

Primljen / Received: 12.4.2016.

Ispravljen / Corrected: 17.1.2017.

Prihvaćen / Accepted: 28.3.2017.

Dostupno online / Available online: 10.12.2017.

Važnost prethodnih taložnica na SBR uređajima s drugim stupnjem pročišćavanja

Autori:



Doc.dr.sc. **Dražen Vouk**, dipl.ing.grad.
Sveučilište u Zagrebu
Građevinski fakultet
dvouk@grad.hr



Domagoj Nakić, mag. ing. aedif.
Sveučilište u Zagrebu
Građevinski fakultet
dnakic@grad.hr



Prof.dr.sc. **Davor Malus**, dipl.ing.grad.
(Profesor u mirovini)
malus@grad.hr



Sanja Horvat, dipl.ing.kem.
Koprivničke vode d.o.o.
sh.inzenjering@kc.t-com.hr

Prethodno priopćenje

Dražen Vouk, Domagoj Nakić, Davor Malus, Sanja Horvat

Važnost prethodnih taložnica na SBR uređajima s drugim stupnjem pročišćavanja

SBR tehnologija predstavlja modifikaciju konvencionalnog postupka s aktivnim muljem na principu šaržnog punjenja bioreaktora. Smanjenje ukupnog potrebnog volumena SBR reaktora s drugim stupnjem pročišćavanja može se ostvariti uz prethodnu taložnicu kao prvi stupanj pročišćavanja ispred SBR reaktora, što je osobito izraženo kod uređaja za pročišćavanje većeg kapaciteta kojima prethodi razdjelni sustav odvodnje. Uz izgradnju prethodnih taložnica ispred SBR reaktora, smanjuje se potrošnja kisika u odnosu na SBR uređaje bez prethodnih taložnica.

Ključne riječi:

otpadne vode, uređaj za pročišćavanje, SBR, prethodna taložnica

Preliminary report

Dražen Vouk, Domagoj Nakić, Davor Malus, Sanja Horvat

Role of primary settling tanks on SBR plants for secondary treatment

The SBR technology is a modification of a conventional treatment process with active sludge technology based on the principle of batch loading of a bioreactor. Reduction of the total required volume of the SBR plants for secondary treatment can be achieved using the primary settling tanks as the first stage of treatment, before the SBR process. This is particularly evident in large-capacity plants preceded by separate (sanitary) sewerage systems. By introducing primary settling tanks in front of the SBR, the oxygen consumption decreases as compared to SBR without primary settling tanks.

Key words:

wastewater, wastewater treatment plant, SBR, primary settling tank

Vorherige Mitteilung

Dražen Vouk, Domagoj Nakić, Davor Malus, Sanja Horvat

Bedeutung vorklärender Absetzbecken bei SBR Anlagen mit zweiter Reinigungsstufe

Die SBR Technologie stellt eine Modifikation des konventionellen Vorgangs mit aktivem Schlamm basierend auf dem Prinzip der Chargenfüllung des Bioreaktors da. Ein Abmindern des gesamten notwendigen Volumens des SBR Reaktors mit zweiter Reinigungsstufe kann durch vorklärende Absetzbecken vor dem SBR Reaktor in der ersten Reinigungsstufe erzielt werden. Dies ist besonders wichtig bei Kläranlagen größerer Kapazitäten, denen ein Trennsystem zur Entwässerung voransteht. Durch den Bau vorklärender Absetzbecken vor dem SBR Reaktor vermindert sich der Sauerstoffverbrauch im Vergleich zu SBR Anlagen ohne vorklärende Absetzbecken.

Schlüsselwörter:

Abwasser, Kläranlage, SBR, vorklärende Absetzbecken

1. Uvod

Za kvalitetan, učinkovit i dugoročan rad uređaja za pročišćavanje otpadnih voda (UPOV) izuzetno je važno odabrati optimalnu tehnologiju pročišćavanja (konvencionalni postupak s aktivnim muljem, istovremena stabilizacija, MBBR, biofiltracija, MBR, SBR i dr.). Čak je i uz odabir optimalne tehnologije pročišćavanja izuzetno važno odabrati odgovarajuće tehničko-tehnološko rješenje cjelovite linije vode i obrade mulja. Pritom je potrebno definirati funkciju, broj, raspored i veličinu pojedinih objekata.

