

DEFINISANJE POTROŠNJE VAZDUHA U PROCESU BIOLOŠKE OBRAD SANITARNIH OTPADNIH VODA U SEKVENCIJALNOM ŠARŽNOM REAKTORU (SBR) NA PRIMERU POSTROJENJA KAPACITETA 1000 ES

DETERMINATION OF AIR CONSUMPTION IN BIOLOGICAL PROCESS OF SANITARY WASTEWATER TREATMENT IN SEQUENCING BATCH REACTORS (SBR) ON THE EXAMPLE OF A PLANT WITH A CAPACITY OF 1000 ES

Ognjen ĐORĐEVIĆ*, Nikola KARLIČIĆ, Miroslav STANOJEVIĆ

University of Belgrade, Faculty of Mechanical Engineering, Belgrade

Prečišćavanje otpadnih voda primenom biološke obrade za slučajeve manjih kapaciteta najčešće se odvija u sekvencijalnim šaržnim reaktorima (SBR – Sequencing Batch Reactor). U radu se razmatra način definisanja potrošnje vazduha u SBR postrojenjima za tretman sanitarnih otpadnih voda u fazi biološke obrade. Specifičnost rada SBR postrojenja je odvijanje procesa u ciklusima koji se sastoje od više faza pri čemu se u pojedinim fazama vrši aeracija uvođenjem vazduha pomoću distributera – aeratora. Karakteristike otpadnih voda (kvalitativne i kvantitativne), potreban stepen prečišćavanja i vrsta postupka biološke obrade predstavljaju polazne podatke za definisanje potrošnje vazduha. Određivanje potrošnje vazduha, sa aspekta utroška energije koji čini najveći udeo u troškovima rada ovih postrojenja, kao i efikasnosti procesa aeracije od koje zavisi i efikasnost celokupnog tretmana, predstavlja bitan faktor pri projektovanju jednog SBR reaktora.

Ključne reči: *otpadne vode; sekvencijalni šaržni reaktor (SBR); biološki process; potrošnja vazduha*

Wastewater treatment using biological process for cases of smaller capacities usually takes place in sequential batch reactors (SBR - Sequencing Batch Reactor). The paper discusses the method of defining air consumption in SBR plants for sanitary wastewater treatment in the biological process phase. The specificity of the SBR plant operation is the development of processes in cycles consisting of several phases, whereby in some phases aeration is performed by introducing air using a distributor - aerator. The characteristics of wastewater (qualitative and quantitative), the required degree of purification and the type of biological treatment process are the starting data for defining air consumption. Determination of air consumption, from the aspect of energy consumption that makes a larger share in the costs of plant operation, as well as the efficiency of the aeration process on which the efficiency of the overall treatment depends, is an important factor in designing an SBR reactor.

Key words: *wastewater; sequencing batch reactors (SBR); biological treatment; air consumption*

