

Elementi dimenzionisanja sekvencijalnih šaržnih reaktora (SBR) u sistemima prečišćavanja otpadnih voda

Prečišćavanje otpadnih voda u fazi sekundarne obrade najčešće se odvija u bioaeracionim bazenima i sekvencijalnim šaržnim reaktorima (SBR - Sequencing Batch Reactor). U radu se razmatraju osnovni elementi dimenzionisanja sekvencijalnih šaržnih reaktora za tretman otpadnih voda u fazi sekundarne obrade. Rad SBR sistema se zasniva na principu aerobne biološke obrade sa primenom aktivnog mulja (suspendovane mikroflora). Za aerobno biološko prečišćavanje potrebno je obezbediti dovoljnu količinu kiseonika, pri čemu se njegovo unošenje vrši udvajanjem vazduha ili mešanjem pomoću mehaničkih aeratora, čime se povećava površina kontakta. Karakteristike otpadnih voda (kvalitativne i kvantitativne) predstavljaju polazne podatke za rešavanje postupka za prečišćavanje i potrebnog stepena prečišćavanja za ispuštanje u vodotokove (recipijente).

Sekvencijalni šaržni reaktori - SBR

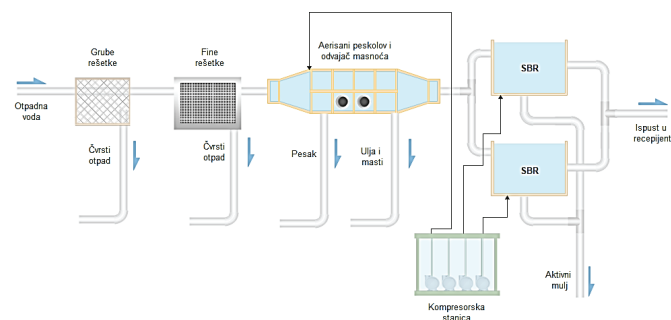
Prečišćavanje otpadnih voda u sekvencijalnom šaržnom reaktoru (SBR) se zasniva na principu aerobne biološke obrade sa primenom aktivnog mulja. SBR sistemi imaju široku primenu i najčešće se koriste za manje kapacitete (naselja, individualne objekte i sl.).

SBR postrojenje ima funkciju sekundarnog tretmana otpadne vode kome prethodi mehanički predtretman [1].

Mehanički predtretman je isti kao kod konvencionalnih postupaka sa aktivnim muljem i obuhvata propuštanje otpadne vode prvo kroz grubu rešetku sa mehanizmom za transport izdvojenog materijala, merenje protoka, propuštanje kroz finu rešetku i izdvajanje masti i peska (mastolovi i peskolovi). Pre ulaska u sistem sekundarne obrade SBR otpadna voda se zadržava u egalizacionom bazenu koji ima funkciju ujednačavanja sastava i uskladjivanje protoka sa radom SBR. Na slici 1 dat je šematski prikaz postupka prečišćavanja otpadnih voda koji se sastoji iz prethodne (mehaničke) obrade kao prve faze i biološke aerobne obrade sa primenom aktivnog mulja (u SBR postrojenju) kao druge faze.

Radni prostor SBR reaktorske posude može biti iz jednog ili dva dela. Kada je podeljen na dva dela u prvom se odvija taloženje i egalizacija ulazne otpadne vode, a u drugom biološka razgradnja organskih materija pomoću aktivnog mulja i sekundarno taloženje uz recirkulaciju mulja ka prvom delu. Prema tome tehnološki postupak

biološkog tretmana otpadnih voda u SBR postrojenju podrazumeva radni ciklus podeljen na nekoliko faza: punjenje reaktora i aeracija otpadne vode, mešanje otpadne vode, taloženje tretirane otpadne vode, dekantacija (odlivanje prečišćene vode), izdvajanje viška mulja i rezervno vreme ciklusa (slika 2).