Uređaji s aktivnim muljem obično su projektirani za kontinuirani (protočni) princip rada i postali su široko prihvaćeni kao ekonomičan i učinkovit način biološkog pročišćavanja otpadnih voda. SBR (eng. *Sequencing Batch Reactor*) tehnologija predstavlja modifikaciju konvencionalnog postupka s aktivnim muljem na principu šaržnog (intervalnog) načina rada bioreaktora, koja i u hrvatskim okvirima predstavlja prihvatljivo tehnološko rješenje. SBR tehnologija uspješno se može primijeniti za drugi i treći stupanj pročišćavanja. SBR tehnologija se odlikuje visokom učinkovitošću pročišćavanja otpadne vode (tablica 1). Uz učinkovitost pročišćavanja, SBR tehnologija zadovoljava sve bitne aspekte – funkcionalnost, pogon i održavanje, troškovi poslovanja.

Tablica 1. Učinkovitost pročišćavanja uz SBR uređaje [1-7]

Parametar	Izlazne koncentracije (drugi stupanj pročišćavanja)	Izlazne koncentracije (treći stupanj pročišćavanja)
Suspendirana tvar	< 10 mg/l	< 5 mg/l
KPK	< 75 mg/l	< 70 mg/l
BPK ₅	< 20 mg/l	< 15 mg/l
Ukupni fosfor	< 10 mg/l	< 1 mg/l
TNK	< 40 mg/l	< 10 mg/l
Amonijak	< 5 mg/l	< 5 mg/l

Osnovni ciljevi razvoja SBR tehnologije jesu smanjiti ukupne troškove pročišćavanja otpadnih voda te postići veću fleksibilnost u radu. Jedna od značajnih mogućnosti u tom kontekstu jest i smanjenje ukupnog potrebnog volumena objekata za obradu otpadne vode, prije svega izostanak potrebe za naknadnim taložnicama uz primjenu SBR tehnologije. Osim toga, SBR uređaji omogućuju izbor hoće li ili neće postojati prvi stupanj pročišćavanja, što je rezultat odabrane konfiguracije na temelju detaljnih proračuna. Pritom se u okviru prvog stupnja pročišćavanja najčešće razmatra primjena prethodnih taložnica (u daljnjem tekstu taložnica ili PT).

Ovim radom definiraju se granice isplativosti primjene prethodnih taložnica kod SBR uređaja s drugim stupnjem pročišćavanja, ovisno o veličini uređaja (broj ES) i tipu kanalizacijskog sustava (razdjelni ili mješoviti). Navedeno je razmatrano u kontekstu potrebnog volumnog prostora objekata uređaja na liniji vode. Dodatno su razmatrani i pogonski troškovi uređaja, prije svega na osnovi potreba za kisikom (aeracija SBR reaktora).

2. SBR uređaj

2.1. Konfiguracija SBR uređaja

Prvu fazu obrade otpadne vode na SBR uređaju čini mehanički predtretman, koji je u pravilu identičan onom kod konvencionalnog postupka s aktivnim muljem. Ovisno o odabranom tehničko-tehnološkom rješenju, mehanički predtretman može obuhvaćati grube rešetke, fine rešetke (fina sita) te aerirani pjeskolov-mastolov. Moguća je i primjena varijantnih rješenja mehaničkog predtretmana koja se nalaze integrirana zajedno s prvim stupnjem pročišćavanja (npr. mikrofiltracija i dr.).

