tlak isparavanja tekućine i tek tada nastaje kavitacija s parnom fazom, tzv. parna kavitacija (Tullis i Govindarajan, 1973).

*Zagušena kavitacija* kao i superkavitacija zapravo su dvije nepovoljne pojave, te prilikom nastanka zagušene odmah dolazi i do nastanka superkavitacije (slika 2.) (Tullis, 1971). Ove pojave nastaju u slučajevima kada se ulazni tlak toliko uveća da se u veni contracti statički tlak spusti ispod vrijednosti tlaka isparavanja fluida (Numachi i sur., 1960).



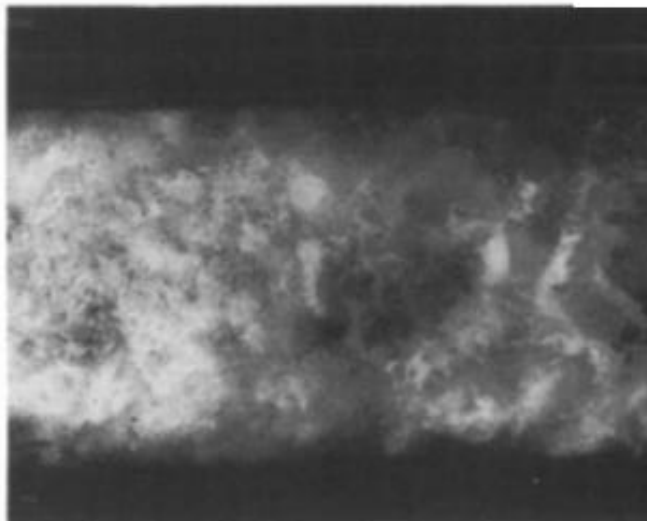
Slika 2. Prikaz zagušene kavitacije unutar prigušnice (Mustapić, 2012).

Zagušena kavitacija očituje se kao mlaz fluida koji izlazi iz prigušnice veličine i do 20 cm, s okruženim kavitacijskim mjehurićima (slika 2.) (Bikai i sur., 2002; Nurick, 1976). Takav presjek izgleda kao mlaznica koja prolazi sredinom, a oko nje para čini „džepove“ ili „mrtve kuteve“, te prestaje kada mlaz počine doticati rub cijevi (Yan i Thorpe, 1990).

Kako se *superkavitacija* javlja uz prvobitno postojanje zagušene kavitacije, ove pojave ne možemo odvojiti. Postoje 3 faze razvijanja superkavitacije koje su prikazane na slici 4:

Faza A: područje zagušene kavitacije

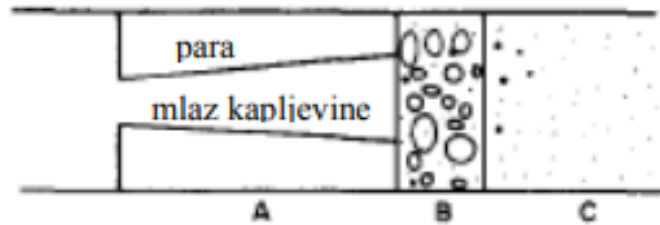
Faza B: pojava bijelih oblaka. Ova faza započinje naglim povećanjem tlaka, a vidljiva je preko velikih mjehurića koji izgledaju kao bijeli oblaci. Mjehurići se raspadaju na manje, a isti zatim implodiraju (Mustapić, 2012). Ta je regija jako kratka i iznosi 3 – 5 cm (slika 3.) (Yan i Thorpe, 1990).



Slika 3. Prikaz pojave bijelih oblaka (Mustapić, 2012).



Faza C : Područje prestanka kavitacije gdje je moguće pronaći još nekoliko mjehurića zraka (Mustapić, 2012).

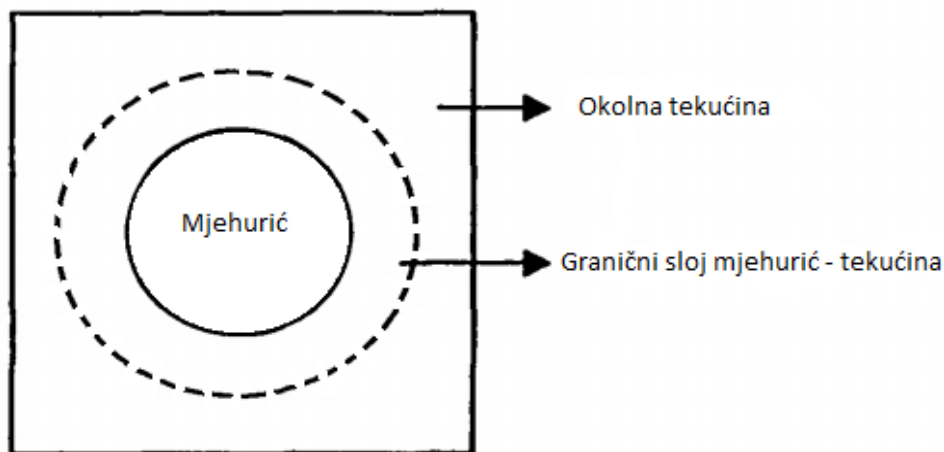


Slika 4. Faze nastanka superkavitacije (Mustapić, 2012).

Mustapić, 2012 objašnjava kako je superkavitacija nepovoljan proces jer je njezin intenzitet na malom području razoran za opremu. Pri ovom režimu kavitacija brzo nestaje, te nije prisutna u cijelom volumenu reaktora.

Nakon opisanih režima strujanja fluida, pa i nastanka i rasta mjehurića unutar tog fluida dolazi do najinteresantnije faze, a to je urušavanje mjehurića. Prilikom urušavanja mjehurića dolazi do niza mehaničkih i kemijskih efekata (Rajan i sur., 1998). Mehanički efekti prvenstveno se odnose na porast temperature i tlaka te nastanka mikromlazova, dok se kemijski više baziraju na nastanak OH radikala. Ovi efekti ovise o prostornoj raspodjeli pa se sukladno tome mogu podijeliti na tri zone (Gogate i sur., 2001a):

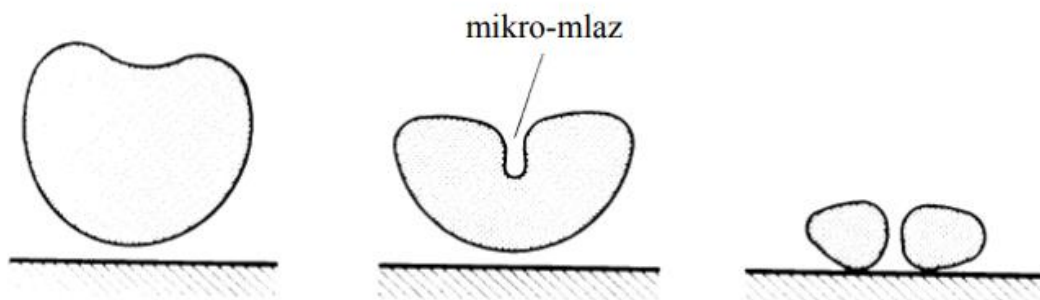
- Efekti na mjestu mjehurića
- Efekti na granici mjehurić – tekućina
- Efekti u okolnoj tekućini



Slika 5. Prikaz zona urušavanja mjehurića (Gogate i sur., 2001a).

Unutar mjehurića nalazi se para s plinovima (slika 5.). Za vrijeme urušavanja mjehurića dolazi do otpuštanja visokih temperatura i tlakova (Naidu i sur., 1994). Para u takvim ekstremnim uvjetima uzrokuje fragmentaciju molekula koje se nalaze unutar mjehurića, odnosno nastaju slobodni radikali (Fujikawa i Akamatsu, 1980). Na granici mjehurić – tekućina dolazi do reakcija gdje također nastaju radikali, pošto su sukladno tome, temperatura i tok topline još dovoljno veliki. Nastali radikali u tekućini reagiraju s otopljenim molekulama provodeći kemijske reakcije (Gogate i sur., 2001b).

Uz kemijske bitno je spomenuti i mehaničke efekte kavitacije. Oni se svode na formiranje mikromlazova (Brennan, 1995). Samim urušavanjem mjehurića dolazi do proizvodnje mikromlaza. Ako promotrimo granicu sustava kruto – tekuće, u čiju blizinu dolazi mikromlaz velike brzine, dolazi do puknuća krute čestice ili oštećenja površine (slika 6.) (Knapp i sur., 1970).



Slika 6. Prikaz razaranja krute čestice mikromlazom (Mustapić, 2012).

Međutim, u slučaju kavitacijskog mjehurića, mikromlaz pogotkom graničnog sloja mjehurića uzrokuje smanjenje i nastanak međufaznih turbulencija na graničnom sloju. U ovim se slučajevima ili slamaju ili deformiraju granični slojevi, koji služe kao prepreka prijelazu mase u unutrašnjost mjehurića/čestice. Isti efekti mogu se primijeniti kod prijenosa topline (Gogate i sur., 2001a).

### 2.1.2 Vrste hidrodinamičke kavitacije

Hidrodinamička se kavitacija dijeli s obzirom na *uvjete nastanka kavitacije* i s obzirom na *raspodjelu kavitacije u prostoru*.

Ovisno o uvjetima nastanka kavitacije razlikujemo stabilnu i prijelaznu kavitaciju. *Prijelazna kavitacija* podrazumijeva smanjenje mjehurića na najmanji mogući održivi oblik. Nakon daljnjeg smanjenja dolazi do urušavanja te plinovi i para prelaze u okolni medij oslobađajući veliku količinu energije sadržanu u obliku tlaka i topline. *Stabilnu kavitaciju* karakterizira promjenjiva veličina mjehurića, koja ovisi o ulaznoj energiji koja u tom trenutku djeluje na mjehurić (Gogate i sur., 2009).

Prijelazna kavitacija, koja ima veći kavitacijski učinak, što znači da nastaju veći lokalni tlakovi i temperature, bila je glavna prednost ultrazvučnih reaktora, dok se uz hidrodinamičke reaktore vezala stabilna kavitacija, čije je obilježje manji učinak kavitacije. Međutim, zbog turbulentnog strujanja nizvodno od suženja dolazi do nastanka prijelazne kavitacije. Sama

turbulencija postavlja se uvođenjem visokih ulaznih tlakova kako bi brzina strujanja kroz reaktor bila velika ( $Re > 4000$ ). Činjenicom da su hidrodinamički i ultrazvučni reaktori imali isti učinak erozije na opremu, Moholkar i sur. (1997) navode kako su efekti kavitacije isti. Općenito, hidrodinamički su reaktori jednostavnije konstrukcije i koriste manje energije za isti učinak pa se sve više upotrebljavaju (Moholkar i sur., 1997).

S obzirom na raspodjelu kavitacije u prostoru razlikujemo: pomičnu, mirujuću i vrtložnu kavitaciju. *Pomična kavitaciju* je kavitacija koja nastaje u fluidu koji struji. Njezino glavno obilježje je da putuje zajedno s fluidom unutar volumena reaktora dok se ne uruši. *Mirujuća kavitacija* je suprotnost pomičnoj (Knapp i sur., 1970). Ona nastaje zbog strujanja fluida, ali je postojana unutar malog i prostorno zadanog volumena, najčešće unutar suženja gdje se kavitacija proizvodi. Prostori takvih malih volumena s kavitacijom nazivaju se kavitacijski džepovi. Zadnji primjer je *vrtložna kavitacija* koja nastaje i postoji unutar vrloga (Mustapić, 2012). Mustapić, 2012 navodi kako je poželjno u reaktorskom sustavu održavati pomičnu kavitaciju jer omogućava djelovanje kavitacije po cijelom volumenu reaktora.

## 2.2. PARAMETRI I ZNAČAJKE HIDRODINAMIČKE KAVITACIJE

Parametri hidrodinamičke kavitacije su: ulazni tlak, fizikalno – kemijska svojstva fluida, konstrukcijske karakteristike i početni polumjer mjehurića. Parametri sustava mogu se mijenjati sukladno zahtjevima željene kemijske reakcije, odnosno podešavaju se kako bi povećali učinkovitost. Značajke su: kavitacijski broj,  $\beta$ , kavitacijski prinos i energetska učinkovitost. Ove značajke predstavljaju bezdimenzijske veličine koje opisuju sustav. Odnosno, one su brojčane vrijednosti jednadžbi, čiji su članovi parametri kavitacije. Mijenjanjem parametara možemo pratiti učinak kavitacije, najčešće Weissler-ovom reakcijom, a kada je reakcija najjača, tada su parametri za taj sustav optimalni. Na temelju tih parametara izračunavaju se vrijednosti kavitacijskih značajki i objavljuju kao najoptimalnije za zadani sustav (Gogate i sur., 2001b; Moholkar i Pandit, 1997).