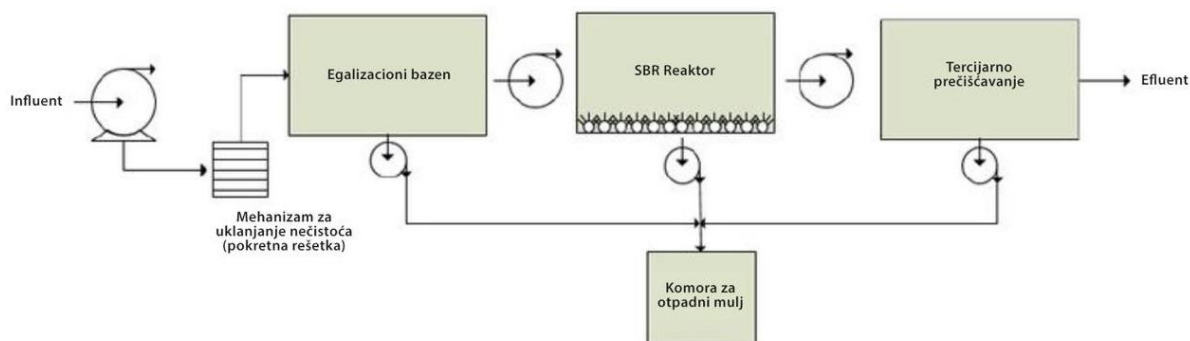
1 Uvod

Tretman otpadnih voda u postrojenju za prečišćavanje otpadnih voda sa SBR tehnologijom se odvija u ciklusima koji se sastoje od nekoliko faza sa unapred određenim vremenom trajanja. Nakon završetka jednog ciklusa, prečišćena voda (efluent) se ispušta u recipijent, a sledeća šarža ulazi u SBR reaktor.

Da bi se ceo proces odvijao efikasno i po unapred određenim vremenski sekvencama, SBR postrojenjem se upravlja PLC i SCADA sistemima. Kako se proces u SBR reaktoru odvija ciklično u šaržama, ispred reaktora se nalazi egalizacioni bazen koji služi za prihvatanje otpadne vode (slika 1). U egalizacionom bazenu se nalazi automatska fina rešetka za uklanjanje mehaničkih nečistoća, a ispred

* Corresponding author, e-mail: djordjevic.ognjen96@gmail.com

se može naći kombinovani uređaj sa grubom rešetkom u kome se još vrši uklanjanje peska, ulja i masnoća na peskolovu i mastolovu koji se nalaze u sklopu ovog uređaja.



Slika 1: Šema postrojenja za prečišćavanje otpadnih voda sa primenom SBR tehnologije [1]

2 Postupak definisanja potrošnje vazduha

Rad SBR sistema se zasniva na principu aerobne biološke obrade sa primenom aktivnog mulja (suspendovane mikroflore). Za biološko prečišćavanje potrebno je obezbediti dovoljnu količinu kiseonika, pri čemu se njegovo unošenje vrši uduvanjem vazduha pomoću distributera. Karakteristike otpadnih voda (kvalitativne i kvantitativne) predstavljaju polazne podatke za definisanje potrošnje vazduha i sistema za snabdevanje vazduhom.

U definisanju potrošnje vazduha (kiseonika) za proces biohemijske oksidacije organskih materija polazi se od određivanja stvarno potrebnog kiseonika (AOR – Actual Oxygen Requirement) prema izrazu:

$$\text{AOR} = (\text{BPK}_5)_d \cdot (0,9 \div 1,3) + (\text{NH}_3\text{-N})_d \cdot (4,3 \div 4,6), \text{ (kg/dan)}, \quad (1)$$

gde su:

- $(\text{BPK}_5)_d$, (kg/dan) – dnevna biološka potreba za kiseonikom,
 - $(\text{NH}_3\text{-N})_d$, (kg/dan) – dnevno amonijačno opterećenje,
- $(0,9 \div 1,3)$ je korekcionni faktor koji se usvaja za potrošnju kiseonika prilikom oksidacije BPK, dok se korekcionni faktor $(4,3 \div 4,6)$ odnosi na potrošnju kiseonika prilikom oksidacije amonijaka.

Dnevna biološka potreba za kiseonikom predstavlja proizvod organskog opterećenja po ekvivalentnom stanovniku i broja ekvivalentnih stanovnika:

$$(\text{BPK}_5)_d = N \cdot (\text{BPK}_5)_{\text{ES}} \cdot 10^3, \text{ (kg/dan)} \quad (2)$$

gde su:

$(\text{BPK}_5)_{\text{ES}}$, $\left(\frac{\text{g}}{\text{ES} \cdot \text{dan}}\right)$ - organsko opterećenje po ekvivalentnom stanovniku i danu,

N , (-) - ukupan broj ekvivalentnih stanovnika.

Dnevno amonijačno opterećenje se računa prema izrazu:

$$(\text{NH}_3\text{-N})_d = (\text{NH}_3\text{-N}) \cdot (\dot{Q}_d) \cdot 10^{-3}, \text{ (kg/dan)}, \quad (3)$$

gde su:

$(\text{NH}_3\text{-N})$, (mg/l) – amonijačno opterećenje otpadne vode,

(\dot{Q}_d) , (m^3/dan) – ukupan dnevni protok otpadne vode.

