

NUMERIČKA SIMULACIJA I OPTIMIZACIJA STRUJANJA FLUIDA U BIOREAKTORU POSTROJENJA ZA PREČIŠĆAVANJE OTPADNIH VODA

Sofija JOVANOVIĆ

Energoprojekt Hidroinženjering AD

prof. dr Ivan BOŽIĆ

Univerzitet u Beogradu - Mašinski fakultet

dr Biljana STOJANOVIĆ

IMLEK AD

prof. dr Branislava LEKIĆ

Univerzitet u Beogradu - Građevinski fakultet

Nikola KILIBARDA

Energoprojekt Hidroinženjering AD

REZIME

U bioreaktorima postrojenja za preradu otpadnih voda obavljaju se biološki procesi potpomognuti adekvatnim strujanjem mešavine aktivnog mulja i otpadne vode. U cilju postizanja što efikasnijeg rada bioreaktora od velikog značaja je poznavanje i analiza strujnog polja u njemu, utvrđivanje nepovoljnih zona strujanja, kao i određivanje odgovarajućih tehničkih rešenja za poboljšanje brzinskog polja i sveukupno unapređenje tretmana voda. U radu je primenom numeričke mehanike fluida izvršena analiza strujnog polja u bioreaktoru konkretnog postrojenja za preradu otpadnih voda (PPOV) u Republici Srbiji. Fokus analize strujanja u ovom radu je usmeren ka identifikaciji uticaja pojedinih parametara mešača na procese mešanja u bioreaktoru. Za ostvarivanje optimalnog mešanja tretirane vode u anaerobnoj i anoksi komori bioreaktora, pored osvrta na izbor broja mešača i mesta njihovog postavljanja, poseban osvrt je dat na uticaje promene konstruktivnih (prečnik) i eksploatacionih (brzina obrtanja obrtnog kola mešača) parametara na brzinsko polje. Prikazani rezultati ukazuju na mogućnost

unapređenja propisanih mera u cilju optimizacije rada ne samo analiziranog, već i drugih postojećih PPOV.

Ključne reči: otpadne vode, bioreaktor, numerička simulacija, mešač, optimizacija

1. UVOD

Otpadne vode su vode koje su korišćene u domaćinstvima, ustanovama, industrijskim procesima, atmosferske otpadne vode, koje nisu više pogone za svoju prvobitnu namenu bez prethodnog tretmana. Pre nego što se bezbedno ispuste u nazad u životnu sredinu, otpadne vode se moraju prečistiti kako bi se uklonile zagađujuće materije [1]. Ključne korake ka očuvanju ekološke ravnoteže i održivom korišćenju resursa predstavljaju izgradnja i optimalna eksploatacija postrojenja za prečišćavanje otpadnih voda (PPOV, eng. WWTP - Waste Water Treatment Plant). Unutar ovih kompleksnih sistema, bioreaktori igraju centralnu ulogu u procesima biološke razgradnje zagađujućih materija uz pomoć mikroorganizama. Efikasnost ovih procesa zavisi i od dinamike strujanja fluida unutar bioreaktora, budući da pravilno strujanje omogućava optimalnu distribuciju kiseonika i hranjivih materija, kao i adekvatnu interakciju između mikroorganizama i zagađujućih supstanci. S druge strane, nepravilnosti u strujanju mogu dovesti do formiranja tzv. „mrtvih“ zona, u kojima dolazi do akumulacije neželjenih produkata i smanjenja efikasnosti procesa prečišćavanja.

Podaci o prihvatanju članka

Primljen: 2.3.2024.

Ispravljen: -

Prihvaćen: 24.3.2024.

Kontakt: eph.spetrovic@gmail.com

Numerička simulacija fluida, zasnovana na metodama računске dinamike fluida (CFD – Computational Fluid Dynamics), je moćan alat za analizu i optimizaciju strujanja unutar biorektora kao što je prikazano u skorijem istraživanju [2]. CFD metode omogućavaju detaljnu analizu složenih hidrodinamičkih pojava što je od presudnog značaja za poboljšanje efikasnosti procesa prečišćavanja otpadnih voda.

Fokus ovog rada je da se, koristeći numeričke simulacije, izvrši optimizacija rada mešača i strujanja fluida u bioreктору, radi uočavanja i smanjenja mrtvih zona i povećanja efikasnosti procesa prečišćavanja otpadnih voda. Poseban akcenat je stavljen na uticaj različitih konstruktivnih parametara, poput broja, prečnika i brzine obrtanja mešača, na dinamiku strujanja i distribuciju mikroorganizama unutar anaerobne i anoksi komore biorektora. U radu [3] su prikazana detaljna numerička istraživanja i analize viševarijantnih tehničkih rešenja za unapređenje strujanja u bioreктору postrojenja za prečišćavanje otpadnih voda, dok je uticaj prečnika mešača na strujanje u bioreктору predstavljen u [4].

Kvalitet prečišćenih otpadnih voda koje se bezbedno mogu ispustiti u životnu sredinu je propisan zakonskom regulativom u kojoj su definisane granične vrednosti zagađujućih materija iznad kojih se otpadne vode moraju podvrgnuti odgovarajućim postupcima prečišćavanja pre ispuštanja u recipijent.

2. SITUACIJA SA PPOV U REPUBLICI SRBIJI

Zakonska regulativa koja se koristi u Republici Srbiji usvaja se na nacionalnom nivou, a usko je povezana sa regulativom u oblasti upravljanja otpadom [5].