### 2.2.1. Weissler – ova reakcija

Reakcija degradacije kalijeveg jodida kojom se oslobađaju ioni joda, naziva se Weissler – ova reakcija. Ova reakcija odvija se pod djelovanjem slobodnih OH radikala nastalih kavitacijom. Radikali napadaju KI i tvore  $I_3^-$  ione koji sa škrobom oboje otopinu u plavo. Količina nastalih iona detektira se pomoću UV/VIS spektrofotometra, mjerenjem apsorbancije pri 355 nm valne duljine. Učinak kavitacije prikazuje se preko intenziteta obojenja, odnosno reakcija je najjača pri većem obojenju (Gogate i sur., 2001b).

### 2.2.2. Parametri hidrodinamičke kavitacije

*Ulazni tlak (tlak ispred prigušnice)* utječe na tlak poslije prigušnice, pad tlaka i na vrijeme uspostavljanja tlaka. Dakle, povećanjem ulaznog tlaka povećavaju se i svi ostali parametri (Gogate i sur., 2001a). Povećanjem tlaka nakon suženja dolazi do nastajanja vrtloga, te je povećan i intenzitet turbulencije. Pojednostavljeno rečeno, javlja se turbulentno strujanje koje do sada stabilan oblik kavitacije pretvara u prijelazan (Moholkar i Pandit., 1997). Može se reći kako povećanjem ulaznog tlaka dolazi i do povećanja kavitacijskog prinosa. Ovo se može objasniti na način da prilikom povišenog ulaznog tlaka dolazi do većih brzina strujanja fluida u samoj prigušnici, što uzrokuje veći pad tlaka (Sentilkumar i Pandit, 1999). Nakon prigušnice dolazi do većeg stupnja turbulencije pa je vrijeme uspostavljanja tlaka kao i sam tlak poslije prigušnice povećan. To sve zajedno utječe na jačinu urušavanja mjehurića kao i jačinu oslobođene energije (Gogate i sur., 2001a). Potrebno je obratiti pozornost na povećanje kavitacijskog prinosa do određene optimalne vrijednosti, jer daljnjim povećanjem vrijednosti ulaznog tlaka vrijednost učinkovitosti pada. Ta se zakonitost lako objašnjava superkavitacijom. Zbog velikog ulaznog tlaka nastaje previše mjehurića koji čine bijele oblake i smanjuju učinkovitost kavitacije (Gogate i sur., 2001a). Znanstveno su dobivene vrijednosti  $\beta$  (omjer promjera provrta i cijevi) i kavitacijskog broja za prigušnicu s jednim provrtom koje garantiraju područje bez nastanka superkavitacije. Prema Gogate i sur. (2001a) vrijednost kavitacijskog broja iznosi između 0,005 i 0,8, a  $\beta$  iznosi između 0,026 i 0,13. Ulazni se tlak lakše kontrolira

ako sustav sadrži nakon pumpe glavnu i kontrolnu cijev koja je regulirana ventilom i kontrolira protok u glavnoj cijevi koja sadrži prigušnicu (Vichare i sur., 2000).

Fluid na kavitaciju utječe svojim *fizikalno – kemijskim svojstvima*. Prvo je svojstvo tlak isparavanja tekućine. Važno je znati kako je lakše imati veći kavitacijski prinos u bolje hlapivim otopinama, što bi značilo da je njihov tlak isparavanja tekućina veći te statički tlak unutar prigušnice može lakše dostići tu vrijednost (Chivate i Pandit, 1993). Mana ovog svojstva je da upravo zbog lakšeg isparavanja dolazi do velike koncentracije pare unutar mjehurića koja naglo kondenzira i umanjuje intenzitet urušavanja mjehurića (Gogate i sur., 2001a).

Sljedeće je svojstvo viskozitet tekućine. Teorijski gledano, povećanjem viskoznosti povećavaju se kohezijske sile te, sukladno tome, i energija potrebna da se generira kavitacija. No, eksperimentalno dobiveno newtonovski fluidi koji imaju najmanji viskozitet pokazuju najveći intenzitet kavitacije i on se ne smanjuje povećanjem viskoznosti takvih fluida. Što se tiče nenevtonovskih fluida, generacija kavitacije je kompliciranija i nedosljedna (Senthilkumar i sur., 2000).

Površinska napetost negativno utječe na stvaranje mjehurića. Ona je sila koja zahtijeva veći pad tlaka kako bi se mjehurići mogli formirati. Međutim, kada se mjehurići formiraju, oni ostaju u svojoj formi duže vremena pa eventualno dolazi do njihove fragmentacije. Svaki od tih fragmenata postaje zaseban mjehurić i povećava učinak kavitacije. Dakle, površinska napetost djeluje negativno na nastajanje mjehurića, ali je pozitivna pojava kod rasta i urušavanja mjehurića (Plesset, 1970).

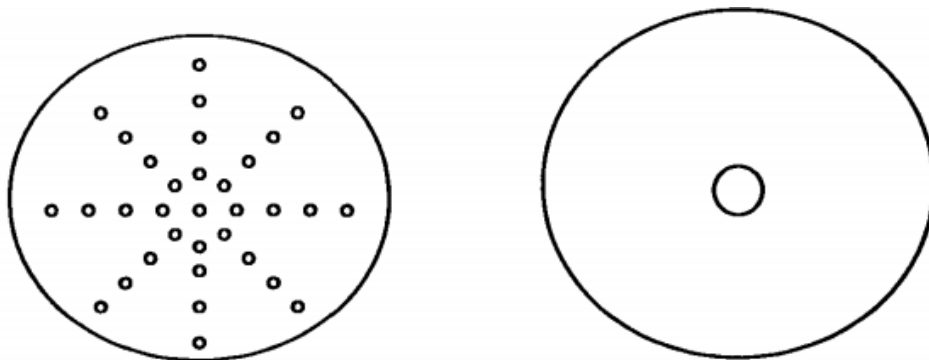
Temperatura utječe na sva ostala svojstva. Na primjer, povećanjem temperature povećava se i tlak isparavanja tekućine, dok se smanjuje viskoznost i površinska napetost. Ujedno se smanjuje i topljivost plinova u fluidu što smanjuje nastajanje kavitacije (Gogate i sur., 2001a). Također, temperatura ovisi o udjelu plina i pare unutar mjehurića te ovisi o sastavu samog plina. Na primjer, ako je veća količina plina unutar mjehurića dolazi do značajnije promjene temperature, a ako je veća količina pare dolazi do povećanja topline. To se događa zato što para ima veću toplinsku vodljivost (Senthilkumar i sur., 2000).

Ako je u fluidu veća koncentracija otopljenih plinova, ona povećava stvaranje mjehurića i to na način da ih snabdijeva s otopljenim plinovima. No, ujedno negativno utječe na učinak

kavitacije. Zbog veće topljivosti plin izlazi preko mjehurića i lako se otapa u okolnom mediju (Shah i sur., 1999; Petrier i sur., 1982).

Utjecaj surfaktanta (tvari koje smanjuju površinsku napetost) na fluid takav je da omogućuje razmicanje molekula kako bi lakše nastao mjehurić, što znači da pospješuje nukleaciju (Mason, 1991).

Parametar *konstrukcijskih karakteristika* prvenstveno je vezan uz izvedbu kavitacijske prigušnice (Yan i Thorpe, 1990). Prva odluka koja se mora donijeti vezano uz konstrukciju prigušnice je hoće li se koristiti prigušnica koja sadrži ploču sa jednim ili više provrta (slika 7.).



Slika 7. Prikaz prigušnice koja sadrži jedan ili više provrta (Mustapić, 2012)

Ploča s više provrta može biti izvedena kao: ploča s puno provrta malih radijusa ili kao ploča s malo provrta velikih radijusa. U prvom slučaju generacija mjehurića je puno lakša, no sam intenzitet reakcije je slab, te se ona koristi u slučajevima kada su zahtjevi za energijom manji (Petrier i sur., 1994). U slučaju ploče s malo provrta, ali velikih radijusa, stvara se suprotan efekt te se ona koristi u slučajevima energetski zahtjevnijih reakcija (Gogate i sur., 2001a). Uz promjer bitno je spomenuti i postotak slobodnog prostora za tok fluida. Ovaj parametar predstavlja udio slobodnog prostora za prolaz fluida (presjek svih provrta) na cijeloj ploči. Povećanje slobodnog prostora za tok omogućuje nastanak većeg broja kavitacijskih

mjehurića, no daljnjim povećanjem dolazi do smanjenja brzine protjecanja i težeg stvaranja mjehurića, što rezultira lošijim učinkom kavitacije. (Gogate i sur., 2001a). Povećanjem radijusa cijevi poslije prigušnice dolazi do intenzivne turbulencije koja ponovno omogućuje rast kavitacijskog mjehurića prije urušavanja (Moholkar i sur., 1997).

U pravilu vrijedi da, ako je manji *početni polumjer mjehurića*, energija oslobođena urušavanjem bit će veća (Gogate i sur., 2001a).

### 2.2.3. Značajke hidrodinamičke kavitacije

*Kavitacijski broj* je bezdimenzijska veličina koja uspoređuje protok i jačinu kavitacije (Gogate i sur., 2001a). Generalno se pomoću kavitacijskog broja određuje koji je protok, odnosno tlak potreban za određenu jačinu kavitacije. To je pogotovo bitno kod provođenja kemijskih reakcija jer sve kemijske reakcije ne iziskuju istu količinu energije. Jednadžba [1] prikazuje izračun za kavitacijski broj te objašnjenje parametara (Šarc i sur., 2017).

$$Cv = \frac{P_2 - P_v}{0,5 * \rho * v_{th}^2}, \quad [1]$$

$P_2$  je tlak koji se uspostavlja nakon suženja,

$P_v$  je tlak isparavanja tekućine,

$\rho$  je gustoća fluida, te

$v_{th}$  je brzina strujanja fluida kroz suženje.

Početni kavitacijski broj ima vrijednost 1 i idealno bi bilo da se kod ove vrijednosti pojavi kavitacija. Smanjenjem kavitacijskog broja dolazi do značajnijeg nastanka kavitacije. Pri vrijednostima većim od 1 mjehurići su znatno veći, te njihovim urušavanjem ne nastaje



značajna količina energije koja bi mogla pokretati kemijske reakcije. Postoji mogućnost nastanka kavitacije i pri većim vrijednostima kavitacijskog broja u slučajevima da se u fluidu nalaze nečistoće. Uz to je poznato kako je sam kavitacijski broj funkcija geometrije, točnije promjera suženja, te su tako znanstvenici eksperimentalno odredili da se kavitacijski broj proporcionalno povećava povećanjem promjera suženja. Zaključuje se kako je optimalno kavitacijski broj držati u vrijednostima ispod 1, ali ne previše odstupati kako ne bi došlo do pojave superkavitacije (Gogate i sur., 2001a). Znanstvenici Šarc i sur. (2017) spominju kako je optimalan kavitacijski broj između 0,13 i 0,18 pri čemu Weisslerova reakcija daje najbolji rezultat. Drugi znanstvenici, Gogate i sur., (2002), tvrde kako kavitacija nastaje pri vrijednosti kavitacijskog broja 1 te je značajna sve do vrijednosti 0,1.

Značajka  $\beta$  predstavlja omjer radijusa suženja i cijevi. Ako se promotre vrijednosti  $\beta$  0,5 (što znači da je cijev duplo veća od suženja) i 0,75, može se zaključiti da pri manjim vrijednostima  $\beta$  dolazi do manjeg tlaka nakon suženja, te kraćeg života mjehurića, dok je intenzitet turbulencije veći kada je  $\beta$  manja. Ovaj parametar nema utjecaja na promjenu veličine mjehurića (Moholokar i sur., 1997).

*Kavitacijski prinos* funkcija je proizvedenog tlaka tokom kavitacije, dok je taj tlak funkcija zadanih parametara. Proizvedeni tlak najlakše se može izmjeriti provođenjem kemijske reakcije. Na primjer, tlak generiran u sustavu potiče provođenje Weisslerove reakcije, ovisno o jačini proizvedenog tlaka, intenzitet obojenja će varirati (Gogate i sur., 2001b).

*Energetska učinkovitost* predstavlja omjer snage izmjerene u fluidu i uložene energije u sustav, što bi značilo da se uspoređuje dobivena i utrošena energija. Snaga izmjerena u fluidu izračunava se preko povećanja temperature u sustavu, pošto je povećanje temperature usko povezano s nastankom topline, odnosno energije. Ovaj je parametar izuzetno bitan jer govori koji reaktor ima najbolji prijenos energije kroz sve faze kavitacije uz što manje gubitke (Gogate i sur., 2001a).