Ukupan dnevni protok otpadne vode definiše se na sledeći način:

$$(\dot{Q}_d) = N \cdot q_k, \text{ (m}^3/\text{dan)}, \quad (4)$$

gde su:

q_k , $1/(\text{ES} \cdot \text{dan})$ – količina otpadne vode koja nastaje po ES,

Količina otpadne vode koja nastaje po ES određuje se prema normi potrošnje vode, q_p , za usvojeni korekcionni faktor, η_{ES} (%), koji predstavlja dnevno opterećenje kanalizacione mreže:

$$q_k = \frac{\eta_{ES}}{100} \cdot q_p \cdot (1/(ES \cdot dan)), \quad (5)$$

gde su:

q_p , (l/(ES·dan)) – norma potrošnje vode po ES i danu,

η_{ES} , (%) – dnevno opterećenje kanalizacione mreže po ES.

Standardni potreban kiseonik (SOR – Standard Oxygen Requirement) predstavlja količinu kiseonika koju treba uneti u sistem kako bi se ostvarila (zadovoljila) stvarna potreba kiseonikom (AOR) nakon prilagodjavanja stvarnim uslovima sredine u bazenu (reaktoru) u koji se vazduh uvodi i određuje se prema izrazu:

$$SOR = AOR/K, \text{ (kg/dan)}, \quad (6)$$

gde je K faktor odnosa AOR i SOR.

Faktor K predstavlja korekciju stvarnog potrebnog kiseonika (AOR), kada se u obzir uzmu parametri koji utiču na transport kiseonika u vodi. Računa se preko sledećeg izraza:

$$K = a \left\{ \frac{\left[\beta \cdot \left(\frac{p_f}{p_{msl}} \right) \cdot C_{pov,t} \right] - C}{C_{pov,20}} \right\}^{\theta^{(t-20)}}, \quad (7)$$

gde su:

- α – vrednost odnosa koeficijenta masenog transfera za otpadnu i za čistu vodu (najčešće između 0,4 i 0,7 za aeraciju čistim mehurovima),
- t – radna temperatura otpadne vode,
- $\theta^{(t-20)}$ – temperaturni korekcionni faktor za t prema tabeli 1,
- β – vrednost faktora saturacije prilikom razlaganja kiseonika u vodi (kreće se između 95 i 99%),
- p_f – barometarski pritisak na lokaciji postrojenja,
- p_{msl} – barometarski pritisak na nivou mora. Odnos p_f/p_{msl} vrši korekciju za smanjenje rastvorljivosti kiseonika u vodi sa povećanjem nadmorske visine,
- C – koncentracija rastvorenog kiseonika u radnim uslovima koju je potrebno održavati [2],
- $C_{pov,20}$ – površinska koncentracija rastvorenog kiseonika na temperaturi od 20 °C za aeratore sa finom aeracijom i dubinom aeracije od 1,85 m, koji predstavlja najviši nivo tečnosti u SBR reaktoru [2],
- $C_{pov,t}$ – korigovana površinska koncentracija rastvorenog kiseonika za radnu temperaturu otpadne vode t i aeratore kojima se vrši aeracija.ž

Korigovana površinska koncentracija rastvorenog kiseonika $C_{pov,t}$ se računa prema sledećem izrazu:

$$C_{pov,t} = C_{pov,20} \cdot \frac{C_{O,pov,t}}{C_{O,pov,20}}, \text{ (mg/l)}, \quad (8)$$

gde vrednosti $C_{O,pov,t}$ predstavljaju tablične vrednosti površinske koncentracije rastvorenog kiseonika na nivou mora za različite temperature prema tabeli 2.