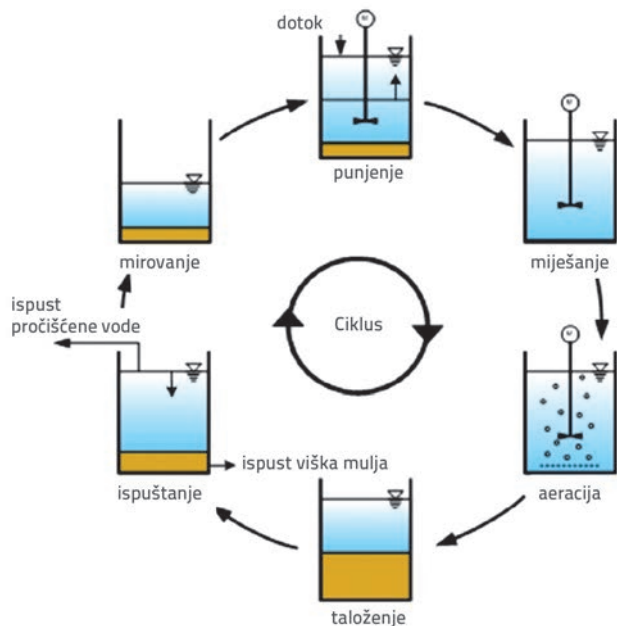
Prvi stupanj pročišćavanja nije kod SBR uređaja obavezan, odnosno nije nužno na liniji vode osigurati prvi stupanj pročišćavanja. Drugim riječima, SBR uređaj može i ne mora sadržavati prvi stupanj pročišćavanja [8]. Prvi stupanj pročišćavanja osigurava uklanjanje ukupne raspršene tvari (TSS) za minimalno 50 % te uklanjanje organske tvari (BPK₅) za minimalno 20 %, a dodatno se u manjoj mjeri uklanja ukupni dušik i fosfor (za približno 10 %). Uz prvi stupanj pročišćavanja osigurava se smanjenje opterećenja otpadnom tvari SBR reaktora. Najčešće korišteni oblik prvog stupnja pročišćavanja jesu taložnice. Prednost njihove primjene može biti i smanjenje hidrauličkog opterećenja SBR reaktora, ako se oblikuju i dimenzioniraju u funkciji egalizacijskog bazena. Postoje i varijantna rješenja prvog stupnja pročišćavanja – taložnice s lamelama, modificirane taložnice s lamelama (npr. tipa kao Aciflow-Veolia), uređaji za mikrofiltraciju (npr. tipa kao Salsnes filter) i dr. Prednosti prethodno izdvojenih varijantnih rješenja prvog stupnja pročišćavanja dolaze do izražaja osobito u slučajevima ograničenosti slobodnog prostora za izgradnju cjelokupnog uređaja za pročišćavanje otpadnih voda. Neovisno o tome, u nastavku ovog rada razmatrat će se isključivo primjena klasičnih taložnica u funkciji prvog stupnja pročišćavanja kod SBR uređaja.

Drugi i treći stupanj pročišćavanja je kod SBR uređaja osiguran u SBR reaktorima u kojima se odvijaju biološki i kemijski procesi uklanjanja organske tvari (kod drugog stupnja pročišćavanja) te dodatno hranjivih soli dušika i fosfora (kod trećeg stupnja pročišćavanja). U istim SBR reaktorima odvija se i proces taloženja (odvajanja aktivnog mulja od pročišćene otpadne vode) te nije potrebna izgradnja dodatnih naknadnih taložnica. SBR reaktori imaju opremu za aeraciju (osiguranje aerobnih uvjeta razgradnje organske tvari, nitrifikacije i dr.) i miješanje. Rad SBR reaktora (dinamika punjenja, reakcije, taloženja, pražnjenja/dekantiranja, miješanja, upuhivanja zraka i dr.) karakterizira sofisticirani upravljački mehanizam [8]. Drugim riječima, SBR uređaji zahtijevaju visoku razinu kontrole i održavanja, ali nude veću fleksibilnost u pogonu u odnosu na jednostavnije postupke pročišćavanja (konvencionalni postupak, produžena aeracija i dr.) [9]. U odnosu na temu ovog rada, razmatrani su isključivo SBR uređaji s drugim stupnjem pročišćavanja.

Iz SBR reaktora se postupkom dekantiranja ispušta pročišćena voda, a mulj istaložen na dnu SBR reaktora otprema se na daljnju obradu (zgušnjavanje, stabilizacija - po izboru, dehidracija).

2.2. Princip rada SBR reaktora s drugim stupnjem pročišćavanja

Rad SBR reaktora odvija se šaržno, tj. u ciklusima. Ciklus je vremenski interval potreban za punjenje otpadne vode u reaktor, reakciju (odvijanje bioloških i kemijskih procesa), taloženje (odvajanje aktivnog mulja od pročišćene otpadne vode) te ispuštanje pročišćene vode i otprema viška mulja na daljnju obradu [10, 11]. Svaki ciklus podijeljen je u niz procesa, tj. faza (slika 1.).