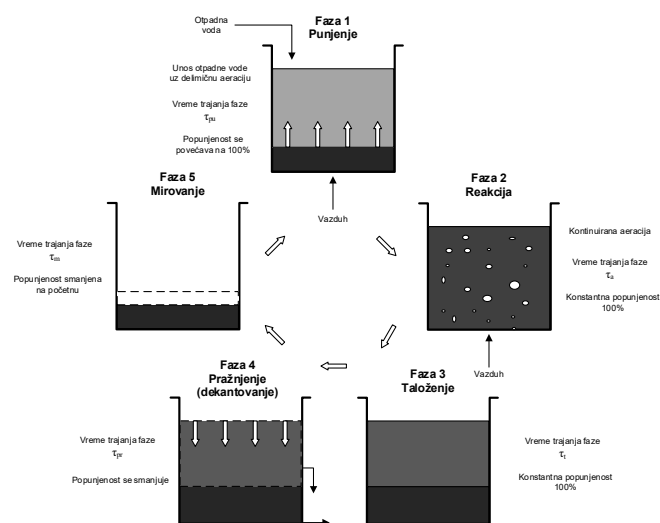
Slika 1: Šema postupka prethodne (mehaničke) i biološke aerobne obrade (SBR) za prečišćavanje otpadnih voda

Faze prečišćavanja se odvijaju po sledećem redosledu [2]:

1. Punjenje: SBR se puni otpadnom vodom;
2. Aeracija (proces intenzivne biološke obrade otpadnih voda): Pomoću kompresora i membranskih diskova postavljenih na dnu SBR udvaja se vazduh. Rad kompresora se kontroliše pomoću modula koji je smešten u komandnoj zgradi. Usled povećanog prisustva kiseonika u vodi dolazi do nastanka „aktivnog mulja“, sastavljenog od aerobnih bakterija. Bakterije „aktivnog mulja“ omogućuju biološku razgradnju organskih materija iz otpadne vode;
3. Talozjenje: Tokom ove faze aeracija se prekida. Smanjenje kretanja vode prouzrokuje da se biološki „aktivni mulj“, usled povećane mase taloži na dnu bazena, a u gornjem delu ostaje prečišćena voda;
4. Pražnjenje (dekantacija): U ovoj fazi se prečišćena otpadna voda prepumpava iz SBR u recipient. Deo mulja se odvodi na dalju obradu i deponovanje. U sistemu sa dve komore višak mulja sa dna komore za aeraciju se prepumpava nazad u prvu komoru;
5. Mirovanje: Faza mirovanja je period između dva punjenja.

SBR postupak se sve više koristi kao efikasna tehnologija za tretman otpadnih voda, naročito sanitarnih otpadnih voda, zbog jednostavne konstrukcije i načina rada (svi neophodni procesi se

odvijaju u vremenskim sekvencama u jednom reaktoru) kao i visoke efikasnosti u uklanjanju suspendovanih materija i BPK. Vreme trajanja i koncentracija kiseonika se mogu prilagođavati potrebama procesa.



Slika 2: Proces u sekvencionalnom šaržnom reaktoru (SBR)

Ovaj sistem je sličan konvencionalnom procesu sa aktivnim muljem. Razlika između ove dve tehnologije je što SBR vrši izjednačavanje, biološki tretman i sekundarno prečišćavanje u jednom rezervoaru korišćenjem vremenski kontrolisanih sekvenci. Punjenje SBR-a koje se najčešće koristi jeste naizmenično ili jednostepeno (single feed). Načini naizmeničnog punjenja mogu biti statični, mešani i aerisani. Statično punjenje, predstavlja punjenje u odsustvu aeracije i mešanja.

Razvoj SBR postupka imao je za cilj smanjenje ukupnih troškova prečišćavanja otpadnih voda i postizanje veće fleksibilnosti u radu. Koncept SBR postupka bez primarnog i sekundarnog taložnika omogućio je smanjenje dimenzija objekta odnosno potrebnog prostora za smeštaj, kao i smanjenje investicionih i eksploatacionih troškova. Potpuna automatizacija rada postrojenja omogućava smanjenje potrebne radne snage u odnosu na klasični postupak [1].