Zakon o vodama uređuje pravni status voda, integralno upravljanje vodama, upravljanje vodnim objektima i vodnim zemljištem, izvore i način finansiranja vodne delatnosti, kao i druga pitanja značajna za upravljanje vodama. Odredbe ovog zakona odnose se na sve površinske i podzemne vode na teritoriji Republike Srbije. Iz ovog zakona proizašla je Uredba o graničnim vrednostima emisije zagađujućih materija u vode i rokovima za njihovo dostizanje („Službeni glasnik RS”, br. 67/2011, 48/2012 i 1/2016), prema kojoj ispuštanje otpadnih voda u recipijent vrši se u skladu sa aktom koji donosi nadležni organ jedinice lokalne samouprave (do usvajanja takvog akta primenjuju se granične vrednosti iz ove uredbe).

Navedeni Zakon o vodama usko je vezan za Zakon o zaštiti životne sredine, kojim je propisana primena adekvatnog tretmana otpadnih voda pre njihovog ispuštanja u recipijent.

U Republici Srbiji je 2016. godine stupio na snagu Akcioni plan za postepeno dostizanje graničnih vrednosti emisije zagađujućih materija u vode. Njime je propisano da je svako pravno lice koje ispušta otpadne vode ili ima svoje postrojenje za prečišćavanje vode, dužno da svoje emisije uskladi sa graničnim vrednostima emisije zagađujućih materija u vode, definisanih gorenavedenom Uredbom, najkasnije do 31. decembra 2025. godine.

Od regulative Evropske Unije pre svega treba pomenuti Direktivu 91/271/EEC o prečišćavanju komunalnih otpadnih voda za koju se smatra da je dovela do značajnog smanjenja emisije zagađujućih supstanci [5].

Ova direktiva je direktno vezana i primenjuje se samo uz Okvirnu direktivu o vodama (2000/60/EC).

Shodno ovoj Direktivi, sva naselja sa više od 2000 ekvivalent stanovnika moraju da imaju mehaničko i biološko prečišćavanje komunalnih otpadnih voda (članice Evropske unije su to morale uskladiti do 2005. godine).

Ova direktiva je delimično transponovana u regulativu Republike Srbije preko Zakona o vodama i niza podzakonskih akata.

Što se upravljanja muljem tiče, tri najvažnija dokumenta u zakonodavstvu EU su Direktiva o zaštiti životne sredine, a naročito zemljišta, pri korišćenju kanalizacionog mulja u poljoprivredi (SSD, 86/278/EEC), pomenuta direktiva 91/271/EEC i Uredba o utvrđivanju pravila o stavljanju proizvoda za đubrenje na raspolaganje na tržištu (Fertilizing Products Regulation FPR, 2019/1009) [5]. Direktiva 86/278/EEC je transponovana u regulativu Republike Srbije putem Uredbe o načinu i postupku upravljanja muljem iz postrojenja za prečišćavanje otpadnih voda („Službeni glasnik RS”, br. 103/2023).

Prema [5] Republika Srbija u oblasti tretmana otpadnih voda značajno zaostaje za okruženjem, a naročito za zemljama Evropske Unije. U Republici Srbiji trenutno postoji oko 50 ovakvih postrojenja, ali oko trećina njih realno nije u funkciji, dok je samo 5 sa tercijarnom preradom.

Kod 50% postrojenja trenutno postoje problemi u radu (usled kvara) ili smanjenog kapaciteta rada (usled predimenzionisanosti postrojenja) [5]. Dok većina postojećih postrojenja zahteva određena ulaganja (veća ili manja) kako bi neometano nastavila funkcionisanje, određeni broj zahteva potpunu rekonstrukciju ili izgradnju novog postrojenja.

Pored navedenih problema, ispuštanje industrijskih otpadnih voda bez prethodnog tretmana značajno utiče na pogoršanje kvaliteta ulazne vode, a samim tim se remete i biološki procesi.

Generalno, učinak postrojenja nije zadovoljavajući, ni sa stanovišta zaštite životne sredine, niti u ekonomskom smislu.

Predviđena je izgradnja većeg broja novih postrojenja – 165 postrojenja za čije sprovođenje je nadležno Ministarstvo građevinarstva, saobraćaja i infrastrukture, a koja treba da se finansiraju iz različitih izvora, kao što su IPA fondovi EU, Banka za razvoj Saveta EU, na osnovu međudržavnog sporazuma sa Narodnom Republikom Kinom, uz pomoć Mađarske i uz sufinansiranje KfW fonda.

Buduća postrojenja je potrebno projektovati, a postojeća prilagoditi, u meri u kojoj je to moguće, tako da se ostvare optimalni rezultati, što je predmet analiza izvršenih u ovom radu.

Bioreaktori su uređaji u kojima se mogu obavljati biološki i biohemijski procesi, odnosno sprovesti zamena supstrata u željeni proizvod, uz pomoć određenih biokatalizatora. Oni predstavljaju heterogene sisteme u kojima su implementirane 2 ili više faza samog ciklusa.

Procesi koji se odvijaju u bioreaktorima postoje i u vodotokovima, ali se oni u bioreaktorima odvijaju brže, zahvaljujući pogodnim uslovima koji vladaju u njima.

3. STUDIJA SLUČAJA - PREDMET OPTIMIZACIJE RADA MEŠAČA I STRUJANJA FLUIDA U BIOREAKTORU

Za potrebe numeričkih simulacija i analize strujanja izabran je bioreaktor PPOV u opštini Apatin, čije je modeliranje izvršeno na osnovu projektne dokumentacije koju je izradilo preduzeće 4 Waters d.o.o iz Beograda, prikazan na slici 1 i na slici 2.