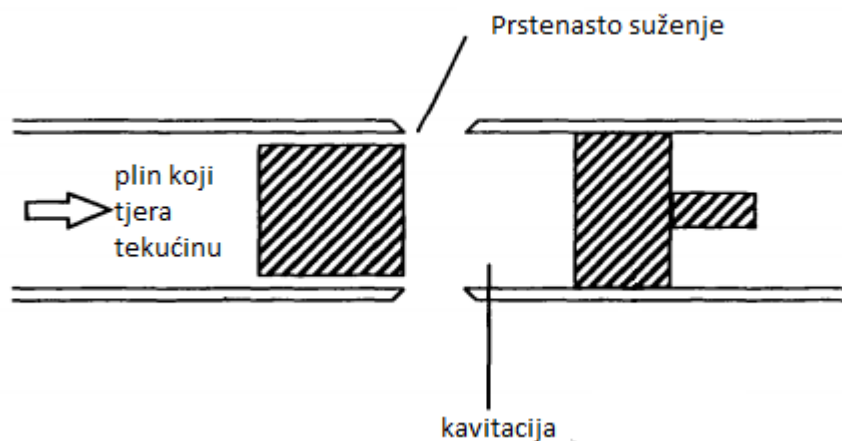
## 2.3. IZVEDBA HIDRODINAMIČKIH REAKTORA

Postoje različite izvedbe opreme za proizvodnju kavitacije te ne postoji točno definirani kriterij u literaturi koji bi usporedio takvu opremu. Način izvedbe opreme utječe na intenzitet kavitacije. Primjerice, na jačinu kavitacijskog prinosa može utjecati promjer otvora suženja ili postotak slobodnog prostora za prolazak tekućine u cijevima (Gogate i sur., 2001a).

Kao što je i prije spomenuto, hidrodinamički kavitacijski reaktori puno su jednostavniji za dizajniranje i prijenos u veće mjerilo te su učinkovitiji od ultrazvučnih. Primjerice, kod hidrodinamičkih kavitacijskih reaktora kavitacija je raspoređena po cijelom volumenu jednoliko, uz slabije učinke erozije. Optimizacija je laka obzirom da se procesni parametri lako namjeste (Gogate i sur., 2001a).

### 2.3.1. LWR (Liquid Whistle Reactor)

LWR je prvi reaktor koji je radio na principu hidrodinamičke kavitacije (slika 8.). Sastoji se od čeličnog valjka preko kojeg struji tekućina velikom brzinom stvarajući vibracije. Upravo zbog tih vibracija stvara se kavitacija i idealno izmiješani sustav. Nakon prolaska tekućine kroz prstenasto suženje, dolazi do čeličnog čepa koji tekućinu usmjerava izvan cijevi. Ovaj je reaktor jednostavan za održavanje uz mogućnost online praćenja. Međutim, ima velikih nedostataka poput male snage vibracije, koja nije dostatna za provođenje kemijskih reakcija. Kako tekućina cijelo vrijeme struji preko čeličnog valjka, dolazi do erozije materijala, što je također nedostatak ovog reaktora (Gogate i sur., 2001a).

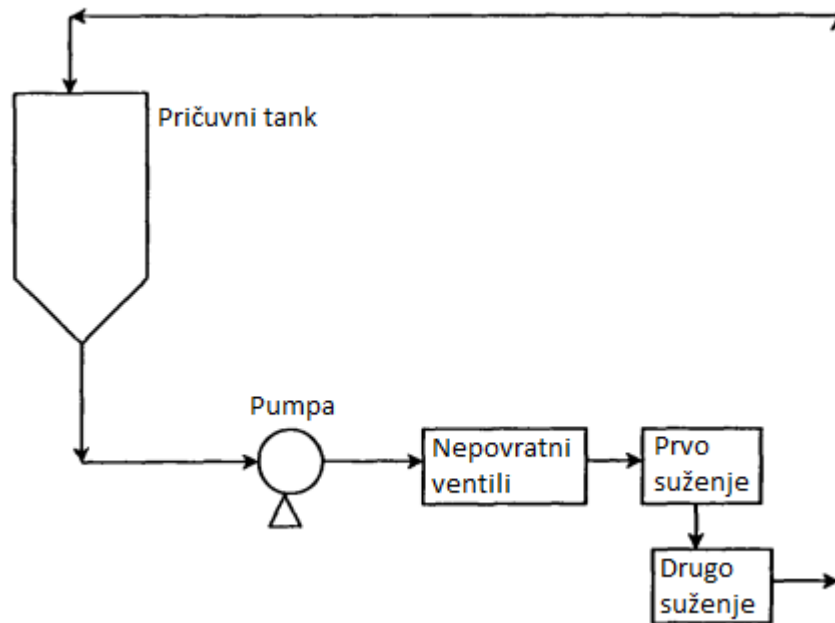


Slika 8. Shema LWR (Gogate i sur., 2001a).

### 2.3.2. Visokotlačni homogenizator

Ovaj sustav sastoji se od pričuvnog tanka na koji se nastavlja pumpa (slika 9.). Pumpa mora imati veliku snagu, kako bi mogla proizvesti visoke tlakove. Pumpa tlači tekućinu do tzv. prve faze koja sadrži prigušni ventil. Ulazni tlak ventila iznosi oko 70 bara. Nakon prvog ventila, tekućina dolazi do drugog prigušnog ventila, čiji je ulazni tlak oko 700 bara (Shirgaonkar i Pandit, 1997). Pri toliko visokom tlaku dolazi do uspostavljanja kavitacijskih uvjeta. Intenzitet kavitacije ovisi o ulaznom tlaku, tipu ventila te o konstrukcijskim karakteristikama. Nakon drugog ventila fluid se ponovno vraća u pričuvni tank. Zbog kavitacije dolazi do zagrijavanja medija te je potrebno konstantno hladiti sustav. Pričuvni tank unutar svoje konstrukcije sadrži zavojnicu s hladnom vodom, a koja služi kao izmjenjivač topline (Gogate i sur., 2001b).

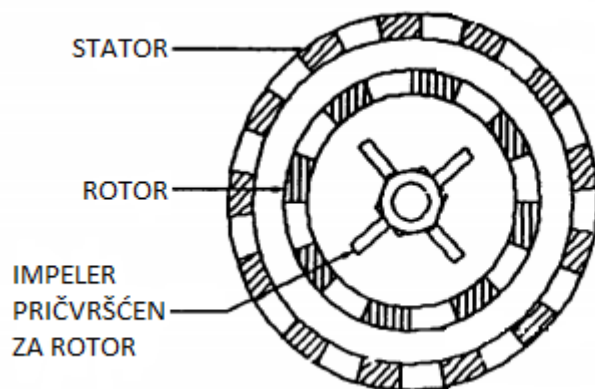
Ovakav tip reaktora najčešće se koristi za procese emulgiranja u industriji, a nedostatak je što se ne može točno odrediti učinak kavitacije, odnosno teško se kontrolira jačina tlaka nastalog za vrijeme kavitacije. Sukladno tome, nema veliku primjenu u biotehnologiji (za razaranje stanice i izdvajanje proteina potrebno je točno poznavanje jačine tlaka) nego se više koristi u prehrambenoj industriji (Gogate i sur., 2009).



Slika 9. Shema visokotlačnog homogenizatora (Gogate i sur., 2001a).

### 2.3.3. Kinetički homogenizator

Kavitacija se kod kinetičkog homogenizatora proizvodi na temelju brzog strujanja fluida. Sastoji se od rotacijskih uređaja, impelera, rotora i statora koji su napravljeni od nehrđajućeg čelika (slika 10.). Stator je dio koji se ne pokreće, dok je impeler dio koji se pokreće i rotira ubrzavajući fluid. Na stator je pričvršćen rotor, pa impeler, odnosno ploča s provrtima koja može imati i pregradu za sprječavanje formiranja vrtloga. Kavitacija se javlja prilikom prolaska tekućine kroz ploču s provrtima prilikom rotiranja impelera (Senthilkumar i Pandit, 1999). Kritična brzina okretaja za nastajanje kavitacije iznosi 8 500 rpm, a preporučuju se veće vrijednosti od kritične. Zbog velike brzine vrtnje, fluid i nastali mjehurići toliko ubrzavaju da prelaze u unutrašnjost reaktora prije urušavanja samih mjehurića (Gogate i sur., 2001a). Ovaj tip reaktora zastupljeniji je u industriji od visokotlačnog homogenizatora (Gogate i sur., 2001b).



Slika 10. Shema rotacijskog uređaja kinetičkog homogenizatora (Gogate i sur., 2001a).

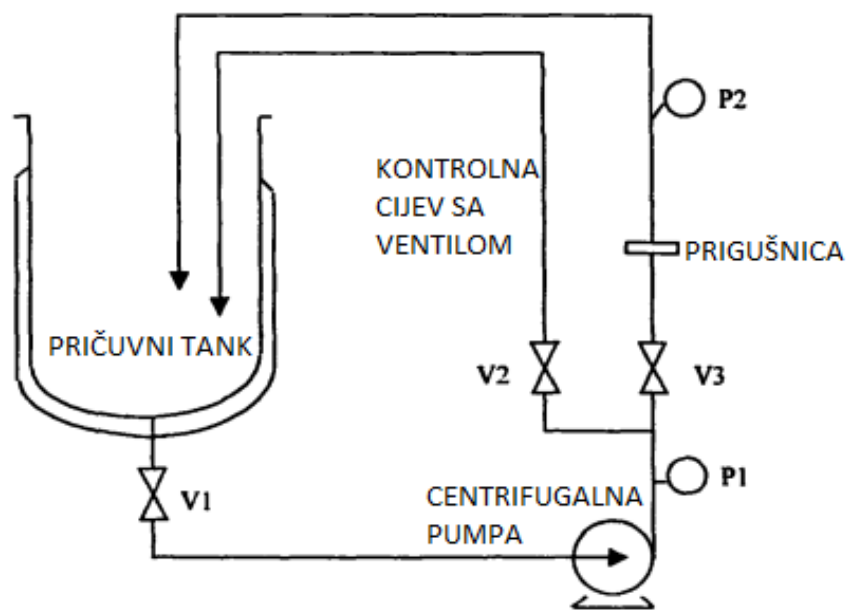
#### 2.3.4. Reaktor s kavitacijskom prigušnicom

Hidrodinamička kavitacija može se proizvesti koristeći konstrukcijska rješenja prigušnice, venturijeve cijevi i prigušnih ventila. Takva konstrukcija omogućuje povećavanje brzine protjecanja fluida i smanjenje statičkog tlaka ispod razine tlaka isparavanja tekućine (Senthilkumar i Pandit, 1999). U tom trenutku dolazi do nastanka kavitacije. Poslije suženja dolazi do proširenja cijevi, a sukladno tome i do povećavanja tlaka i urušavanja kavitacijskih mjehurića (Gogate i sur., 2009).

Sustav se sastoji od pričuvnog tanka povezanog na centrifugalnu pumpu (slika 11.). Centrifugalna pumpa tlači fluid u dvije cijevi. Prva cijev ili odvojak, je glavni odvojak. On se sastoji od prirubnice koja unutar svoje konstrukcije sadrži prigušnicu. Prirubnica je mehaničko rješenje za spajanje dviju cijevi. Unutar prirubnice lako je napraviti prigušnicu koja se sastoji od čelične ploče s provrtima. Prigušnica može sadržavati jedan ili više provrta, kombinirajući njihovu veličinu i udaljenost. Ploče s više provrta ujedno imaju više izvedbi, a razlikuju se po različitom broju provrta, njihovom promjeru pa i razmještaju. Sukladno tome, različitom konstrukcijom možemo utjecati na jačinu kavitacije (Gogate i sur., 2001a). Dokazana je najbolja kavitacijska učinkovitost kada su provrti veći, te kada je slobodna površina za strujanje veća (slika 12.).