Slika 1. Faze unutar ciklusa rada SBR reaktora

Prva je faza punjenje SBR reaktora otpadnom vodom iz mehaničkog predtretmana ili iz prvog stupnja pročišćavanja. U drugoj se fazi čitav sadržaj SBR reaktora miješa da se osigura bolji kontakt aktivnog mulja i hrane. Faza miješanja može se u potpunosti ili djelomično odvijati istovremeno s fazom punjenja. Treća faza

je faza aeracije u sklopu koje se obavlja upuhivanje kisika koji je potreban za održavanje aerobnih uvjeta razgradnje organske tvari i po mogućnosti postizanja potpune nitrifikacije. Ovisno o načinu (tehnološkim karakteristikama) aeracije, istovremeno s fazom aeracije može se odvijati i faza miješanja. Prestankom faze aeracije započinje četvrta faza – faza taloženja u sklopu koje se obavlja odvajanje aktivnog mulja od pročišćene otpadne vode. Nakon faze taloženja slijedi peta faza koja podrazumijeva ispuštanje pročišćene vode (dekantiranje) i izdvajanje viška mulja koji se otprema na daljnju obradu [8-10, 12].

Prije početka sljedećeg ciklusa, ovisno o konfiguraciji uređaja i načinu rada, može opcionalno uslijediti faza mirovanja prilikom koje SBR reaktor čeka novo punjenje.

Aeracija SBR reaktora može biti pomoću površinskih aeratora ili dubinski pomoću membranskih aeratora. Aeracija SBR reaktora predstavlja najznačajniju stavku u potrošnji energije na uređajima ovog tipa [9].

3. Osnovne smjernice za dimenzioniranje SBR uređaja s drugim stupnjem pročišćavanja

3.1. Prethodna taložnica

Dimenzioniranje taložnice provodi se prema standardnim smjernicama u odnosu na odabrano vrijeme zadržavanja vode u njoj, koje je u funkciji učinkovitosti uklanjanja otpadne tvari (tablica 2.), dotoka otpadnih voda (mjerodavni dotok – Q_{mjer} i srednji dnevni dotok – $Q_{sr,dn}$) i površinskog opterećenja taložnice (v_0) za mjerodavne dotoke ($v_{0,qmax,h}$, $v_{0,Qsr,dn}$).

U sklopu postupka dimenzioniranja taložnice, a s aspekta relevantnosti za ovaj rad, treba odrediti isključivo njezin potrebni volumen (V_{potr}), koji se izračunava prema izrazu:

$$V_{potr} = Q_{mjer} \cdot t \cdot 3600 \text{ [m}^3\text{]} \quad (1)$$

gdje je :

Q_{mjer} - mjerodavni dotok otpadnih voda [m³/s]

t - odabrano vrijeme zadržavanja otpadne vode u PT [h].

Mjerodavni dotok otpadnih voda (Q_{mjer}) izračunava se ovisno o tipu sustava odvodnje ispred UPOV-a (razdjelni ili mješoviti)

Tablica 2. Učinkovitost pročišćavanja otpadne vode u taložnici ovisno o vremenu zadržavanja vode [13]

Pokazatelji kakvoće vode	Jedinične vrijednosti opterećenja u sirovoj otpadnoj vodi [g/ES-dan]	Vrijednosti opterećenja na izlazu iz PT [g/ES-dan]	
		Vrijeme zadržavanja vode u PT unutar raspona 0,5 - 1,0 h (pri Q_{mjer})	Vrijeme zadržavanja vode u PT unutar raspona 1,5 - 2,0 h (pri Q_{mjer})
BPK ₅	60	45	40
KPK	120	90	80
TSS	70	35	25
TKN	11	10	10
TP	1,8	1,6	1,6

koristeći izraz (2) za razdjelni sustav odvodnje i izraz (3) za mješoviti sustav odvodnje:

$$Q_{mjer} = f \cdot (q_{max,h,stan} + q_{max,h,priv}) + Q_{tude} \quad [m^3/s] \quad (2)$$

$$Q_{mjer} = 2 \cdot (q_{max,h,stan} + q_{max,h,priv}) + Q_{tude} \quad [m^3/s] \quad (3)$$

gdje je:

$q_{max,h,stan}$ - maksimalni satni dotok otpadne vode od stanovništva $[m^3/s]$

$q_{max,h,priv}$ - maksimalni satni dotok otpadne vode od privrede (industrija, turizam i dr.) $[m^3/s]$