Za sve prikaze i proračune usvojena je sledeća orijentacija koordinatnog sistema:

- X-osa: po dužini bioreaktora,
- Y-osa: po širini bioreaktora i
- Z-osa: po visini bioreaktora.

Drugim rečima, ose X i Y formiraju horizontalnu ravan, dok ose X i Z, odnosno Y i Z, formiraju vertikalne, međusobno upravne ravni.

Bioreaktor koji je predmet ovog rada sadrži tri komore:

- aerobnu,
- anoksi i
- anaerobnu komoru.

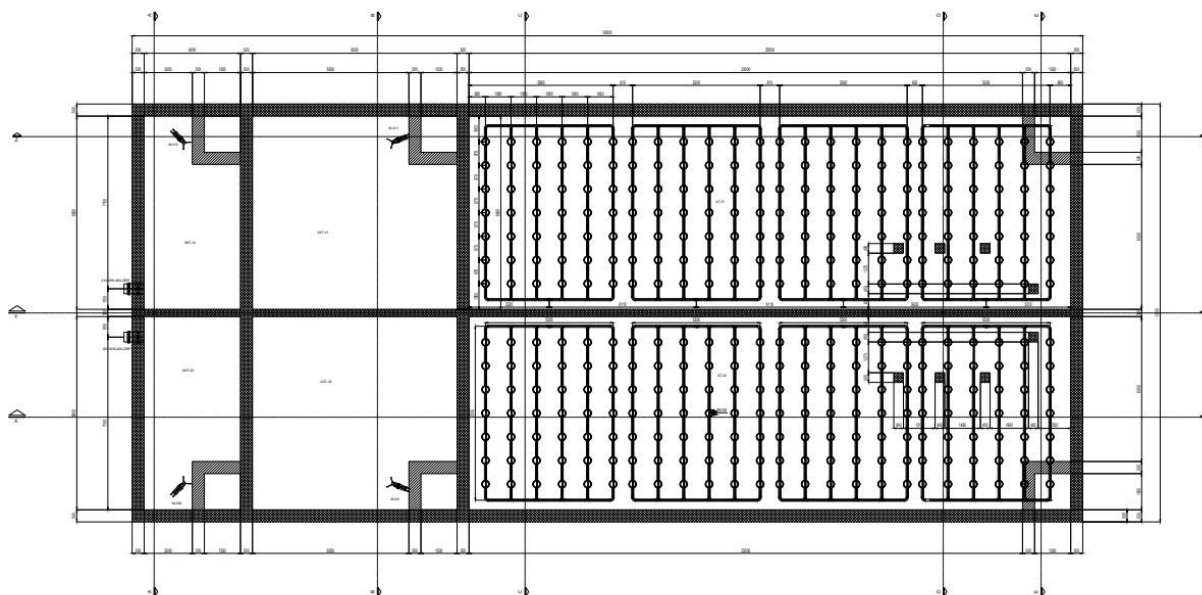
Za mikrobiološke procese u aerobnoj komori je prisustvo kiseonika od velikog značaja. Kiseonik se na konvencionalnim PPOV ubacuje u otpadnu vodu uduvavanjem vazduha. Prisustvo kiseonika u vodi podstiče aktivnost bakterija, protozoa i drugih mikroorganizama, što dovodi do razgradnje zagađujućih materija.

U anoksi komori, u tzv. anoksičnim uslovima, nema kiseonika (O_2) rastvorenog u vodi. Kiseonik može da bude prisutan u obliku nitrata (NO_3) i nitrita (NO_2). Ova komora je pogodna za uklanjanje jedinjenja azota, čime se izbegava zagađenje životne sredine tzv. nutrijentima.

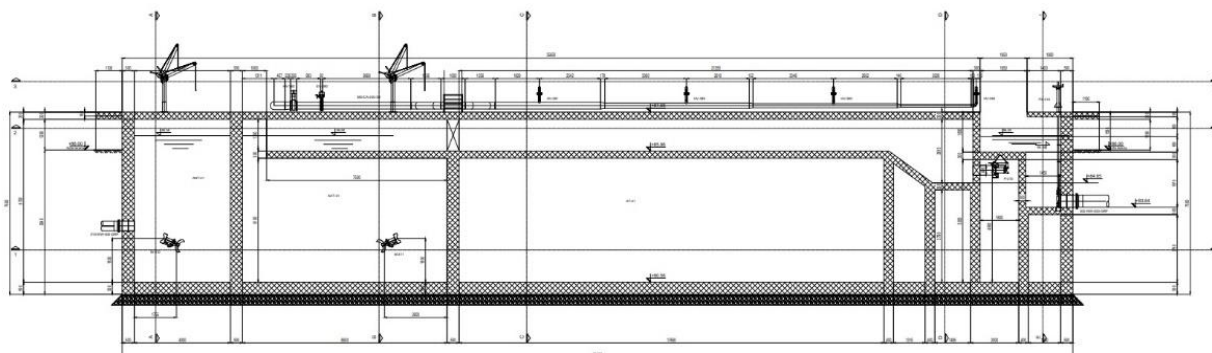
U anaerobnoj komori kiseonik nije prisutan ni u slobodnom, ni u vezanom obliku. Mikrobiološki procesi se obavljaju bez prisustva kiseonika i doprinose uklanjanju jedinjenja fosfora iz otpadnih voda.