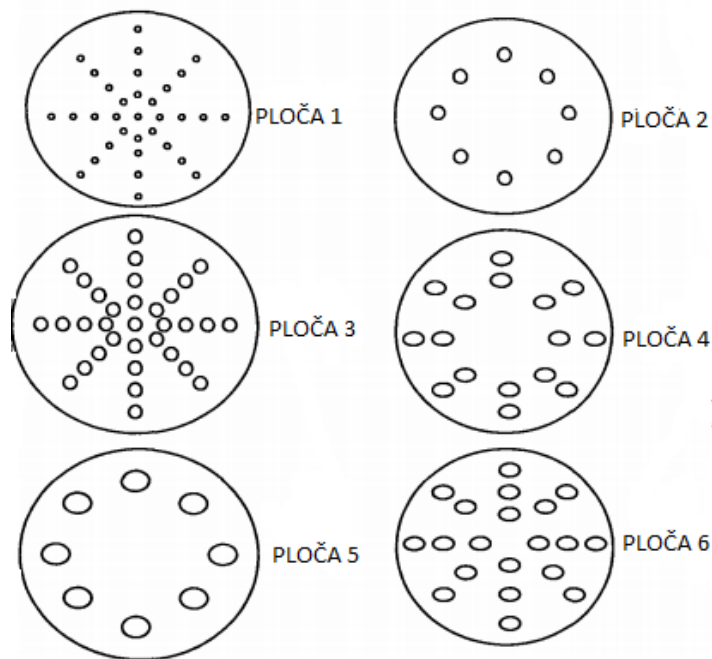
Druga cijev ili odjeljak služi kao kontrolna cijev sa sigurnosnim ventilom u slučaju da u glavnom odjeljku dođe do previsokih tlakova. Nakon centrifugalne pumpe nalazi se manometar koji mjeri ulazni tlak i sukladno tome otvara i zatvara sigurnosni ventil kontrolne cijevi. Isto tako, poslije prigušnice nalazi se manometar kako bi se izmjerio tlak tekućine nakon kavitacije. Tekućina nakon prigušnice ide u pričuvni tank koji sadrži plašt za hlađenje (Gogate i sur., 2001a).

Ovaj oblik reaktora nudi najviše različitih izvedbi i fleksibilniji je od ostalih i pomoću njega možemo inducirati različiti spektar jačine kavitacije ovisno o potrebi. Povećanje u veće mjerilo je najlakše (Gogate i sur., 2001b).



**P1, P2 - MANOMETRI**  
**V1, V2, V3 - SIGURNOSNI VENTILI**

Slika 11. Shema reaktora sa kavitacijskom prigušnicom (Gogate i sur., 2001b).



Slika 12. Prikaz ploča sa mogućim izvedbama provrta (Gogate i sur., 2001a).

### 2.3.5. Mikrofluidizator

Mikrofluidizatori su sustavi koji pomoću visokotlačnog mlaza, koji dostiže i do 200 m/s, uzrokuju visoke padove tlaka i nastanak kavitacije. Sastoje se od dvije mlazne prigušnice, kroz koje se pneumatskim pumpama tlači fluid. Mlazne prigušnice okrenute su jedna prema drugoj kako bi se mlazovi fluida sudarili (Suslick i sur., 1999). Kavitacija ovdje nastaje prilikom protjecanja kroz prigušnicu zbog pada tlaka i nastavlja se sve kroz mlaz zbog turbulentnog režima strujanja. Dolazi do postizanja visokih temperatura te se stoga cijeli reaktor uranja u termalnu kadu. Ulazni tlakovi, koji se postižu ovim postupkom, kreću se oko 150 bara. Ovi se reaktori koriste za procese emulgiranja i razaranja stanica (Gogate i sur., 2001a).

Naravno, ovi reaktori imaju i nedostatke. Hidrodinamičkom kavitacijom ne može se generirati toliko energije kao kod akustične kavitacije pa se neke kemijske reakcije ne mogu provesti. Razlog tome je što tlak nakon suženja ne dosegne ni približnu vrijednost početnog tlaka te dolazi do gubitka energije u obliku trajnog gubitka tlaka od 73 %. Glavni je problem

hidrodinamičke kavitacije nemogućnost rada sa viskoznim medijima. U viskoznim medijima kavitacija se teško stvara, a za to bi se trebale koristiti pumpe čija bi snaga bila sposobna toliko ubrzati fluid da nastane kavitacija (Gogate i sur., 2001a). Problem svake kavitacije, pa i ove, jest erozija. Velika količina energije otpušta se kavitacijom, pogotovo ako mjehurić implodira na površini opreme. Erozija je najveći problem ove tehnologije, te su, sukladno tome, stručnjaci u fazi istraživanja kako bi otklonili ovaj nedostatak (Gogate i sur., 2009).

## 2.4. ANALIZA HIDRODINAMIČKIH KAVITACIJSKIH SUSTAVA

Analizom hidrodinamičkih kavitacijskih sustava određuje se kavitacijski prinos i energetska učinkovitost kavitacijskih reaktora. Za izračun ovih značajki koriste se matematički modeli na način da se značajkama pridoda određena vrijednost. Pomoću tih brojčanih vrijednosti uspoređuju se kavitacijski reaktori i odabiru se prikladni za željenu kemijsku reakciju (Gogate i sur., 2001b). Prilikom matematičkog modeliranja koriste se pojednostavljenja za izračunavanje energetske učinkovitosti. Dio energije koja se koristi za kemijsku reakciju je zanemariva, pa se radi lakšeg izračuna pretpostavlja trošenje energije samo za grijanje sustava (toplina). Usporedbom reaktora najučinkovitija je prigušnica sa 60 % učinkovitosti, a slijede ju visokotlačni homogenizator s 54 % učinkovitosti, te kinetički homogenizator sa 43 % učinkovitosti (Gogate i sur., 2001b).

### 2.4.1. Matematički modeli dinamike hidrodinamičkih kavitacijskih sustava

Osnovna jednadžba svih matematičkih modela, kojom se opisuje dinamika mjehurića, naziva se *Rayleigh-Plessetova jednadžba* [2] (Uchiama, 1998). Dinamika mjehurića podrazumijeva vrijeme potrebno za rast i urušavanje mjehurića. Jednadžba opisuje dinamiku jednog mjehurića, a za ostale se pretpostavlja da prate tu dinamiku. Ovdje prikazana Rayleigh-Plessetova jednadžba sadrži drugi član koji obuhvaća stlačivost i ekspanziju plina unutar



mjehurića uz pretpostavku adijabatskog procesa (Rayleigh, 1917). Što bi značilo da se plin širi i stlačuje tolikom brzinom da se toplina ne izmjenjuje s okolnom tekućinom. Ova jednadžba ima pojednostavljena kao nepromijenjenost temperature unutar mjehurića jer dolazi do velikog povećanja temperature, ali unutar djelića sekunde i na malom prostoru, koji se u ovoj jednadžbi zanemaruje (Moholkar i Pandit, 1997). Pošto je proces kavitacije kratkotrajan, zanemaruje se već spomenuti prijenos topline, zatim prijenos mase preko granice mjehurića kao i kondenzacija i isparavanje pare unutar mjehurića (Mustapić, 2012).

$$\frac{p_v(T_\infty) - p_\infty(t)}{p_L} + \frac{p_{G0}}{p_L} \left(\frac{R_0}{R}\right)^{3\gamma} = R \frac{d^2R}{dt^2} + \frac{3}{2} \left(\frac{dR}{dt}\right)^2 + \frac{4\mu_L}{p_L R} \frac{dR}{dt} + \frac{2\sigma}{p_L R} \quad [2]$$

U ovoj jednadžbi još je potrebno objasniti izraz  $P_\infty$  koji podrazumijeva tlak fluida u okolini mjehurića. Kako bi se pojednostavio izračun tlaka, koriste se pojednostavljena: tlak u veni contracti poistovjećuje se sa tlakom isparavanja tekućine  $P_v$ , te pretpostavka linearnog oporavka tlaka od vene contracte pa do  $P_3$ . Izraz za  $P_\infty$  prikazan je jednadžbom [3].

$$p_\infty = p_v + \frac{(P_3 - P_v)}{\tau} t \quad [3]$$

gdje  $\tau$  predstavlja vrijeme potrebno za uspostavu tlaka  $P_3$ , odnosno za oporavak tlaka (Mustapić, 2012).

Zbog kompleksnosti Rayleigh-Plassetova jednadžbe za rješavanje se koriste računalni matematički programi (Polymath, MatLab, Mathematica i dr.). Matematičkom analizom i simulacijom procesa ispituje se međuovisnost početnog tlaka  $P_1$ , vremena potrebnog za oporavak tlaka  $\tau$ , tlak nakon oporavka  $P_3$  i početni polumjer mjehurića  $R_0$ .

Mustapić (2012) navodi kako početni tlak utječe na početni polumjer mjehurića i to tako da smanjivanjem početnog tlaka dolazi do smanjenja početnog radijusa mjehurića.

Matematičkim modelima hidrodinamičke kavitacije mogu se modelirati uvjeti slični kao u reaktorima uz neka pojednostavljena. Ovo je svakako prvi korak prilikom projektiranja hidrodinamičkih reaktora te se velika pozornost stavlja na parametre koji utječu na povećanje učinka kavitacije (Mustapić, 2012).

*Gogate i Pandit (2000)* osmislili su prvi *matematički model* na temelju istraživanja utjecaja ulaznog tlaka, početne veličine mjehurića i utjecaja promjera prigušnice na dinamiku mjehurića. Pretpostavili su turbulentno strujanje fluida sa stvaranjem vrtloga. Takvo gibanje objašnjava se kao amplitudno fluktuirajuće, što znači da brzina strujanja fluida nije u svakoj točki ista. No, kako se izraz ne bi komplicirao, uzima se srednja vrijednost brzine strujanja fluida. Uz brzinu strujanja nepoznata je i duljina vrtloga turbulentnog strujanja. Ona se izračunava pomoću Prandtlova modela vrtloga i iznosi  $0,08d$ . Oznaka  $d$  predstavlja polumjer cijevi i jednaka je srednjoj vrijednosti duljine vrtloga unutar prigušnice (tada se  $0,08$  množi sa polumjerom suženja) i nakon prigušnice (tada se  $0,08$  množi sa polumjerom cijevi). Ove vrijednosti te tlak turbulentnog strujanja moraju biti definirani kako bi se uvrstili u Rayleigh-Plassetovu jednadžbu. Mustapić (2012) navodi kako su Gogate i Pandit simulacijom ovog modela prikazali kako je potrebno pronaći optimalnu veličinu ulaznog tlaka. Poželjan je veći ulazni tlak jer je bolji učinak kavitacije, no, ako je tlak prevelik dolazi do pojave superkavitacije. Nadalje, poželjno je podesiti što niži početni radijus mjehurića te izabrati fluide koji imaju veću površinsku napetost, a manju viskoznost. Ovisno o svrsi i željenoj jačini kavitacije potrebno je provesti optimizaciju veličine promjera otvora na prigušnici, tako i korištenje što više slobodne površine otvora (Gogate i Pandit, 2000).

*Matematički model Moholkar – Pandit (2001)* svojevrsna je nadogradnja prijašnjeg modela jer uzima u obzir međudjelovanje kavitacijskih mjehurića. Simulacija je provedena na primjeru venturijeve cijevi i analizirana je međuovisnost oporavljenog tlaka, omjer površine suženja i cijevi te početna veličina mjehurića. Mustapić (2012) navodi prijedloge ovog modela. Iznosi kako povećanje tlaka na ulazu uzrokuje brži raspad mjehurića, ali je zato kavitacijski učinak bolji. Iz prijašnjeg je modela poznato kako je uvijek bolja veća slobodna površina otvora, odnosno omjer površine suženja i cijevi. Također, bitan utjecaj na intenzitet kavitacije ima manja početna veličina mjehurića (Moholkar i Pandit, 2001).

*Matematički model kavitirajućeg fluida kao kontinuuma* pretpostavlja kakvo će biti gibanje mjehurića u toku fluida te uspoređuje gibanje u venturijskoj cijevi i kavitacijskoj prigušnici (Kanthale i sur., 2005). Ovaj model dokazuje kako je bolja upotreba prigušnice jer se generiraju veći tlakovi i lakše je provoditi kemijske reakcije. Kako bi se pospješio proces u venturijskoj cijevi, treba se smanjiti njezina duljina, a za brži oporavak tlaka preporučuje se povećanje promjera cjevovoda (Mustapić, 2012).