Najčešće se SBR postavljaju u paru (sem za sasvim male kapacitete) čime se omogućuje kvazikontinualni rad PPOV (postrojenja za prečišćavanje otpadnih voda). Kod većih kapaciteta uobičajeno je da se proces odvija u više SBR modula pojedinačnih manjih kapaciteta.

Polazne veličine za proračun biološkog reaktora (SBR)

Polaznu osnovu za proračun čine ulazni podaci koji se odnose na otpadnu vodu i dodatni iskustveni podaci za rad SBR. Osnovni podaci za otpadnu vodu su: ekvivalentni broj stanovnika N, količina otpadnih voda koja nastaje po ekvivalentnom stanovniku q (l/dan) i organsko opterećenje po ekvivalentnom stanovniku BPK5 (g/ES dan)

Ukupan dnevni protok otpadnih voda predstavlja proizvod broja ekvivalentnih stanovnika (ES) i specifične potrošnje po ekvivalentnom stanovniku:

$$\dot{Q} = N \cdot q, \text{ m}^3/\text{dan}.$$

Najbitniji parametri za projektovanje SBR, navedeni u tabeli 1, usvajaju se prema podacima iz literature za slučaj diskontinualnog (šaržnog) načina rada (Intermittent flow & Intermittent decant). U ovom procesu šaržni reaktor se puni otpadnom vodom do određenog nivoa i dodatna otpadna voda se ne dovodi dok se ne završe sve faze SBR procesa.

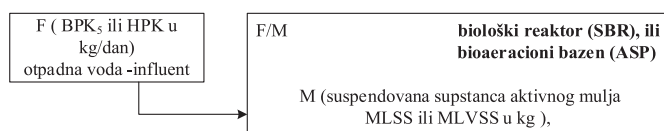
Tabela 1. Najvažniji parametri za projektovanje SBR sistema za otpadne vode [3]

Parametar	Oznaka	Jedinica
Odnos hranljivih materija i biomase	F/M	dan ⁻¹
Vreme trajanja ciklusa	τ_c	h
Koncentracija suspendovane materije aktivnog mulja	MLSS	mg/l
Ukupni prinos biomase u odnosu na supstrat	Y	kg/kg,

Opterećenje aktivnog mulja (F/M)

Opterećenje aktivnog mulja se definiše kao odnos hranljivih materija (otpadnih organskih materija) koje otpadna voda unosi u bioaeracioni bazen ili biološki reaktor SBR (izraženo preko HPK ili, češće BPK vrednosti) i mase mikroorganizama u bioaeracionom bazenu-reaktoru izražene kao masa suspendovane supstance aktivnog mulja (MLSS – mihed liquor suspended solids). MLSS se sastoji uglavnom od mikroorganizama, nerazgradljivih suspendovanih organskih supstanci i drugih inertnih suspendovanih supstanci [4].

U literaturi se najčešće opterećenje aktivnog mulja označava kao F/M odnos hranljivih materija i biomase (food – F to microorganism – M). Opterećenje aktivnog mulja je šematski prikazano na slici 3.



Slika 3: Šematski prikaz parametra F/M

Vrednost opterećenja aktivnog mulja F/M se može odrediti na sledeći način:

$$F/M = \frac{(BPK_5)_d}{MLSS \text{ ili } MLVSS}, \frac{\text{kg BPK}_5}{\text{kg} \cdot \text{dan}},$$

gde su:

(BPK₅)_d, kg BPK₅/dan, dnevna biološka potreba za kiseonikom, MLSS, kg, suspendovane materije aktivnog mulja u reaktoru, MLVSS, kg, volatilne suspendovane materije aktivnog mulja u reaktoru.