U slučaju idealizovanog bioreaktora bi se u svim tačkama strujnog prostora ostvarivala željena strujna slika. U realnim bioreaktorima uvek postoje zone u kojima strujanje nije idealno kao i tzv. „mrtve“ zone. Prisustvo ovakvih zona nije poželjno, jer se procesi u njima ne odvijaju predviđenom dinamikom, a takođe je moguće i istaložavanje aktivnog mulja.

Jedna od nepoželjnih pojava u radu bioreaktora je i tzv. „short-circuit-ing“, odnosno, doslovno prevedeno, „formiranje strujanja kratkog spoja“. U ovom slučaju se formira direktna veza ulaza u reaktor i izlaza iz njega, tako da otpadna voda prolazi kroz njega, praktično ne podležući neophodnom mešanju, homogenizaciji i vremenu zadržavanja koje je neophodno za predviđeni tretman.



Slika 1. Prikaz bioreaktora u XY ravni [3]



Slika 2. Prikaz bioreaktora u XZ ravni [3]

Stoga je predmet optimizacije rada mešača u bioreaktoru upravo ostvarivanje željenog strujnog polja, odnosno optimalnog dejstva mešača. Optimizacija rada mešača predstavlja najvažniji doprinos ovog rada.

U cilju određivanja optimalnog tehničkog rešenja varirani su sledeći parametri:

- prečnik radnog kola mešača (0,4 i 0,6 mm),
- brzina obrtanja radnog kola mešača (500, 702 min^{-1}),
- broj mešača (1 ili 2).

Na ovaj način je simulacijom obuhvaćeno projektno rešenje (prečnik 0,4 m, brzina obrtanja 702 min^{-1}).

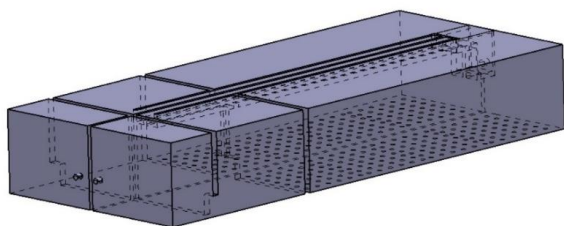
4. METODOLOGIJA

Predmetna optimizacije rada mešača je u radu izvršena primenom računске dinamike fluida, u daljem tekstu označene kao CFD (Computational Fluid Dynamics).

CFD se danas sve više koristi za rešavanje sličnih inženjerskih problema, čemu je doprineo i intenzivan razvoj računara, zbog čega se danas u inženjerskoj praksi mogu koristiti i modeli koji opisuju (turbulentno) strujanje, a koji se relativno daskora nisu mogli koristiti za praktičnu primenu. Dobar pregled ovih modela dat je u [6], a osnove postupka i dobar pregled numeričkih metoda su dati u [7-10]. Model turbulentnog strujanja

koji je primenjen u ovom radu za numeričke simulacije je SST (Shear Stress Transport) model. Ovaj model u sebi objedinjuje prednosti dva turbulentna modela $k-\epsilon$ (model koji je dovoljno pouzdan za primenu u „glavnom“ toku., tj. izvan graničnog sloja) i $k-\omega$ (o zoni graničnog sloja).

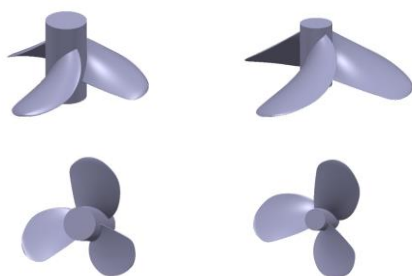
Na osnovu tehničke dokumentacije, izmodeliran je bioreaktor i formiran fluidni domen u okviru kog je dalje sprovedena analiza, slika 3.



Slika 3. Prikaz strujnog prostora bioreaktora

Kako bi se pojednostavio fizički objekat, odnosno racionalizovalo vreme potrebno za proračune i manje precizno predstavili elementi fizičkog objekta koji nisu od značaja za predmetne simulacije, akcenat će biti na vernom prikazivanju anaerobne komore i anoksi komore bez kanala u kojima su rađene simulacije.

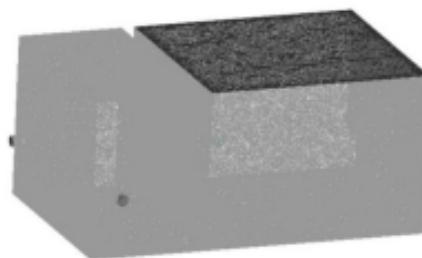
U drugoj fazi napravljeni su modeli mešača. Na sledećoj slici prikazani su redom mešači prečnika 0,4 i 0,6 m, kao na fizičkom objektu.



Slika 4. Model mešača prečnika 0,4 m i 0,6m

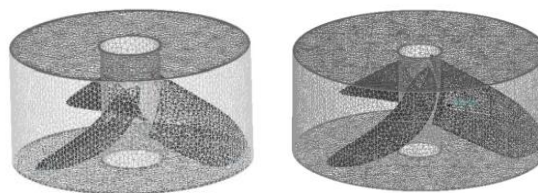
U trećoj fazi je formirana računaska mreža. Izbor broja tačaka (gustine, rezolucije) računaska mreže je korak koji ima veliki uticaj na tok simulacije. Premali broj tačaka može da dovede do netačnih rezultata, dok preveliki broj tačaka dovodi do dužine trajanja simulacije koja je neprihvatljiva za inženjerske proračune. Značajno je pomenuti i adaptivne metode, kojima se generiše mreža

koja nije uniformna, već sadrži veći broj tačaka na mestima gde to ima fizičko opravdanje (izraženiji gradijenti fizičkih veličina itd.). Tačnost proračuna može se proceniti preko konvergencije mreže. Ovaj koncept ima sličnosti sa iterativnim numeričkim postupcima - kada je razlika rezultata dobijenih u dve susedne iteracije manja od neke unapred definisane vrednosti, smatra se da je dostignuta zadovoljavajuća tačnost. Na sličan način se i računaska mreža može smatrati dovoljno pouzdanom kada se daljim povećanjem broja tačaka ne dostiže veća tačnost rezultata. Provera kvaliteta mreže, odnosno provera konvergencije rezultata simulacije za različiti broj elemenata mreže data je u [4]. Primer računaska mreže pojednostavljenog modela bioreaktora prikazana je na sledećoj slici.