Kako bi se dobila vrednost standardnog potrebnog kisenika izražena po času (SOR)_h, u obzir se uzima ukupno trajanje procesa aeracije u jednom danu τ_a , tako se prema sledećem izrazu dobija:

$$(SOR)_h = SOR/\tau_a, \text{ (kg/h)}. \quad (9)$$

Tabela 1 Određivanje temperaturskog korekcionog faktora $\theta^{(t-20)}$

t (°C)	Vrednosti za $\theta^{(t-20)}$	t (°C)	Vrednosti za $\theta^{(t-20)}$
10	0,789	21	1,024
11	0,808	22	1,049
12	0,827	23	1,074
13	0,847	24	1,100
14	0,867	25	1,126
15	0,888	26	1,153
16	0,909	27	1,181
17	0,931	28	1,209
18	0,953	29	1,238
19	0,977	30	1,268
20	1,000		

Tabela 2 Vrednosti površinske koncentracije rastvorenog kiseonika na nivou mora za različite temperature izražene u °C

t (°C)	$C_{o,pov,ti}$	t (°C)	$C_{o,pov,ti}$
0	14,62	16	9,87
2	13,83	18	9,47
4	13,11	20	9,09
6	12,45	22	8,74
8	11,84	24	8,42
10	11,29	26	8,11
12	10,78	28	7,83
14	10,31	30	7,56

Kako bi se dobila vrednost standardnog potrebnog kiseonika izražena po času (SOR)_h, u obzir se uzima ukupno trajanje procesa aeracije u jednom danu τ_a , tako se prema sledećem izrazu dobija:

$$(SOR)_h = SOR/\tau_a, \text{ (kg/h)}. \quad (9)$$

Standardna efikasnost transfera kiseonika (SOTE - Standard Oxygen Transfer Efficiency) je deo kiseonika, uvedenog u aeracioni bazen, koji je prenet/rastvoren u tečnosti pri standardnim uslovima i predstavlja osnovni projektni parametar za difuzione procese aeracije. Određuje se tako što se efikasnost transfera kiseonika (OTE - Oxygen Transfer Efficiency) pomnoži sa gustinom kiseonika na temperaturi od 20 °C i atmosferskom pritisku, odnosno:

$$SOTE = OTE \cdot \rho_{O_2}, \text{ (kg/m}^3\text{)}. \quad (10)$$

OTE se dobija kada se stvarna dubina aeracije h_a pomnoži sa efikasnošću transfera kiseonika za dubinu aeracije od $h_{a1} = 1\text{m}$ čija vrednost iznosi 6,562 izraženo u %:

$$OTE = h_a \cdot 6,562, \text{ (%)}. \quad (11)$$

Potrošnja vazduha se dalje određuje tako što se standardni potreban kiseonik SOR podeli sa standardnom efikasnošću transfera kiseonika SOTE prema izrazu:

$$Q_v = SOR/SOTE, \text{ (m}^3\text{/h)}. \quad (12)$$

3 Primer određivanja potrošnje vazduha za SBR postrojenje za tretman otpadnih voda iz naselja kapaciteta 1000 ES

Za prečišćavanje sanitarnih otpadnih voda iz manjih naselja često se koriste SBR postrojenja kontejnerskog tipa čiji je pojedinačni kapacitet do 500 ES. Tako se za naselje sa 1000 ES, u ovom slučaju, postrojenje za tretman otpadnih voda sastoji od 2 dva SBR reaktora kapaciteta od po 500 ES. Iz toga razloga, definisanje potrošnje vazduha vrši se za jedan SBR reaktor kapaciteta 500 ES. Polazni podaci za definisanje potrošnje vazduha su prikazani u tabeli 3.