Za određivanje F/M se može koristiti parametar volatilne suspendovane materije aktivnog mulja u reaktoru MLVSS umesto

MLSS. MLVSS je volatilna frakcija MLSS i kreće se između 0,75 i 0,85 vrednosti MLSS, a obično se grubo izračunava kao $MLVSS = 0,80 \times MLSS$. Parametar MLVSS preciznije aproksimira ukupnu biološku masu mikroorganizama u procesu.

Opterećenje aktivnog mulja varira u zavisnosti od tipa postrojenja. Praćenje i pravovremeno korigovanje odnosa hrana/biomasa omogućava sprečavanje poremećaja procesa sa primenom aktivnog mulja.

Određivanje broja ciklusa i zapremine jednog punjenja

Ukupno vreme trajanja ciklusa τ_c u SBR definisano je izrazom [5]:

$$\tau_c = \tau_{pu} + \tau_a + \tau_t + \tau_{pr} + \tau_m$$

gde su:

- τ_{pu} , h, - vreme trajanja punjenja,
- τ_a , h, - vreme trajanja aeracije (reakcije),
- τ_t , h, - vreme trajanja taloženja,
- τ_{pr} , h, - vreme trajanja pražnjenja (dekatovanja),
- τ_m , h, - vreme trajanja mirovanja,

na osnovu čega se može definisati broj ciklusa u toku dana:

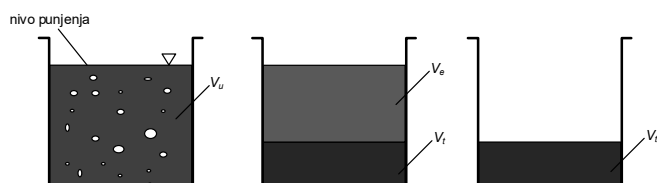
$$N_c = \frac{24}{\tau_c}$$

Za dnevni protok otpadne vode \dot{Q} i izračunati broj ciklusa N_c dobija se zapremina jednog punjenja (ciklusa):

$$V_c = \frac{\dot{Q}}{N_c}, \text{ m}^3/\text{ciklusu.}$$

Određivanje zapremine efluenta za pražnjenje (dekatovanje) po ciklusu

Na slici 4. šematski su predstavljene ukupna zapremina tečnosti u reaktoru - V_u , zapremina efluenta - V_e i zapremina mulja posle pražnjenja (dekatovanja) - V_t .



Slika 4: Karakteristične radne zapremine SBR

Ukupna zapremina tečnosti u reaktoru V_u (tj. zapremina jednog punjenja - V_c) definiše se kao zbir zapremine efluenta V_e i mulja V_t :

$$V_u = V_e + V_t, \text{ m}^3,$$

odnosno,

$$\frac{V_e}{V_u} + \frac{V_t}{V_u} = 1,$$

gde su:

V_e , m^3 , zapremina efluenta,

V_t , m^3 , zapremina mulja posle pražnjenja (dekatovanja).

Bilans suspendovane supstance aktivnog mulja je:

$$V_u \cdot x = V_t \cdot x_t,$$

gde su:

x , g/m^3 , koncentracija suspendovanih materija (MLSS) u reaktoru pre taloženja,

x_t , g/m^3 , koncentracija suspendovanih materija (MLSS) u istaloženoj zapremini.

Za određivanje x_t koristi se parametar *SVI* (Sludge Volume Index), tj. zapreminski indeks mulja, koji opisuje sposobnost mulja da se istaloži i sabije. Testom uzorka od 1-2 l vode poznate koncentracije suspendovanih materija (MLSS) posle 30 minuta taloženja određuje se zapremina 1 g istaloženog mulja tj. dobija se vrednost parametra *SVI* u ml/g.