Sljedeći je model *matematički model kavitacijskog klastera mjehurića*. Pojam klaster podrazumijeva nakupinu ili grozd, a u ovom slučaju nakupinu kavitacijskih mjehurića (Gogate i sur., 2001b). Ovaj model prikazuje realnu sliku događaja u reaktorima, obzirom da prilikom implozije mjehurića dolazi do njihovog međudjelovanja (Mustapić, 2012).

$$P_c = 0,3023(P_3)^{0,972} (r_{0k})^{-0,714} (d_0)^{0,539} (\gamma)^{0,9316} (r_k / r_{0k})^{-2,604} \quad [4]$$

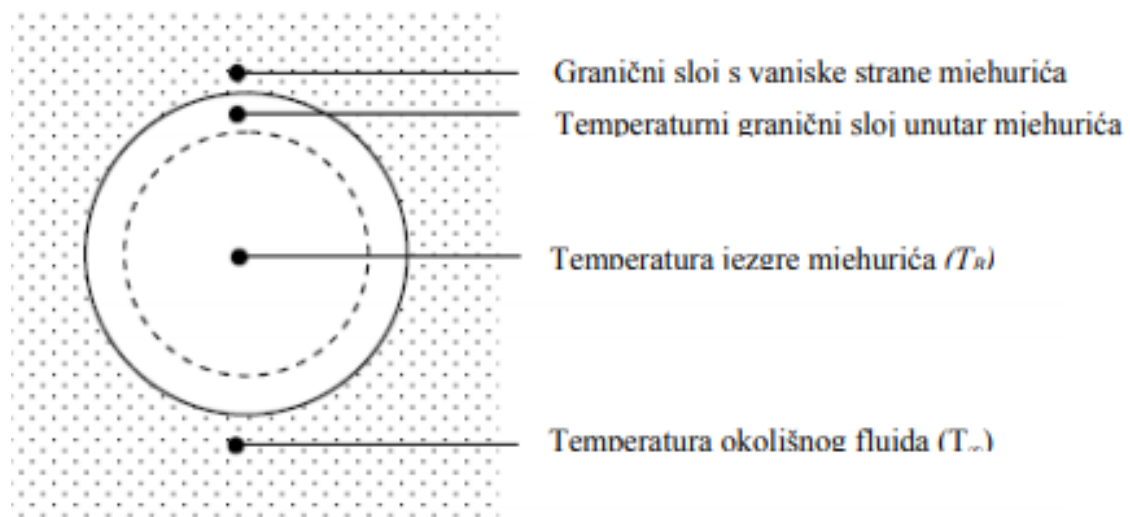
Kao što se vidi iz priloženog modela, dobivene su zakonitosti između tlaka poslije prigušnice ( $P_3$ ), početnog radijusa mjehurića ( $r_{0k}$ ), promjera prigušnice ( $d_0$ ) i udjela prenesene energije ( $r_k/r_{0k}$ ) koje se moraju optimalno postaviti kako bi se dobila željena vrijednost tlaka kavitacije da odgovara tlaku koji je potreban za provođenje kemijskih reakcija [4].

Ovaj model ima i svoje nedostatke, a to je da ova zakonitost vrijedi samo za jedan klaster (Mustapić, 2012).

*Matematički model hidrodinamičke kavitacije u kavitacijskoj prigušnici pomoću određivanja kinetike kemijske reakcije* povezuje dinamiku mjehurića s kinetikom kemijske reakcije. Ovaj model podrazumijeva kemijsku reakciju samo unutar mjehurića i koristi Keller – Miksisiovu jednadžbu za opisivanje dinamike mjehurića [5] (Sharma i sur., 2008).

$$\left(1 - \frac{\dot{R}}{c}\right) R \ddot{R} + \frac{3}{2} \left(1 - \frac{\dot{R}}{3c}\right) \dot{R}^2 = \left(1 + \frac{\dot{R}}{c}\right) \frac{p_a - p_l}{p} + \frac{R}{p_c} \frac{d}{dt} [p_a - p_l] \quad [5]$$

Ova jednadžba uzima u obzir i stlačivost fluida, prijenos topline i mase preko granice mjehurića, turbulentno stanje fluida te kemijske reakcije unutar mjehurića. Željeni je cilj ove simulacije odrediti međuovisnost između određenog intenziteta kavitacije i kinetike kemijske reakcije. Model može definirati 45 različitih kemijskih reakcija, a pogotovo one gdje nastaju OH radikali. Slika 13. predstavlja najvažnije pojednostavljenje ovog modela. Naime, kako koncentracija tvari, topline, a i kemijskih reakcija nije ista, mjehurić se dijeli na dva dijela (Moss i sur., 1999). Prvi dio predstavlja jezgru mjehurića, mjesto najveće temperature i mjesto gdje se odvija najveći broj reakcija. Drugi je dio granični dio mjehurića gdje dolazi do prijelaza tvari i topline. Za ovakav prikaz potrebno je bilo osmisliti temperaturni i koncentracijski gradijent (Storey i Szeri, 1999). Temperatura unutar mjehurića je najveća te prilikom implozije raste adijabatski, a odmicanjem od jezgre mjehurića smanjuje se do konstantne vrijednosti u graničnom sloju (Mustapić, 2012).



Slika 13. Prikaz podjele mjehurića radi pojednostavljenja matematičkog modela (Mustapić, 2012).

Kako ovaj model uvažava i turbulentno strujanje, pretpostavlja se da na dva načina turbulentno strujanje utječe na dinamiku mjehurića (Gogate i Pandit, 2000). Prva pretpostavka je da zbog vrtloga dolazi do različitih fluktuacija tlaka koji djeluje na mjehurić, pa sukladno tome mjehurić oscilira. Druga pretpostavka je da zbog smičnih sila, nastalih turbulentnim strujanjem, dolazi do ograničenja veličine mjehurića (Mustapić, 2012).

## 2.5 PRIMJENA HIDRODINAMIČKIH REAKTORA

### 2.5.1. Primjena hidrodinamičke kavitacije u tehnološkim procesima

Kao što je i prije spomenuto, kavitacija nema veliku upotrebu u industriji, ali neki od sljedećih primjera prikazuju moguću primjenu hidrodinamičke kavitacije u industriji (Milly i sur., 2007).

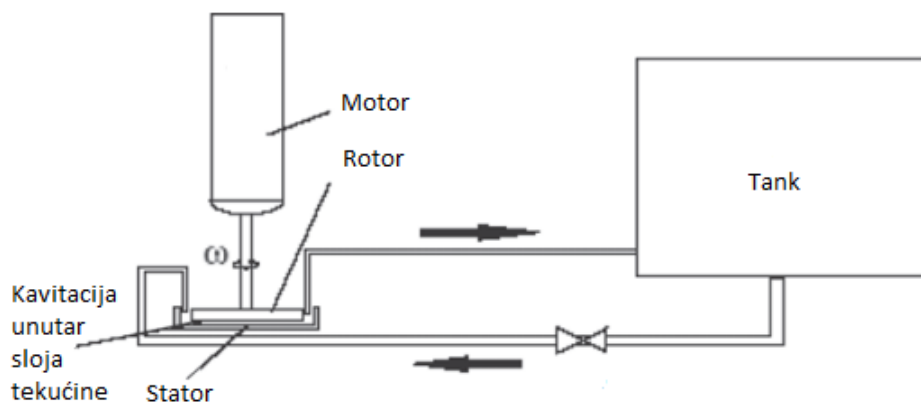
U prehrambenoj industriji hidrodinamička kavitacija može se upotrebljavati za procese *homogenizacije gustih sokova i mlijeka*. Homogenizacija je najčešće jedan od najbitnijih koraka u procesu zbog toga što definira kvalitetu proizvoda. U industriji se koriste veliki i energetski neučinkoviti uređaji, dok bi hidrodinamička kavitacija ovdje imala veću učinkovitost (Ozonek, 2012). Kavitacijom se mlijeko homogenizira tako da se faza masnih molekula rasprši na kapljice promjera 1  $\mu\text{m}$ . Na taj je način omogućena dobra disperzija i izmiješanost (Litwinienko, 2005). Također, hidrodinamički kavitacijski reaktori mogli bi se koristiti za *pasterizaciju tekućih prehrambenih proizvoda*. Dokazano je kako kavitacija ima smrtonosan učinak na kvasce, spore kvasaca, bakterije i neke viruse, a uz to dolazi do povećanja temperature koja je pogubna za mliječne bakterije. Temperatura je povećana, ali manja nego kod pasterizacije pa kvaliteta proizvoda uglavnom ostaje nepromijenjena. Rasap energije općenito je kod hidrodinamičkih reaktora manji, te je njihova učinkovitost veća uz lako povećanje u veće mjerilo (Milly i sur., 2007)

*Hidroliza biljnog ulja* odvija se pod ekstremnim uvjetima tlaka (oko 40 bara) i temperature (200-350 °C). Normalno da su takvi procesi energetski zahtjevni i neisplativi. Kada bi se koristio hidrodinamički kavitacijski reaktor, proces bi bio isplativiji. Na primjer, koristio bi se zatvoreni cirkulacijski oblik reaktora s ventilom koji bi služio kao suženje. Kavitacija bi razarala strukturu ulja, a njezin učinak pratio bi se povećanjem kiselosti smjese. Reakcijska smjesa trebala bi se zadržavati na 25 °C pomoću zavojnica s hladnom vodom (Pandit i sur., 1993).

*Sinteza biodizela* danas je jedan od najvažnijih procesa. Biodizel smanjuje emisiju CO<sub>2</sub> u atmosferu jer u načelu vrijedi pravilo da koliko se CO<sub>2</sub> proizvede vozeći automobil, toliko ga se asimilira u biljke. Konvencionalni načini proizvodnje biodizela ne omogućuju dobru izmiješanost alkohola i ulja, a isto tako ni dobar prijenos mase. Reakcija transesterifikacije zahtijeva fizički doticaj između tih dviju molekula pa su kavitacijski reaktori odličan izbor. Trajanje procesa je smanjeno, a iskorištenje iznosi 90 % uz manje temperature i tlakove (Refaat, 2010).

Također, hidrodinamički reaktori mogu se koristiti za *suzbijanje patogena i degradaciju njihovih stanica*, ali bez dodataka reagensa. Djeluju smrtonosno na kvasce, bakterije, čak i na neke viruse. U literaturi se može naći kako suzbijaju 97 – 99 % patogena. Glavna moć kavitacije leži u djelovanju mikromlazova, koji putuju i udaraju u stijenku patogena i razaraju ga, ili nastaju slobodni OH radikali unutar mjehurića, koji također putuju unutar reaktora i reagiraju s molekulama stanične stjenke uništavajući njihovu formu (Ozonek, 2012).

Dobro poznati modelni organizam *Escherichia coli* uklanjana je iz vode pomoću kinetičkog homogenizatora (Mezule i sur., 2009). Najveća učinkovitost degradacije je na samom statoru (slika 14.). Degradacija se pratila unutar 3 minute, a broj stanica smanjio se za 75 %. Ovom metodom djeluje se na nemogućnost dijeljenja bakterije (Ozonek, 2012).



Slika 14. Prikaz kinetičkog homogenizatora za uklanjanje *E. coli* iz vode (Ozonek, 2012).

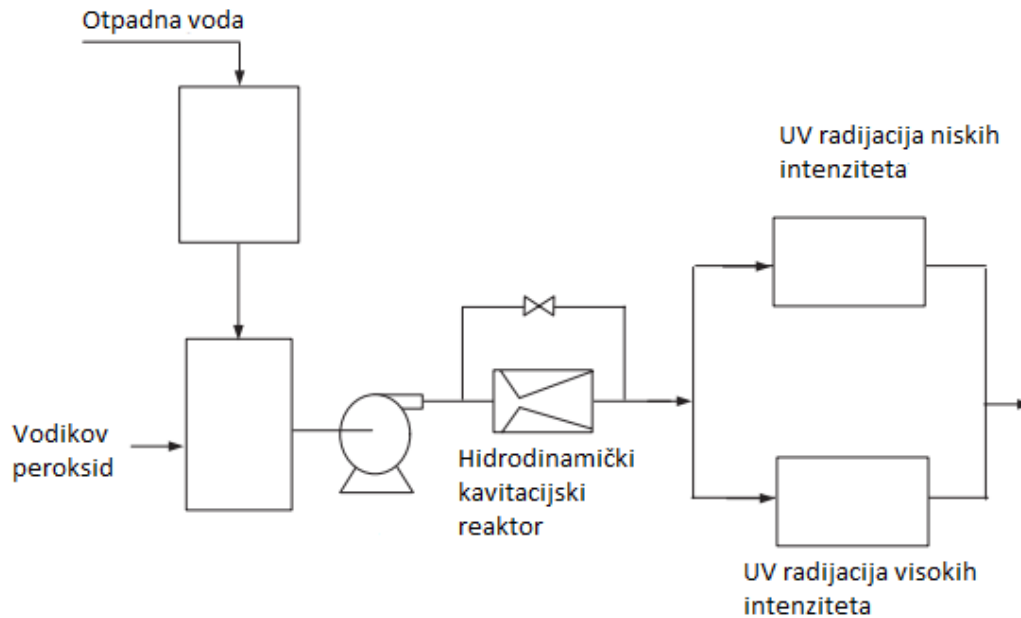
### 2.5.2. Primjena hidrodinamičke kavitacije u ekoinženjerstvu

Očuvanje okoliša danas je jedna od najrazvijenijih grana. Zahvaljujući tome, u nekim se procesima koriste hidrodinamički kavitacijski reaktori, a neki od njih su u fazi istraživanja (Ozonek, 2012).