Slika 5: Računska mreža za proračun pojednostavljenog modela bioreaktora

Na sličan način urađena je i računaska mreža modela mešača (Slika 6), a zatim su računaska mreže numerički spregnute.



Slika 6. Računska mreža mešača prečnika 0,4 m i 0,6m

Nakon generisanja mreža određeni su granični uslovi i definisana svojstva fluida. Usled ograničenosti raspoloživih računarskih kapaciteta u simulacionim procesima je korišćen stacionarni i izotermni model strujanja fluida. Zbog toga što simulacija dvokomponentnog strujanja vode i mulja zahteva značajne resurse za analizu složene mehanike raspršivanja pahuljastih čestica, odlučeno je da se proces pojednostavi – s obzirom na sličnu gustinu dvokomponentne mešavine u odnosu na vodu, odlučeno

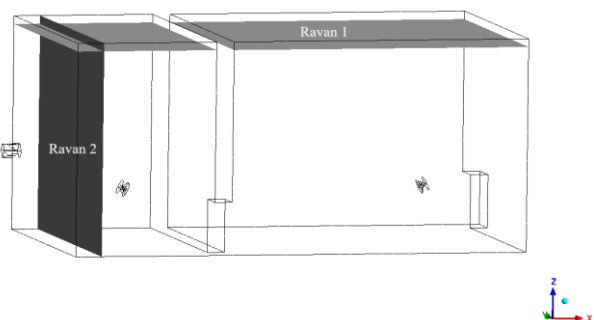
je da se voda koristi kao radni fluid. Ovo pojednostavljenje omogućava veću vremensku efikasnost simulacija, a pritom ne utiče na pouzdanost zaključka, zato što je primarna analiza zasnovana na dobijenom brzinskom polju. Osnovni granični uslov predstavljao je maseni protok fluida na ulazu u anaerobnu komoru bioreaktora (jednak 54,36 kg/s) i srednja vrednost pritiska na izlazu iz anoksi komore (koja iznosi 0,254 bar). Natpritisak na izlazu iz bioreaktora iznosio je 0,25 bar. Domen u kom se nalazi mešač je definisan kao rotirajući sa brzinama obrtanja od $n = 500 \text{ min}^{-1}$ i $n = 702 \text{ min}^{-1}$. Izvedeni su slučajevi kad je prisutan jedan mešač (u anaerobnoj komori) i kada su prisutna dva mešača (u anaerobnoj i anoksi komori).

5. REZULTATI I DISKUSIJA

Da bi se dobijeni rezultati mogli lakše vizuelizovati prostor bioreaktora podeljen je na sledeće površine:

- ravan 1: na 6,2 m od dna reaktora, u X-Y ravni,
- ravan 2: -18,5 m od dna reaktora, u Y-Z ravni,

Ova podela prikazana je na sledećoj slici.



Slika 7. Ravnii u kojima se prikazuju rezultati

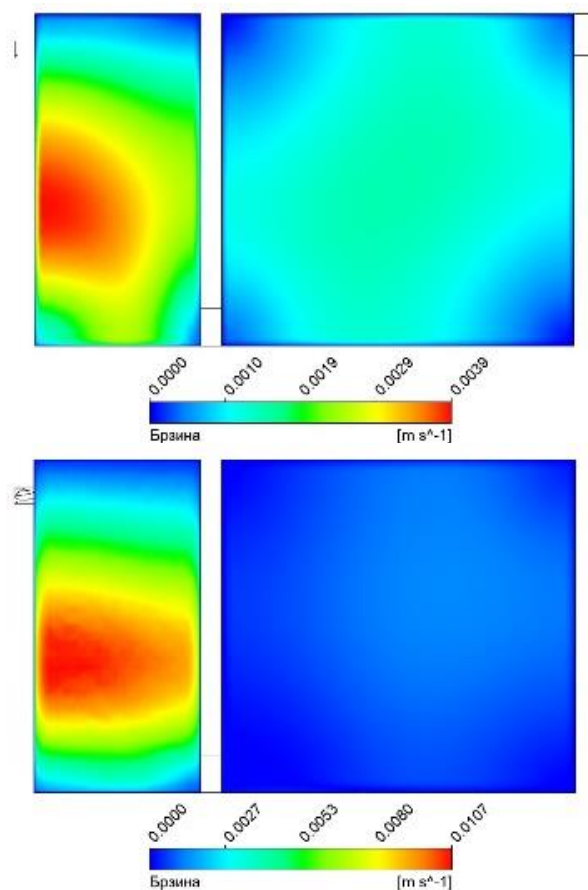
Zbog obima rada biće moguće prikazati samo deo dobijenih rezultata, odnosno one rezultate kojima su najviše indikativni.