Q_{tude} - tuđe vode (najčešće se izračunavaju kao $Q_{tude} = (0,2 - 1,0) \cdot Q_{sr,dn,uk}$) $[m^3/s]$

$Q_{sr,dn,uk}$ - ukupni srednji dnevni dotok otpadnih voda ($Q_{sr,dn,uk} = Q_{sr,dn,stan} + Q_{sr,dn,priv}$) $[m^3/s]$

$Q_{sr,dn,stan}$ - srednji dnevni dotok otpadnih voda od stanovništva $[m^3/s]$

$Q_{sr,dn,priv}$ - srednji dnevni dotok otpadnih voda od privrede $[m^3/s]$

f - faktor uvećanja mjerodavnog dotoka tijekom kišnog razdoblja kao posljedica ilegalnih priključaka oborinskih voda, procjeđivanja oborinske vode kroz poklopce okana i dr. (najčešće se odabire vrijednost unutar raspona 1,2 do 2,0).

3.2. SBR reaktor

U okvirima stručne prakse u Hrvatskoj usvojena je primjena njemačkih smjernica za dimenzioniranje SBR reaktora [14]. Dio cjelokupnog proračuna odnosi se i na njemačke smjernice prema radnom listu ATV-DVWK-A 131 [13].

Kao i kod ostalih tipova uređaja za pročišćavanje otpadne vode, prvi je korak odrediti hidrauličko opterećenje i opterećenja otpadnom tvari SBR reaktora.

Proračun potrebnog volumena SBR reaktora provodi se u dva osnovna koraka. U prvom koraku provodi se proračun volumena ekvivalentnog bioeracijskog reaktora (V_{BAR}) kod konvencionalnog postupka (konvencionalni postupak s aktivnim muljem ili produženom aeracijom) prema izrazu:

$$V_{BAR} = \frac{MD_{BPK5}}{KM_{BAR} \cdot OHM} \quad [m^3] \quad (4)$$

gdje je:

MD_{BPK5} - maseni dotok BPK_5 u bioeracijski reaktor $[kgBPK_5/dan]$

KM_{BAR} - koncentracija mulja u bioeracijskom reaktoru $[kgMLSS/m^3]$

OHM - odnos hrane i mikroorganizama u bioeracijskom reaktoru, tj. udio hrane koju mikroorganizmi dnevno razgrade u odnosu na vlastitu težinu $[kgBPK_5/kgMLSS \cdot dan]$.

$MLSS$ (eng. *Mixed Liquor Suspended Solids*) predstavlja suspendiranu tvar u SBR uređaju i najbolja je mjera za koncentraciju mulja.

KM_{BAR} se kod konvencionalnog postupka s aktivnim muljem određuje iz proračuna naknadne taložnice i ovisi o odnosu povratnog mulja iz naknadne taložnice (NT) u bioeracijski reaktor i koncentraciji mulja u povratnom toku mulja, koji se nalazi u ovisnosti volumnog indeksa mulja i vremena zgušnjavanja na dnu NT-a. Stoga se pri proračunu KM_{BAR} koristi izraz:

$$KM_{BAR} = \frac{OPM \cdot KM_{PM}}{1 + OHM} \quad [kgMLSSm^3] \quad (5)$$

gdje je:

OPM - odnos povratnog mulja koji predstavlja količinu mulja u povratnom toku u odnosu na Q_{mjer} u bioeracijski reaktor (OPM je u rasponu 0,5 - 0,75)

KM_{PM} - koncentracija mulja u povratnom toku mulja $[kgMLSS/m^3]$

KM_{PM} se izračunava koristeći izraz:

$$KM_{PM} = 0,7 \cdot \frac{1000}{SVI} \cdot \sqrt[3]{t_{th}} \quad [kgMLSSm^3] \quad (6)$$

(kod NT-a sa zgrtanjem mulja)

$$KM_{PM} = (0,5 \text{ do } 0,7) \cdot \frac{1000}{SVI} \cdot \sqrt[3]{t_{th}} \quad [kgMLSSm^3] \quad (7)$$

(kod NT-a s usisavanjem)

gdje je:

SVI - volumni indeks mulja $[l/kgMLSS]$

t_{th} - vrijeme zgušnjavanja mulja na dnu NT-a $[h]$.