Obrada otpadne vode uglavnom se provodi konvencionalnim metodama koje se dijele na: kemijske, fizičke, mehaničke i biološke. Njihov je glavni problem nedovoljna izmiješanost sustava pa se najčešće mora koristiti više sredstava od preporučenih za suzbijanje patogena (Ozonek, 2012). Tvari, koje se koriste za suzbijanje patogena, moraju razarati staničnu stjenku, membranu ili drugu vrstu opne. Zbog toga je bitno da su aktivne tvari u doticaju s opnom kako bi mogle utjecati na nju. Na primjer, tretiranje klorom najčešća je kemijska metoda suzbijanja patogena. Klor se u reakcijsku smjesu dodaje u većoj količini od potrebne, a zbog nedovoljno izmiješanog sustava sav klor ne može doći u doticaj s patogenima. Slobodan klor u vodi tada tvori kancerogene triklorometane (Parker i Darby, 1995). Veliku primjenu u *obradi otpadnih voda* mogu imati hidrodinamički kavitacijski reaktori. Njihova je glavna prednost dobra izmiješanost sustava, odnosno prijenos mase i topline, pa je potrebno koristiti puno manje štetnih reaktanata. Ptoszek i suradnici (2003) su obrađivali otpadnu vodu pomoću ozona zajedno s kavitacijskim reaktorom. Uklanjan je mangan i željezo iz vode uz dobivene pozitivne rezultate. Zaključeno je kako u ovom slučaju reakciju degradacije pospješuje kavitacija, omogućujući dobro izmiješan sustav.

Magnum Water Technology Inc. je firma u SAD-u. Ona koristi tzv. CAV-OX sistem obrade vode (slika 15.). CAV-OX se odvija unutar hidrodinamičkog reaktora čiji je učinak pojačan UV radijacijom i vodikovim peroksidom. Ovim postupkom obrađuje se otpadna voda, a vidljiva je puno veća razgradnja organskih komponenata (kloroform, benzen, toluen,...). Na slici 15. detaljno je prikazan postupak. Prvo se u otpadnu vodu dodaje vodikov peroksid, a potom takva smjesa ide do kavitacijskog reaktora (Gogate, 2008). Za vrijeme kavitacije nastaju slobodni radikali, koji s vodikovim peroksidom počinju provoditi razgradnju zagađivača.

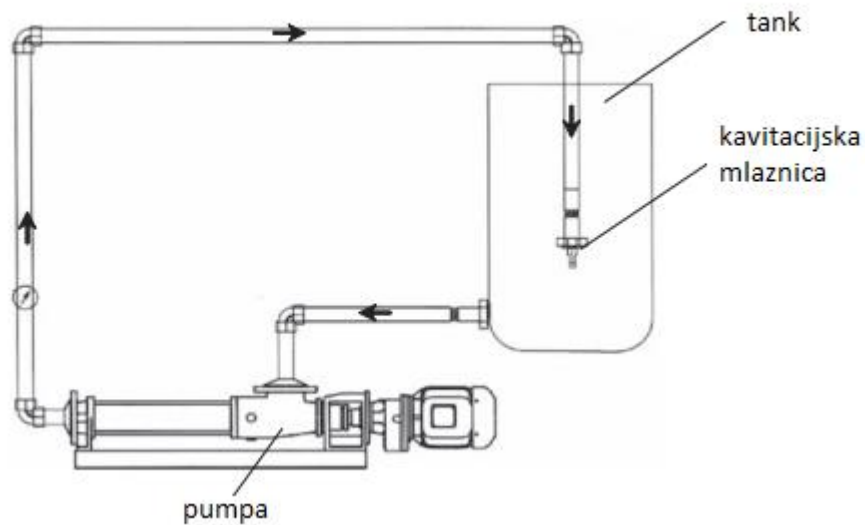
Nakon kavitacije smjesa se tretira UV zračenjem. Djelovanjem UV zraka dolazi do nastanka još većeg broja slobodnih radikala, koji razgrađuju najveći broj otpadnih tvari i to do 99 % (Ozonek, 2012).



Slika 15. Prikaz CAV-OX postupka (Ozonek, 2012).

*Aktivni mulj* se nakon svog djelovanja treba razgraditi. Tijekom procesa obrade otpadnih voda povećava svoju masu i broj stanica te na kraju i on postaje otpad. Dio istaloženog aktivnog mulja koristi se u sljedećim šaržama, a dio se treba razgraditi (Naumczyk i sur., 2006). Razgrađuje se na način da se razara struktura stanice, te mikroorganizmi odumiru. Organeli izlaze u okolnu tekućinu i potom mogu služiti kao izvor ugljika za procese denitrifikacije. Proces se može provesti u hidrodinamičkom kavitacijskom reaktoru primjenom mlaznice (slika 16.) (Margulis, 2004). Potrebna je jaka pumpa i na kraju mlaznica, koja predstavlja suženje, a nakon nje dolazi do ekspanzije i naglog povećanja tlaka. U samoj izvedbi mlaznice dolazi do kavitacije koja razara stanice mulja. Dokazano je kako se kavitacijom povećava proizvodnja metana za 20 % koji pozitivno djeluje na razgradnju (Ozonek, 2012).





Slika 16. Shema kavitacijskog reaktora za razgradnju aktivnog mulja (Ozonek, 2012).

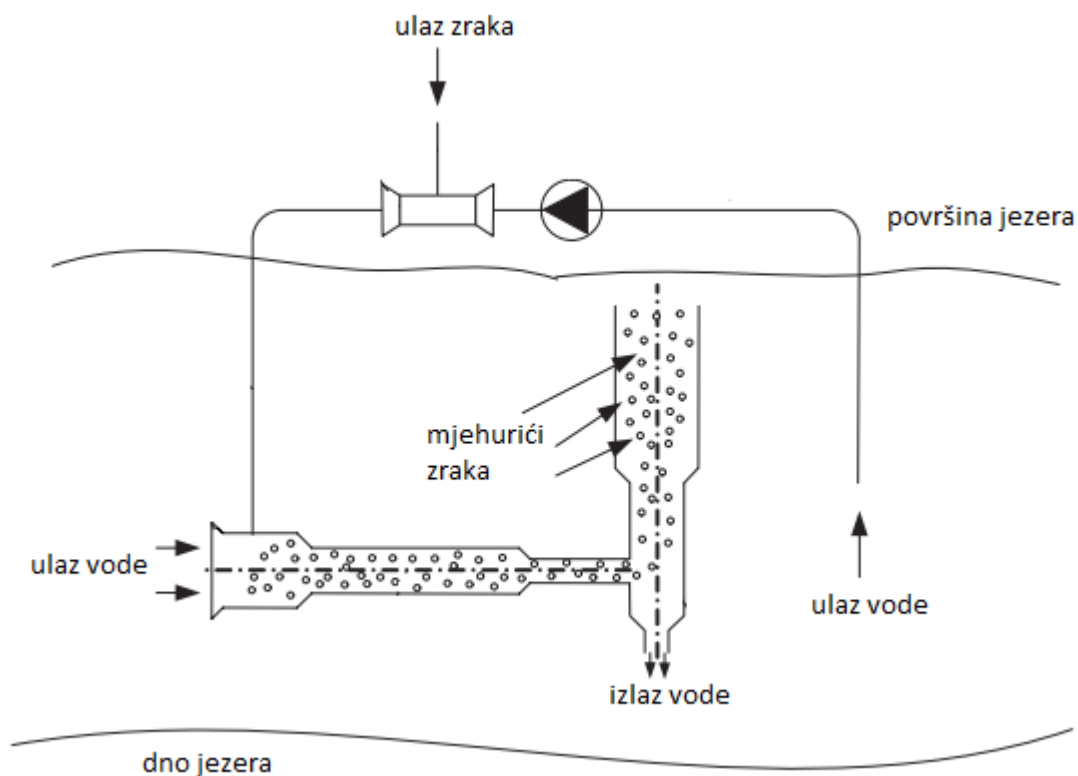
*Otpadna voda tekstilne industrije* sadrži jedan od najvećih zagađivača, a to je boja. Boja je topiva u vodi i otrovna, te stvara velike probleme u okolišu. Primjerice, u jezerima sprječava dobru raspršenost svjetla, kao i topljivost kisika, što sve zajedno utječe na planktone i njihovu fotosintezu. Većina radova bazira se na degradaciji rodamina B (Sivakumar i sur., 2002). Rodamin B je kemijski spoj koji predstavlja crvenu boju. Za njegovu razgradnju koristi se kavitacijski rektor s prigušnicom. Dokazano je kako je razgradnja povećana u kavitacijskom rektoru i to zbog nastanka OH radikala koji onda razgrađuju tako kompleksne kemijske spojeve (Mishra i Gogate., 2010).

*Postojana organska zagađivala* kemijski su spojevi otporni na biorazgradnju. Neki od predstavnika su: policiklički aromatski ugljikovodici, klorofenoli, pesticidi i ostali. Ovisno o mjestu gdje se nalaze (voda, mulj ili zemlja), svojim raspadanjem onečišćuju okoliš. Utječu na zdravlje organizama uzrokujući mutacije i kancerogene učinke te su isti zagađivači prirodnog, ali i antropogenog nastanka (Martinez i sur., 1998). Mogu nastati gorenjem šuma, u vulkanima, u geotermalnim izvorima, ali ponajviše utjecajem čovjeka i industrije. Najopasniji su u

atmosfera jer se adsorbiraju na česticu prašine i unose inhalacijom u organizme (Marty i Jallifier-Merlon, 1992). U sklopu istraživanja pročišćavala se otpadna voda s policikličkim aromatskim ugljikovodicima. Pročišćavala se u hidrodinamičkom kavitacijskom reaktoru s prigušnicom. Dokazano je kako slobodni OH radikali pozitivno utječu na raspadanje molekula te je bolja učinkovitost pri većim temperaturama (Ledakowicz i sur., 2001).

Prilikom rudarenja dolazi do izbijanja vode na površinu koja se onečisti bušenjem, tzv. *rudarska voda*. Takva voda sadrži teško razgradive komponente, kao ulja i maziva. Voda se na površini zadržava u jezercima za taloženje mulja. Jezerca zauzimaju veliku površinu zemlje, koja bi se mogla koristiti za poljoprivredu, a nakon njihovog pražnjenja potrebno je puno vremena da se to područje regenerira. Ovakva voda obrađuje se kemikalijama, koje uzrokuju taloženje teško razgradivih komponenti. Drugi način obrade jest razdvajanje separatorom. Međutim, takva voda nije dovoljno pročišćena pa se mora naknadno taložiti kemijski. Stručnjaci predlažu upotrebu kavitacijskih reaktora na sljedeći način. U prvom stupnju obrade u kavitacijski se reaktor dodaju kemikalije, a u drugi stupanj zrak ili ozon. Ozon se dodaje kako bi se oksidirale organske molekule zagađivača. Takva smjesa cirkulira unutar kavitacijskog reaktora, dok željeni učinak nije postignut (Litwinienko i sur., 2005).

*Aeracija ribnjaka* potrebna je u zimskim vremenima kada je koncentracija otopljenog kisika u vodi mala, a potrebna je za život organizama. U tom se slučaju hidrodinamički kavitacijski reaktori mogu koristiti kao aeratori (Litwinienko i sur., 2005). Primjer aeratora prikazan je na slici 17.



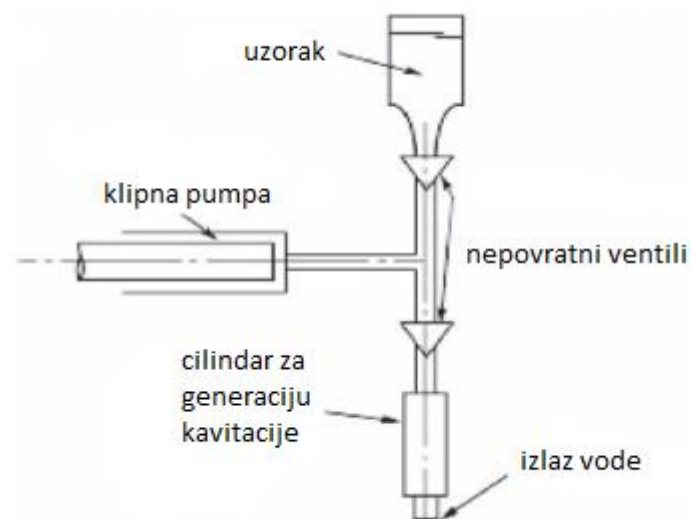
Slika 17. Shema aeratora (Ozonek, 2012).