Na slici 8 vidi se raspored brzina u anaerobnoj i anoksi komori, u ravni 1, pri radu mešača u anaerobnoj komori sa brzinom obrtanja jednakom 500 min^{-1} . Gore su prikazani rezultati za prečnik mešača koji je jednak 0,4 m, dok je prečnik dole jednak 0,6 m.

Maksimalna brzina strujanja izmerena u prvom slučaju iznosi 0,0039 m/s, dok je u drugom slučaju jednaka 0,0107 m/s, skoro tri puta više. Iako na prvi pogled deluje da je u prvom slučaju površina zona sa brzinama strujanja manja, to je primarno efekat načina prikazivanja.

U oba slučaja može se konstatovati da mešač u anaerobnoj komori nema veliki uticaj na strujno polje u anoksi komori. Ponovo u prvom slučaju način prikazivanja stvara privid da postoji uticaj mešača u anaerobnoj komori na anoksi komoru.

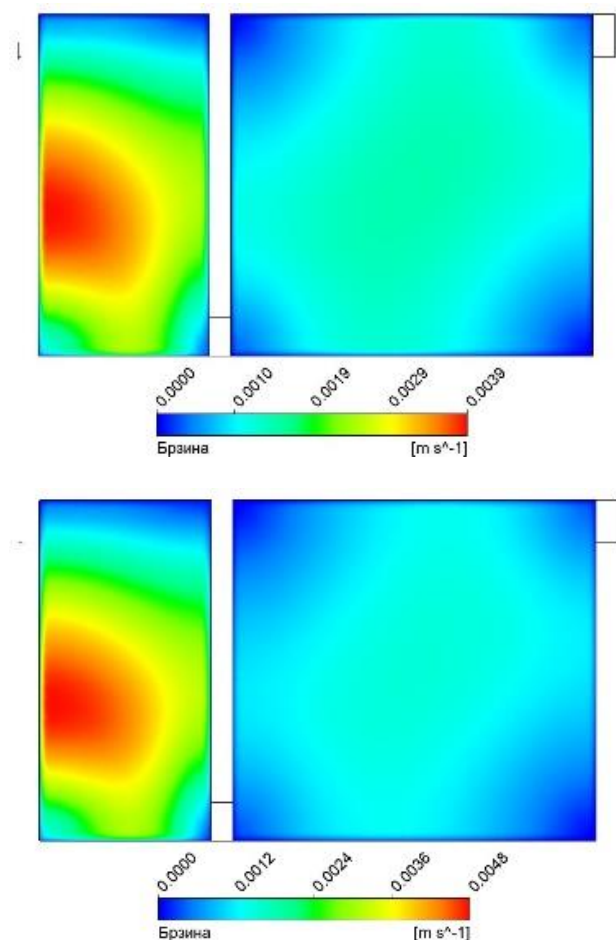
Ovde se jasno može identifikovati uticaj prečnika mešača pri jednakoj brzini obrtanja.



Slika 8. Ravan 1, jedan mešač, $n = 500 \text{ min}^{-1}$. Gore slika: prečnik mešača 0,4 m, dole prečnik 0,6 m.

Na slici 9 je prikazan raspored brzina u anaerobnoj i anoksi komori, u ravni 1, pri radu mešača u anaerobnoj komori sa prečnikom jednakim 0,4 m. Gore su prikazani rezultati za brzinu obrtanja jednaku 500 min^{-1} , a dole jednak 702 min^{-1} .

Sa slike se može uočiti da je strujna slika u oba slučaja sličnog oblika, ali su maksimalne brzine u drugom slučaju veće, 0,0048 m/s spram 0,0039 m/s.



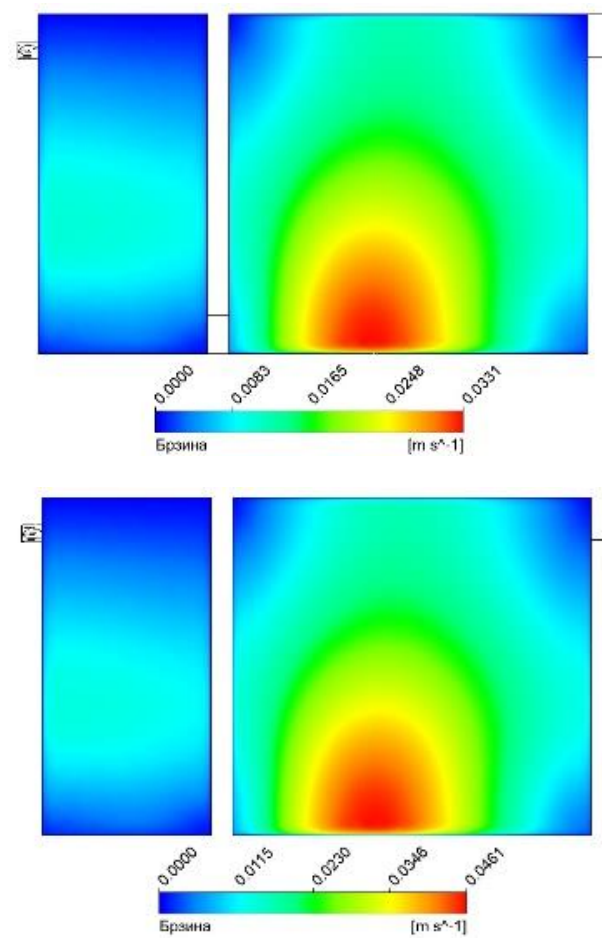
Slika 9. Ravan 1, jedan mešač, $d = 0,4$ m. Gore slika: brzina obrtanja mešača $n = 500 \text{ min}^{-1}$, dole $n = 702 \text{ min}^{-1}$.