Tabela 3 Polazni podaci za proračun potrošnje vazduha

Veličina	Oznaka	Jedinica	Brojna vrednost
ukupan broj ekvivalentnih stanovnika	N	-	1000
norma potrošnje vode po ES i danu	q_p	l/(ES·dan)	200
dnevno opterećenje kanizacione mreže po ES	η_{ES}	%	80
količina otpadne vode koja nastaje po ES	q_k	l/(ES·dan)	160
organsko opterećenje po ES i danu	$(BPK_5)_{ES}$	g/(ES·dan)	60
amonijačno opterećenje otpadne vode	$NH_3 - N$	mg/l	25
radna temperatura otpadne vode	t	°C	14
barometarski pritisak na lokaciji postrojenja	P_f	mmHg	742,7
barometarski pritisak na nivou mora	P_{msl}	mmHg	760
koncentracija rastvorenog kiseonika pri radnim uslovima	C	mg/l	2
korigovana površinska koncentracija rastvorenog kiseonika	$C_{pov,t}$	mg/l	10,88

Projektni parametri jednog SBR reaktora su prikazani u tabeli 4, a veličine određene u postupku definisanja potrošnje vazduha u tabeli 5.

Tabela 4 Projektni parametri jednog SBR reaktora

Veličina	Oznaka	Jedinica	Brojna vrednost
ukupan broj ciklusa u toku jednog dana	N_c	-	4
trajanje jednog ciklusa	τ_c	h	6
trajanje procesa aeracije u toku jednog ciklusa	τ_a	h	3
zapremina jedne šarže	V_r	m ³	20
protok otpadne vode u toku dana	$(\dot{Q}_d)_{SBR}$	m ³ /dan	80
visina tečnosti (dubina aeracije)	h_a	m	1,85

Tabela 5 Veličine za definisanje potrošnje vazduha

Veličina	Oznaka	Jedinica	Brojna vrednost
organsko opterećenje po ES i danu za jedan SBR reaktor	$(BPK_5)_{d,SBR}$	kg/dan	30
dnevno amonijačno opterećenje za jedan SBR reaktor	$(NH_3 - N)_d$	kg/dan	2
stvarni potreban kiseonik	AOR	kg/dan	41,9
koeficijent odnosa SOR i AOR	K	-	0,395
standardni potreban kiseonik	SOR	kg/h	8,84
efikasnost transfera kiseonika	OTE	%	12,14
standardna efikasnost transfera kiseonika	SOTE	kg/m ³	0,0338
potrošnja vazduha	Q_v	m ³ /h	261,528

4 Zaključak

Za projektovanje sistema za aeraciju (distribuciju vazduha) potrebno je imati podatke o: vrsti odabranog procesa, obliku i dimenzijama biološkog reaktora, usvojenom tipu sistema aeracije, protoku otpadne vode koja se tretira, organskom opterećenju vode izraženom preko BPK_5 , amonijačnom opterećenju otpadne vode i dr. Drugi uslovi koji utiču na efikasnost aeracije koje treba uzeti u obzir obuhvataju lokaciju postrojenja odnosno nadmorsku visinu, temperaturu okoline i visinu tečnosti (dubinu aeracije). Na osnovu definisanja potrošnje vazduha vrši se izbor uređaja za snabdevanje vazduhom: kompresora – duvaljke, difuzora – distributera vazduha i ostalih delova sistema.

U radu je razmatran slučaj određivanja potrošnje vazduha za prečišćavanje sanitarnih otpadnih voda za SBR postrojenja koja se često koriste za manja naselja. U našoj zemlji 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, održavanja i visokog stepena prečišćavanja.

Pri izboru sistema aeracije treba imati u vidu da se njihov uticaj u radu postrojenja odražava na efikasnost prečišćavanja, potrošnju energije i održavanje u toku eksploatacije.

5 Reference

- [1] *** Report, S., 2022. SBR Design Report.[online] Issuu. Available at: <https://issuu.com/tnls/docs/design_report> [Accessed 18 January 2022],
- [2] **Muelle, A. James, Boyle, C. William, Johannes Popel, H.**, Aeration: Principles and Practice, CRC Press, United States of America, 2002
- [3] *** "Design Manual Fine Pore Aeration Systems", US EPA, EPA/625/1-89/023, 1989.
- [4] **Michael H. Gerardi**, Troubleshooting the Sequencing Batch reactor, John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey, 2010.
- [5] *** "Aeration Manual of Practice No. FD-13", Water Pollution Control Federation, 1988.