Koncentracija suspendovanih materija (MLSS) u istaloženoj zapremini određuje se prema izrazu:

$$x_t = \frac{1}{SVI} \cdot 10^6, \text{ g}/\text{m}^3.$$

Po određivanju vrednosti koncentracije x_t , i na osnovu poznate koncentracije suspendovanih materija (MLSS) u reaktoru x , može se odrediti istaložena zapremina u reaktoru:

$$V_t = V_u \cdot \frac{x}{x_t}, \text{ m}^3,$$

odnosno zapremina efluenta:

$$V_e = V_u - V_t, \text{ m}^3.$$

Određivanje količine nastalog mulja

Za datu otpadnu vodu, ukupni prinos biomase (Y) će zavisiti od načina na koji je supstrat definisan preko BPK, ili HPK.

Masa otpadnog aktivnog mulja koja se proizvede na dnevnom nivou iznosi:

$$P_x = Y \cdot \dot{Q} \cdot (s_o - s) \cdot 10^{-3}, \text{ kg SM}/\text{dan},$$

gde su:

Y , g SM/g supstrata, ukupni prinos biomase,
 Q , m³/dan - protok otpadne vode (influenta),
 s_o , g/m³ - ulazna koncentracija suspendovanih materija (influenta),
 s , g/m³, - izlazna koncentracija suspendovanih materija (efluenta).

Prema iskustvima iz prakse, oko 50% mulja se vraća u prihvatnu komoru.

Na osnovu dnevne proizvodnje mulja, moguće je odrediti i proizvodnju mulja na godišnjem nivou:

$$(P_x)_{god} = P_x \cdot 365, \text{ kgSM/god.}$$

Postupak proračuna sistema za aeraciju

Za proračun sistema za aeraciju (distribuciju vazduha) potrebni su sledeći polazni podaci [6]: vrsta procesa, oblik i dimenzije biološkog reaktora, usvojeni sistem aeracije, protok vode koja se tretira (m³/h), organsko opterećenje vode izraženo preko BPK₅ u mg/l, ukupno organsko opterećenje bazena za aeraciju izraženo preko BPK₅ u kg/dan.

Ukupno dnevno organsko opterećenje predstavlja proizvod organskog opterećenja po ekvivalentnom stanovniku i broja ekvivalentnih stanovnika:

$$(BPK_5)_d = BPK_5 \cdot 10^3 \cdot N, \text{ kg BPK}_5/\text{dan}$$

gde su:

$\frac{\text{g BPK}_5}{\text{ES} \cdot \text{dan}}$, - organsko opterećenje po ekvivalentnom stanovniku i danu
 N , -, - broj ekvivalentnih stanovnika.

Dnevna potrebna količina kiseonika za oksidaciju organskog opterećenja je:

$$\dot{G}_{O_2} = (BPK_5)_d, \text{ kg BPK}_5/\text{dan}$$

Zapreminski protok vazduha za aeraciju je:

$$\dot{V}_v = \frac{\dot{V}_{O_2}}{a}, \frac{\text{m}^3}{\text{dan}}$$

gde su:

$\dot{V}_{O_2} = \frac{\dot{G}_{O_2}}{\rho_{O_2}} = \frac{\dot{G}_{O_2}}{1,429}, \frac{\text{m}^3}{\text{dan}}$ - zapreminski protok kiseonika,
 ρ_{O_2} , kg/m³ - gustina kiseonika na normalnim uslovima,
 a , m³/m³ - zapreminski udeo kiseonika u vazduhu.

Za stepen iskorišćenja vazduha η_v (%), potreban zapreminski protok vazduha iznosi:

$$\dot{V}_{vp} = \frac{\dot{V}_v}{\eta_v} \cdot 100, \frac{\text{m}^3}{\text{dan}}$$

Zapreminski protok vazduha u toku jednog ciklusa u biološkom reaktoru iznosi:

$$\dot{V}_{vp,c} = \frac{\dot{V}_{vp}}{n_c}, \frac{\text{m}^3}{\text{ciklus}}$$

gde je:

n_c , $\frac{\text{ciklus}}{\text{dan}}$ - broj ciklusa po danu.