Budući da je pri svim kombinacijama prečnika i brzina obrtanja mešača smeštenog u anaerobnoj komori konstatovan mali uticaj na anoksi komoru urađene su i simulacije rada sa dodatnim mešačem u anoksi komori.

Na slici 10 prikazana je situacija sa dva mešača, prečnika $0,6$ m, pri čemu se brzina obrtanja mešača menja od 500 do 702 min^{-1} .

Ovde se lako može uočiti uticaj brzine obrtanja mešača na maksimalne brzine u anaerobnoj komori.

Drugačijim načinom prikazivanja, kada su slične skale maksimalne brzine, uočavamo promenu izgleda strujne slike i pojavu mrtvih zona na osnovu promene prečnika mešača i brzine obrtanja.

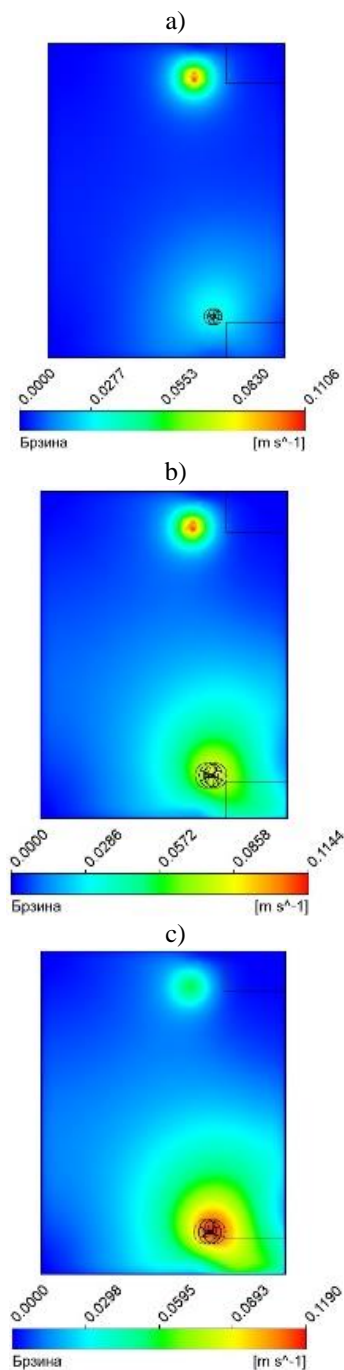


Slika 10. Ravan 1, dva mešača, $d = 0,6$ m. Gore slika: brzina obrtanja mešača $n = 500 \text{ min}^{-1}$, dole $n = 702 \text{ min}^{-1}$.

Izdvojena je slika 11 na kojoj je prikazan raspored brzina u anaerobnoj komori, pri radu mešača u anaerobnoj i anoksi komori u ravni 2. Slike redom: a) prečnik mešača $0,4$ m, brzina obrtanja 500 min^{-1} , b) prečnik mešača $0,6$ m, brzina obrtanja 500 min^{-1} , c) prečnik mešača $0,4$ m, brzina obrtanja 702 min^{-1} .

Efekti slični opisanim mogu se opisati i u drugim posmatranim preseccima, ali je sve rezultate nemoguće ovde predstaviti.

Mrtve zone u bioreaktoru PPOV su oblasti gde se mešanje tečnosti ne odvija efikasno ili uopšte, tj. gde je brzina jednaka nuli. Na osnovu rezultata detaljnih numeričkih istraživanja brzinskog polja u anaerobnoj i anoksičnoj komori bioreaktora, pored identifikovanih



Slika 11. Ravan 2, dva mešača, $d = 0,4$ i $0,6$ m. Slika: a) brzina obrtanja mešača $n = 500 \text{ min}^{-1}$, prečnik $d = 0,4$ m, b) brzina obrtanja mešača $n = 500 \text{ min}^{-1}$, prečnik $d = 0,6$ m, c) brzina obrtanja mešača $n = 702 \text{ min}^{-1}$, prečnik $d = 0,6$ m.

mrtvih zona, utvrđena su određena konstruktivna poboljšanja mešača radi unapređenja uslova strujanja. Jedno od rešenja podrazumeva ispitivanje uticaja promena prečnika i brzine obrtanja mešača na brzinu i raspodelu fluida unutar bioreaktora. Povećanje prečnika mešača može povećati volumen fluida koji se meša tokom rotacije, čime se smanjuju mrtve zone i poboljšava homogenost mešanja, dok se smanjenjem brzine obrtanja smanjuje interakcija mikroorganizama i zagađujućih supstanci i samim tim može doći do smanjenja efikasnosti biološkog tretmana.

6. ZAKLJUČAK

Ovaj rad ističe ključnu ulogu pravilnog strujanja fluida unutar bioreaktora u PPOV kao bitan faktor za efikasnost bioloških procesa. Jedan od ključnih preduslova za efikasno odvijanje procesa u bioreaktoru predstavlja formiranje povoljne strujne slike u njemu, što, pre svega znači svođenje površine mrtvih zona (zona sa brzinom strujanja otpadne vode bliskoj nuli) na najmanju moguću meru. Na strujno polje u komorama bioreaktora može da se utiče ugradnjom mešača, pri čemu njihovi konstruktivni (prečnik) i eksploatacioni (brzina obrtanja obrtnog kola mešača) parametri imaju veliki uticaj na konačni rezultat i potrebno ih je pažljivo izabrati i uskladiti.