Voda iz jezera ulazi u usisnu cijev i do pumpe. Pumpa se nalazi iznad razine vode i tlači vodu kroz suženje, unutar kojeg dolazi do smanjenja tlaka i usisa zraka. Uz mjehuriće zraka dolazi i do nastanka kavitacijskih mjehurića. Takva smjesa putuje do komore za aeraciju, gdje se usisava još vode iz jezera. U aeracijskoj komori dolazi do urušavanja kavitacijskih mjehurića koji omogućuju bolju topivost kisika u vodi. Tako obogaćena voda izlazi iz kolone, dok se preostali mjehurići zraka uzdižu na površinu jezera (Ozonek, 2012).

*Balastne vode* pune se u balastne tankove teretnih brodova kako bi osigurale njihovu sigurnost i funkcionalnost. Pogotovo u luci prilikom istovara tereta dolazi do punjenja spremnika vodom, a prilikom punjenja broda teretom dolazi do ispuštanja vode. Takvi teretnjaci mogu ploviti na drugi kraj svijeta ispuštajući u drugi sustav balastnu vodu. Istraživanjem je dobiven podatak kako se godišnje prenese 2 do 3 bilijuna tona balastne vode. Problem nastaje kada se promijeni flora i fauna mora. Naime, prijenosom tako velikih količina vode dolazi i do

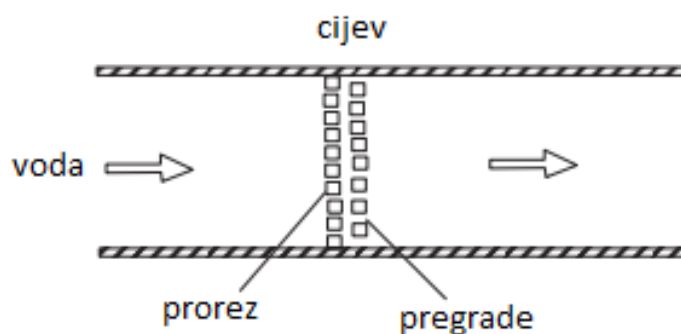
prijenosa svih bakterija, virusa, ostalih mikroorganizama, ali i vodenih organizama. Ako takvi organizmi imaju mogućnost prilagodbe na novo područje, na način da im odgovaraju uvjeti za život, postoji mogućnost da se razmnože i uzrokuju odumiranje autohtonih vrsta. Promjena samo jedne vrste može uzrokovati promjenu cijele flore i faune mora. Kada se ovaj problem realizirao, počelo se na različite načine sprječavati zagađivanje balastnim vodama. Neki od primjera su: filtracija, mikrofiltracija, UV radijacija, hidrodinamička kavitacija, te korištenje kemikalija i ozona (Ozonek, 2012).

Hidrodinamička kavitacija posebno je zanimljiva zbog proizvodnje OH radikala. Naime, OH radikali razgrađuju gotovo svaki biološki materijal, pa tako i viruse, bakterije, planktone, itd. Provedena je studija razgradnje planktona pomoću kavitacijskih mlaznica (slika 18.). Voda iz jezera pomoću klipne pumpe pumpana je pod tlakom od 150 MPa i propuštana kroz mlaznicu. Uzorak vode ulazi u mlaznicu pod djelovanjem klipa. Nakon rada klipa dolazi do ubrzanja vode dalje u mlaznicu koja je osigurana od povrata vode nepovratnim ventilima. Ubrzana voda dolazi do cilindra za generaciju kavitacije koji je većeg promjera od same mlaznice. Unutar cilindra dolazi do turbulentnog strujanja, te još većeg pada tlaka, a, sukladno tome, i do nastanka kavitacije. Na kraju voda izlazi u obliku mlaza van. Ovim postupkom zabilježena je razgradnja planktona na komadiće manje od 50  $\mu\text{m}$  (Kato, 2003).



Slika 18. Shema kavitacijske mlaznice (Ozonek, 2012).

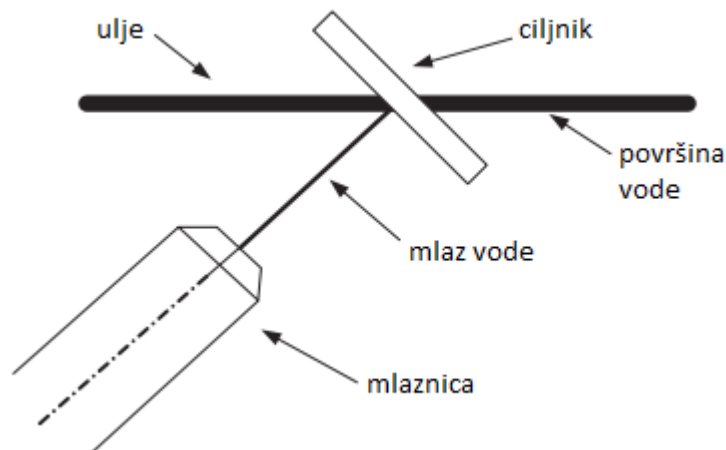
Primjer kavitacijske mlaznice, koja se koristila u Japanu za obradu balastnih voda, prikazana je na slici 19. Ona se sastoji od pregrada u dva reda između kojih su prorezi za prolaz vode. Brzina vode dostatna za proizvodnju kavitacije je oko 5 m/s. Uspješno su se razorile strukture zooplanktona i fitoplanktona (Kato, 2001).



Slika 19. Shema kavitacijske mlaznice sa pregradama (Ozonek, 2012).

*Izljev nafte* najgore je onečišćenje oceana. Teško se sanira, a šteti velikom broju organizama u oceanu. Najčešće se mehanički miče sa površine vode, no taj proces je dugotrajan. Na mehaničko micanje nafte utječe puno parametara, a jedan od najvažnijih je vrijeme. Na primjer, prilikom kiše ili jakog vjetra nastaju veliki valovi pri kojima je ovaj proces onemogućen. Također, dolazi do širenja područja s izljevom nafte. Brža metoda bila bi disperzija nafte, ali ona zahtijeva korištenje kemikalija koje su također štetne za okoliš (Ozonek, 2012).

Slika 20. prikazuje eksperimentalni hidrodinamički kavitacijski reaktor za disperziju nafte.

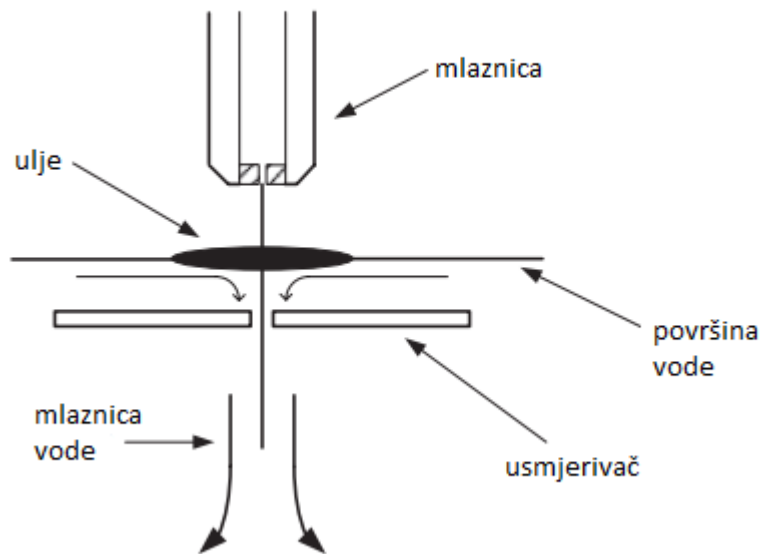


Slika 20. Shema kavitacijske mlaznice za disperziju ulja - submerzno (Ozonek, 2012).

Ova kavitacijska mlaznica postavljena je submerzno. Nagnuta je pod kutom od  $45^\circ$  na ciljnik kako bi učinak bio što bolji. Ciljnik je sastavljen od akrila, a na površini vode nalazi se sloj nafte. Kako bi disperzija bila dobra, mlaz mora udarati u granicu nafta – tekućina pa se postavlja 20 mm od ciljnika. Propuštanjem vode kroz mlaznicu dolazi do povećanja brzine tekućine i proizvodnje kavitacije. Takav mlaz putuje kroz vodu i udara u ciljnik. Ciljnik je ovdje potreban jer zaustavlja mlaz i omogućuje djelovanje kavitacije na naftu (Kato i sur., 2006).

Na isti princip napravljena je i druga mlaznica, samo što ona djeluje površinski (slika 21.). Mlaznica je postavljena 20 mm iznad razine nafte. Mlaz vode udara o površinu nafte, rasipa je te odnosi u unutarnje slojeve. Usmjerivač se nalazi 10 mm ispod razine vode, a po sredini sadrži provrt. Mlaz vode koji nosi kapljice nafte prolazi kroz taj provrt i raznosi kapljice nafte još dublje (Kato i su., 2006).

Površinski postavljena mlaznica ima bolje učinke od submerzne, pošto ima manji otpor prolasku mlaza. Ove izvedbe za disperziju nafte imaju bolju primjenu od kemikalija pošto ne djeluju negativno na okoliš. Ovako raspršene kapljice nafte imaju promjer manji od 50  $\mu\text{m}$ , što znači da se lako mogu iskoristiti od strane mikroorganizama ili pak rastaviti na  $\text{CO}_2$  i  $\text{H}_2\text{O}$  (Ozonek, 2012).



Slika 21. Shema kavitacijske mlaznice za disperziju ulja – površinski (Ozonek, 2012).

Ako se radi o otpadnoj vodi koja sadrži naftne derivate, ona se može pročistiti u flotacijskim tankovima. Flotacijski tankovi sadrže barijere i otprilike do 3 mala hidrodinamička reaktora. Hidrodinamički reaktori ovdje služe kao aeratori. Sastoje se od mlaznice koja na sebi ima usisnu cijev za zrak. Prilikom prolaska vode kroz mlaznicu dolazi do smanjenja tlaka i zrak se usisava, a zatim dolazi do komore za generaciju kavitacije. U komori se zbog turbulentnog strujanja proizvodi kavitacija i potom takva smjesa izlazi iz hidrodinamičkog reaktora. Mjehurići zraka uzdižu se prema površini noseći na sebi kapljice nafte, koja se prethodno dispergira, na barijerama ili u slobodnoj tekućini, djelovanjem kavitacijskih mjehurića. Na vrhu tanka je sakupljač, koji izuzima površinski sloj (Kolesnikow i sur., 1998).

### 3. ZAKLJUČAK

Na temelju različitih vrsta kavitacije, pregleda kavitacijskih značajki i parametara, usporedba reaktora i matematičkih modela, može se zaključiti:

1. Hidrodinamička kavitacija ima prednost pred svim oblicima kavitacije, ali glavni nedostatak svih izvedbi je erozija opreme.
2. Najpoželjnija vrsta kavitacije je prijelazna kavitacija u kombinaciji s pomičnom kavitacijom;
3. Hidrodinamički kavitacijski reaktor s kavitacijskom prigušnicom pokazuje najbolje učinke kavitacije te omogućava najjednostavniju izvedbu u veće mjerilo;
4. Pri izvedbi kavitacijske prigušnice, bolja je konstrukcija s više većih otvora, kako bi slobodna površina bila veća.
5. Kako bi prinos kavitacije bio veći, potreban je veći ulazni tlak reaktora, ali uz povećani oprez kako ne bi došlo do nastanka superkavitacije;
6. Za veći prinos kavitacije poželjno je formirati mjehuriće s manjim početnim radijusom, te odabrati fluid s većom površinskom napetosti, a manjom viskoznosti.



## 4. LITERATURA

- Ball, J. W., Tullis, J.P., Stripling, T. (1975) Predicting cavitation in sudden enlargements. *ASCE J. Hydraul. Div.* **101**, 857-870.
- Bikai, Z., Yan, H., Zhang, T., Zhuangyun, L. (2002) Experimental investigation of the flow characteristics of small orifices and valves in water hydraulics. *J. Process Mech. Engg.* **216**, 235-245.
- Brennan, C. E. (1995) *Cavitation and Bubble Dynamics*, Oxford University, New York.
- Chivate, M., Pandit, A. B. (1993) Effect of hydrodynamic & sonic cavitation on aqueous polymeric solutions. *Indian Chemical Engineer.* **35**, 52.
- Crnić, L. (2015) Oksidacijska desulfurizacija modelne otopine dizelskog goriva uz primjenu ultrazvuka (doktorska disertacija), Fakultet kemijskog inženjerstva i tehnologije, Sveučilišta u Zagrebu, Zagreb.
- Čurlin, M., Juretić, H., Smoljanić, G., Ljubas, D. (2018) Hydrodynamic cavitation effect as a tool for process intensification. *Book of Abstract Natural Resources green technology/sustainable development.* **3**, 110.
- Fujikawa, S., Akamatsu, T. (1980) Effects of the non-equilibrium condensation of vapour on the pressure wave produced by the collapse of a bubble in a liquid. *Journal of Fluid Mechanics.* **97**, 481–512.
- Gogate, P. R., Pandit, A. B. (2000) Engineering design method for cavitation reactors II: Hydrodynamic Cavitation. *AIChE Journal.* **46**, 164 –1649.
- Gogate, P. R., Pandit, A. B. (2001a) Hydrodynamic cavitation reactors: a state of the art review. *Reviews in chemical engineering.* **17**, 1-85.
- Gogate, P. R., Shirgaonkar, I. Z., Sivakumar, M., Senthilkumar, P., Vichare, N. P., Pandit, A. B. (2001b) Cavitation reactors: efficiency assessment using a model reaction. *AIChE Journal.* **47**, 2526-2538.
- Gogate, P. R. (2002) Cavitation: an auxiliary technique in wastewater treatment schemes. *Advances in Environmental Research.* **6**, 335-358.