Zapreminski protok vazduha (u m³/h) u toku perioda aeracije u jednom ciklusu iznosi:

$$(\dot{V}_{vp,c})_a = \frac{\dot{V}_{vp,c}}{\tau_a}, \frac{\text{m}^3}{\text{h}}$$

gde je:

τ_a , $\frac{\text{h}}{\text{ciklus}}$ - vreme trajanja aeracije po ciklusu.

Za izbor tipa distributera potrebni su podaci o tehničkim karakteristikama (dimenzije, kapacitet m³/h, materijal izrade, masa i dr.).

Na osnovu određenog zapreminskog protoka vazduha (u m³/h) u toku perioda aeracije i odabranog tipa distributera određuje se potreban broj distributera prema izrazu:

$$n_d = \frac{(\dot{V}_{vp,c})_a}{\dot{V}_d}$$

gde je:

\dot{V}_d , m³/h, - protok vazduha kroz jedan distributer.

Zaključak

Postupak za tretman otpadnih voda, u fazi sekundarne obrade sa primenom aktivnog mulja, u sekvencijalnom šaržnom reaktoru (SBR) se sve više koristi kao efikasna tehnologija za tretman otpadnih voda (posebno sanitarnih) zbog jednostavne konstrukcije i načina rada (svi neophodni procesi se odvijaju u vremenskim sekvencama u jednom reaktoru).

Polaznu osnovu za dimenzionisanje SBR čine ulazni podaci koji se odnose na otpadnu vodu i dodatni iskustveni podaci za rad SBR kao što su opterećenje aktivnog mulja (F/M), koncentracija suspendovanih materija (MLSS) u reaktoru, koeficijent prinosa biomase (Y) i dr. Razmatranjima u radu je obuhvaćeno: određivanje broja ciklusa i zapremine jednog punjenja, određivanje zapremine efluenta za pražnjenje (dekantovanje) po ciklusu, određivanje količine nastalog mulja i postupak proračuna sistema za aeraciju.

Poznavanje postupka za izbor tipa sekvencijalnog šaržnog reaktora (SBR) kao i određenih elemenata opreme značajno je za domaću inženjersku praksu u ovoj oblasti, a posebno zbog toga što postoji potreba uvođenja sistema za prečišćavanje otpadnih voda u velikom broju naseljenih mesta gde bi primena ovih sistema bila pogodna zbog svoje pristupačnosti, jednostavne instalacije i održavanja i visokog stepena prečišćavanja.

Literatura

- [1] **A. H. Mahvi**, *Sequencing batch reactor: a promising technology in wastewater treatment*, Iran. J. Environ. Heal. Sci. Eng., vol. 5, no. 2, pp. 79–90, 2008.
- [2] **D. Dohare and M. Kawale**, *Biological Treatment of Edible Oil Refinery Wastewater using Activated Sludge Process and Sequencing Batch Reactors - A Review*, Int. J. Eng. Sci. Res. Technol., vol. 3, no. 12, pp. 251–260, 2014.
- [3] *Wastewater Technology Fact Sheet: Sequencing Batch Reactors*, United States Environmental Protection Agency, Office of Water Washington, D.C., 1999.
- [4] **G. Tchobanoglous, F. L. Burton, and H. D. Stensel**, *Wastewater*

engineering: treatment and reuse, 4th edn. Metcalf & Eddy Inc. McGraw-Hill, New York, 2003.

[5] **M. H. Gerardi**, *Troubleshooting the sequencing batch reactor*. John Willey & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey, 2010.

[6] **M. Stanojević, S. Simić, D. Radić, and A. Jovović**, *Primena gasova u tretmanu voda*. Mašinski fakultet, Istočno Sarajevo, 2013.

Autori

Miroslav M. Stanojević
Univerzitet u Beogradu, Mašinski fakultet,
Kraljice Marije 16, 11120 Beograd, Srbija

Nikola V. Karličić
Univerzitet u Beogradu, Mašinski fakultet,
Kraljice Marije 16, 11120 Beograd, Srbija

Marko O. Obradović
Univerzitet u Beogradu, Mašinski fakultet,
Kraljice Marije 16, 11120 Beograd, Srbija