U radu je ovaj složen proces izbora optimalnih parametara mešača izvršen za slučaj konkretnog bioreaktora u postrojenju za prečišćavanje otpadnih voda. Analiza je zasnovana na primeni numeričkih simulacija (CFD) strujanja u bioreaktoru uz variranje više parametara mešača.

Rezultati istraživanja pokazuju da povećanje prečnika mešača i broja obrtaja može značajno poboljšati homogenost mešanja i smanjiti mrtve zone, čime se povećava efikasnost prečišćavanja otpadnih voda. Na osnovu dobijenih rezultata dobijene su smernice za dalju optimizaciju, kao što je, na primer, mogućnost ugradnje mešača različitih prečnika kako bi se ostvarila njihova što bolja sinergija. Iako je analiza pojednostavljena korišćenjem vode kao radnog fluida, to ne utiče na pouzdanost zaključka, a daje osnovu za dalja istraživanja koja bi uključila simulacije dvokomponentnog strujanja. Ove, kao i druge mere koje će biti razmatrane u daljim istraživanjima, mogle bi da dovedu do daljeg unapređenja razmatranog i drugih bioreaktora, kako postojećih, tako i onih koji će tek biti koncipirani.

ZAHVALNICA

Autori rada zahvaljuju se preduzeću 4 Waters d.o.o. iz Beograda, koja je omogućilo korišćenje tehničke dokumentacije postrojenja za prečišćavanje otpadnih voda u opštini Apatin. Autori se takođe zahvaljuju i Ministarstvu nauke, tehnološkog razvoja i inovacija RS koje je podržalo navedeno istraživanje prema Ugovoru o finansiranju naučnoistraživačkog rada zaposlenih u nastavi na akreditovanim visokoškolskim ustanovama u 2024. godini br. 451-03-65/2024-03/200105 od 5.2.2024. godine.

LITERATURA

- [1] Povrenović D., Knežević, D.: „Osnove tehnologije prečišćavanja otpadnih voda“, Tehnološko-metalurški fakultet Univerziteta u Beogradu, 2013.
- [2] Elshaw, A., Nur M. S. Hassan, M. Masud K. Khan.: „Computational Fluid Dynamic Modelling and Optimisation of Wastewater Treatment Plant Bioreactor“, Fakultet za inženjerstvo i tehnologiju Univerziteta u Centralnom Kvinslendu, Rokhempton, Australija, 2018
- [3] Petrović S.: „Analiza viševarjantnih tehničkih rešenja za unapređenje strujanja u bioreктору postrojenja za prečišćavanje otpadnih voda“, M. Sc. rad, Mašinski fakultet Univerziteta u Beogradu, Beograd, Srbija, 2023.
- [4] Petrović S., Božić I., Lekić B., Ristić B.: „Analiza uticaja prečnika mešača na strujanje u bioreктору postrojenja za prečišćavanje otpadnih voda u Apatinu“, 37. Međunarodni kongres o procesnoj industriji – Procesing '24, str. 143 - 153
- [5] Bečelić-Tomin, M., Kerkez, Đ, Pešić, V., Dalmacija, B., Tomin, M., Bogdanović, P.: Analiza stanja u sektoru upravljanja komunalnim otpadnim vodama i smernice za dalji razvoj, Studija, Prirodno-matematički fakultet Univerziteta u Novom Sadu, Novi Sad, Srbija, februar 2024.
- [6] Pope, S. B.: "Turbulent Flows", Cambridge University Press, 2000
- [7] Anderson, J. D., Jr: "Computational Fluid Dynamics", McGraw-Hill, 1995
- [8] Versteeg, H.K., Malalasekera, W.: "An Introduction to CFD: The Finite Volume Method", Pearson, 1995
- [9] Patankar, S. V.: "Numerical Heat Transfer and Fluid Flow", CRC Press, 2018
- [10] Ferziger, J.H., Perić M., Street R. L.: "Computational Methods for Fluid Dynamics", Springer, 2019

NUMERICAL SIMULATION AND OPTIMIZATION OF FLUID FLOW IN THE WASTEWATER TREATMENT PLANT BIOREACTOR

by

Sofija JOVANOVIĆ
Energoprojekt Hidroinženjering AD
prof. dr Ivan BOŽIĆ
Mašinski fakultet u Beogradu
dr Biljana STOJANOVIĆ
IMLEK AD
prof. dr Branislava LEKIĆ
Građevinski fakultet u Beogradu
Nikola KILIBARDA
Energoprojekt Hidroinženjering AD

Summary

In bioreactors of wastewater treatment plants, biological processes based upon an adequate fluid flow are taking place. In order to achieve as effective as possible operation of a bioreactor, of utmost importance are knowledge and analysis of the flow field in it, determination of unfavorable flow zones, as well as the establishment of the corresponding designs for improvement of flow field and general improvement of water treatment. In present paper an analysis of a flow field in the bioreactor of the specific wastewater treatment plant (WWTP) in Republic of Serbia was performed by means of computational fluid dynamics (CFD). Flow analysis in this paper is focused on identification of influence of the individual mixer parameters upon the mixing processes in a bioreactor. In

order to achieve optimal mixing of treated water in the anaerobic and anoxic tanks of the bioreactor, in addition to reviewing the selection of the number of mixers and their locations, a special attention was given to the effects of changes of structural (mixer diameter and installation angle) and operational (mixer runner speed) parameters upon the velocity field. The results obtained indicate that there is room for improvement of prescribed measures with the objective of optimization of operation not only of the analyzed one, but the other existing WWTPs too.

Key words: wastewater, bioreactor, numerical simulation, mixer, optimization