- Gogate, P. R., Pandit, A. B. (2005) A review and assessment of hydrodynamic cavitation as a technology for the future. *Ultrasonics sonochemistry*. **12**, 21-27.
- Gogate, P.R. (2008) Treatment of wastewater streams containing phenolic compounds using hybrid techniques based on cavitation: A review of the current status and the way forward. *Ultrasonics Sonochemistry*. **15**, 1–15.
- Gogate, P. R., Kabadi, A. M. (2009) A review of applications of cavitation in biochemical engineering/biotechnology. *Biochemical Engineering Journal*. **44**, 60-72.
- Kanthale, P. M., Gogate, P. R., Wilhelm, A. M., Pandit, A. B. (2005) Dynamics of cavitation bubbles and design of cavitation reactor: cluster approach. *Ultrasonic Sonochem*. **12**, 441–452.
- Kato, H. (2001) Utilization of Cavitation for Environmental Protection-Killing Planktons and Dispersing Spilled Oil, < <http://resolver.caltech.edu/cav2001:sessionA4.005>.> Pristupljeno 25. listopada 2020.
- Kato, H. (2003) Cavitation, as a tool of environmental protection. Proceedings of the interdisciplinary conference on the Fifth international symposium on cavitation, Osaka, str. 1-4.
- Kato, H., Oe, Y., Honoki, M., Mochiki, T., Fukazawa, T. (2006) Dispersion of spilled oil by a cavitating jet at sea. *Journal of marine science and technology*. **11**, 131-138.
- Knapp, R. T., Daily, J. W., Hammitt, F. G. (1970) Cavitation, McGraw-Hill, New York.
- Koivula, T. S., Ellman, A. U. (1998) Cavitation behavior of hydraulic orifices and valves. *SAE Trans*. **107**, 387-393.
- Kolesnikow, S., Kilianow, M., Kolesnikow, J., Jabłoński, A., Jarecka, T. (1998) Wykorzystanie aparatów aerohydrokawitacyjnych do oczyszczania ścieków. *Ekoinżynieria*. **7**, 9-13.
- Ledakowicz, S., Miller, J. S., Olejnik, D. (2001) Oxidation of PAHs in water solution by ozone combined with ultraviolet radiation. *International Journal of Photoenergy*. **3**, 95–101.
- Litwinenko, A., Nekoż, O. I., Łukasik, K. (2005) Technologiczne zastosowanie kawitacji hydrodynamicznej: doświadczenia i perspektywy. Lubelskie Towarzystwo Naukowe, Lublin.
- Margulis, M.A. (2004) Sonochemistry as a new promising area on high energy chemistry. *High Energy Chemistry*. **38**, 135–142.

- Martinez, E., Gros, M., Lacorte, S., Barcelo, D. (2004) Simplified procedures for the analysis of polycyclic aromatic hydrocarbons in water, sediments and mussels. *J Chromatogr A*. **1047**, 181–188.
- Marty, J.C., Jallifier-Merlon, E. (1992) Gaseous Pollutants: Characterization and cycling. John Wiley and Sons, Inc, New York.
- Mason, T. J. (1999) Sonochemistry: current uses and future prospects in the chemical and processing industries. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*. **357**, 355-369.
- Mezule L., Tsyfansky S., Yakushevich V., Juhna T. (2009) A simple technique for water disinfection with hydrodynamic cavitation: Effect on survival of *Escherichia coli*. *Desalination*. **248**, 152–159.
- Milly, P.J., Toledo, R.T., Kerr, W.L., Armstead, D. (2007) Inactivation of food spoilage microorganisms by hydrodynamic cavitation to achieve pasteurization and sterilization of fluid foods. *Journal of Food Science*. **72**, 414–422.
- Mishra, K.P., Gogate, P.R. (2010) Intensification of degradation of Rhodamine B using hydrodynamic cavitation in the presence of additives. *Separation and Purification Technology*. **75**, 385–391.
- Moholkar, V. S., Pandit, A. B. (1997) Bubble behavior in hydrodynamic cavitation: effect of turbulence. *AIChE Journal*. **43**, 1641-1648.
- Moholkar, V. S., Pandit, A. B. (2001) Modeling of hydrodynamic cavitation reactors: a unified approach. *Chemical Engineering Science*. **56**, 6295-6302.
- Moss, W. C., Young, D. A., Harte, J. A., Levatin, J. L., Rozsnyai, B. F., Zimmerman, G.B., Zimmerman, I. H. (1999) Computed optical emissions from sonoluminescing bubble. *Phys. Rev. E*. **59**, 2986–2992.
- Mustapić, N. (2012) Intenzifikacija procesa proizvodnje biodizela pomoću kavitacije (doktorska disertacija), Tehnički fakultet, Sveučilišta u Rijeci, Rijeka.
- Naidu, D. V. P., Rajan, R., Kumar, R., Gandhi, K. S., Arakeri, V. H., Chandrasekaran, S. (1994) Modelling of a batch sonochemical reaction. *Chemical Engineering Science*. **49**, 877–888.

- Naumczyk, J., Dmochowska, A., Prokurat, I. (2006) Oczyszczanie odcieków ze składowisk odpadów komunalnych za pomocą wysokoefektywnych metod utleniania i elektrotleniania. *Gaz, Woda i Technika Sanitarna*. **3**, 33-37.
- Numachi, F., Yamabe, M., Oba, R. (1960) Cavitation effect on the discharge coefficient of the sharp-edge orifice plate. *J. Basic Eng.* **82**, 1-6.
- Nurick, N. H. (1976) Orifice cavitation and its effect on spray mixing. *J. Fluids Eng.* **98**, 681.
- Ozonek, J. (2012) Application of hydrodynamic cavitation in environmental engineering, Taylor & Francis Group, London.
- Pandit, A. B., Joshi, J. B. (1993) Hydrolysis of fatty oils: effect of cavitation. *Chemical Engineering Science*. **48**, 3440-3442.
- Parker, J. A., Darby, J. L. (1995) Particle-associated coliform in secondary effluents: shielding from ultraviolet light disinfection. *Water Environment Research*. **67**, 1065-1075.
- Pearce, I. D., Lichtarowicz, A. (1971) Discharge performance of long orifices with cavitating flow. Proceedings of Second Fluid Power Symposium, Guildford.
- Petrier, C., Gemal, A. L. Luche, J.L. (1982) Ultrasound in organic synthesis III: A simple high yield modification of the Bouveault reaction. *Tetrahedron Letters*. **23**, 3361–3364.
- Petrier, C., Lamy, M. F., Francony, A., Benahcene, A., David, B., Renaudin, V., Gondrexon, N. (1994) Sonochemical degradation of phenol in dilute aqueous solutions: comparison of the reaction rates at 20 and 487 kHz. *The Journal of Physical Chemistry*. **98**, 10514-10520.
- Plesset, M. S. (1970) Cavitation Erosion in Nonaqueous Liquids. *Trans. ASMEJ. Fluid Engng.* **92**, 807-813.
- Ptoszek, B., Kondrat, Z., Leszczyński, J. (2003) Usuwanie wybranych zanieczyszczeń z wody w procesie ozonowania z wykorzystaniem kawitacji. *Gaz, Woda i Technika Sanitarna*. **2**, 64-67.
- Rajan, R., Kumar, R., Gandhi, K. S. (1998) Modelling of sonochemical oxidation of the waterKI-CCl<sub>4</sub> system. *Chemical Engineering Science*. **53**, 255–271.
- Ramamurthi, K., Nandakumar, K. (1999) Characteristics of flow through small sharp-edged cylindrical orifices. *Flow Meas. Instrum.* **10**, 133-143.

- Rayleigh, L. (1917) On the pressure developed in a liquid during the collapse of spherical cavity. *Philosophical Magazine*. **34**, 94–98.
- Refaat, A. A. (2010) Different techniques for the production of biodiesel from waste vegetable oil. *International Journal of Environmental Science & Technology*. **7**, 183-213.
- Senthilkumar, P., Pandit, A.B. (1999) Modelling hydrodynamic cavitation. *Chem. Eng. Technol.* **22**, 1017–1027.
- Senthilkumar, P., Sivakumar, M. Pandit, A.B. (2000) Experimental quantification of chemical effects of hydrodynamic cavitation. *Chem.Engg. Sei.* **55**, 1633-1642.
- Shah, Y.T., Pandit, A.B. Moholkar, V.S. (1999) Cavitation Reaction Engineering. Plenum Publishers, Bombay.
- Sharma, A., Gogate, P. R., Mahulkar, A., Pandit, A. B. (2008) Modeling of hydrodynamic cavitation reactors based on orifice plates considering hydrodynamics and chemical reactions occurring in bubble. *Chemical Engineering Journal*. **143**, 201–209.
- Shirgaonkar, I. Z., Pandit, A. B. (1997) Degradation of aqueous solution of potassium iodide and sodium cyanide in the presence of carbon tetrachloride. *Ultrasonics sonochemistry*. **4**, 245-253.
- Sivakumar, M., Pandit, A.B. (2002) Wastewater treatment: a novel energy efficient hydrodynamic cavitation technique. *Ultrasonics Sonochemistry*. **9**, 123–131.
- Stankiewicz, A. I., Moulijn, J. A. (2000) Process intensification: transforming chemical engineering. *Chemical engineering progress*. **96**, 22-34.
- Storey, B. D., Szeri, A. J. (1999) Mixture segregation within sonoluminescence bubbles. *J. Fluid Mech.* **396**, 203-221.
- Suslick, K. S., Didenko, Y., Fang, M. M., Hyeon, T., Kolbeck, K. J., McNamara III, W. B., Wong, M. (1999) Acoustic cavitation and its chemical consequences. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*. **357**, 335-353.
- Šarc, A., Stepišnik-Perdih, T., Petkovšek, M., Dular, M. (2017) The issue of cavitation number value in studies of water treatment by hydrodynamic cavitation. *Ultrasonics Sonochemistry*. **34**, 51-59.

- Tullis, J. P. (1971) Choking and supercavitating valves. *ASCE J. Hydraul. Div.* **97**, 1931-1945.
- Tullis, J. P., Govindarajan, R. (1973) Cavitation and size scale effect for orifices. *ASCE J. Hydraul. Div.* **99**, 417-430.
- Uchiyama, T. (1998) Numerical simulation of cavitating flow using the upstream finite element Method. *Applied Mathematical Modelling.* **22**, 235–250.
- Vichare, N. P., Gogate, P. R., Pandit, A. B. (2000) Optimization of hydrodynamic cavitation using a model reaction. *Chemical Engineering & Technology: Industrial Chemistry-Plant Equipment-Process. Engineering-Biotechnology.* **23**, 683-690.
- Yamaguchi, A., Suzuki, T. (1980) Cavitation in hydraulic fluids. Part 3: On cavitation in long orifices. *J. Fluid Control.* **12**, 21-38.
- Yan, Y., Thorpe, R. B. (1990) Flow regime transitions due to cavitation in the flow through an orifice. *International journal of multiphase flow.* **16**, 1023-1045.
- Žeravica, I. (2017) Sonokemijska sinteza (doktorska disertacija), Zavod za opću, anorgansku i fizikalnu kemiju i metodiku kemije, Sveučilište Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku, Osijek.



Izv. prof.dr.sc. Mirjana Čurlin  
Zavod za procesno inženjerstvo  
Kabinet za osnove inženjerstva

Zagreb, 10. studenoga 2020.

#### IZJAVA O IZVORNOSTI

*Izjavljujem da je ovaj diplomski rad izvorni rezultat mojeg rada te da se u njegovoj izradi nisam koristio/la drugim izvorima, osim onih koji su u njemu navedeni.*

Marija Škof

(vlastoručni potpis)