Volumni indeks mulja (SVI) definira taloživa svojstva mulja te je poželjno da vrijednost SVI bude što manja. Pri proračunu se preporučuje vrijednost SVI odabrati unutar raspona 100 - 120 $[l/kgMLSS]$. Vrijednost t_{th} ovisi o traženoj učinkovitosti pročišćavanja i primijenjenom tehnološkom procesu. Ako se radi o drugom stupnju pročišćavanja bez nitrifikacije (uklanjanje samo organske tvari s ugljikovim spojevima), tada je t_{th} u rasponu 1,5 - 2,0 $[h]$. Ako se pak radi o drugom stupnju pročišćavanja s nitrifikacijom (uklanjanje organske tvari s ugljikovim i dušikovim spojevima), tada je t_{th} u rasponu 1,0 - 1,5 $[h]$.

Kod postupka s produženom aeracijom KM_{BAR} se odabire unutar raspona 4,0 - 5,0 $[kgMLSS/m^3]$. U slučaju da na lokaciji UPOV-a postoji slobodan prostor za izgradnju, preporučuje se odabrati vrijednost 4,0 $[kgMLSS/m^3]$, koja nudi veću fleksibilnost u radu UPOV-a. Međutim, ako je slobodan prostor za izgradnju UPOV-a ograničen, moguće je odabrati i vrijednost 5,0 $[kgMLSS/m^3]$. OHM se izračunava prema izrazu:

$$OHM = \frac{1}{SM \cdot SPM} \quad [kgBPK_5/kgMLSS \cdot dan] \quad (8)$$

gdje je:

SM - starost mulja $[dani]$

SPM - specifična proizvodnja mulja $[kgMLSS/kgBPK_5]$.

Potrebna starost mulja (SM) ovisi o potrebnoj učinkovitosti pročišćavanja, kapacitetu UPOV-a i mjerodavnoj temperaturi otpadne vode, a određuje se kako je prikazano u tablici 3.

Tablica 3. Određivanje potrebne starosti mulja u danima [13]

Učinkovitost pročišćavanja	Starost mulja (dani)			
	Kapacitet UPOV-a			
	< 20.000 ES		> 100.000 ES	
Mjerodavna temperatura otpadne vode	10°C	12°C	10°C	12°C
Uklanjanje organske tvari bez nitrifikacije	5		4	
Uklanjanje organske tvari s nitrifikacijom	10*	8,2*	8*	6,6*
Istovremena stabilizacija mulja	25		Ne preporuča se	

Kad se uklanjaju organske tvari bez nitrifikacije za mjerodavne temperature otpadne vode veće od 12°C, mogu se iz sigurnosnih razloga preuzeti iste vrijednosti starosti mulja kao i pri temperaturi 12°C. Kad se uklanjaju organske tvari s nitrifikacijom, SM se izračunava prema izrazu:

$$SM = 3,4 \cdot SF \cdot 1,103^{15-T} \text{ [dani]} \quad (9)$$

gdje je:

SF - sigurnosni faktor koji ovisi o kapacitetu UPOV-a

SF = 1,80 za UPOV-e veće od 100.000 ES

SF = 1,45 za UPOV-e manje od 20.000 ES

Za UPOV-e kapaciteta 20.000 do 100.000 ES potrebno je interpolirati vrijednost SF unutar raspona 1,45 do 1,80.

T - mjerodavna temperatura otpadne vode (srednja niska godišnja temperatura otpadne vode) [°C].

SPM ovisi o odnosu mjerodavnog opterećenja TSS (MD_{TSS} – maseni dotok ukupne raspršene tvari u bioeracijski reaktor [kgTSS/dan]) i BPK₅ (MD_{BPK5} – maseni dotok BPK₅ u bioeracijski reaktor [kgBPK₅/dan]) te o SM. U pojednostavljenom obliku SPM se određuje kako je prikazano u tablici 4.

Tablica 4. Određivanje SPM [13]

$\frac{MD_{TSS}}{MD_{BPK5}}$	Vrijednost SPM [kgMLSS/kgBPK ₅]					
	Starost mulja [dani]					
	4	8	10	15	20	25
0,4	0,79	0,69	0,65	0,59	0,56	0,53
0,6	0,91	0,81	0,77	0,71	0,68	0,65
0,8	1,03	0,93	0,89	0,83	0,80	0,77
1,0	1,15	1,05	1,01	0,95	0,92	0,89
1,2	1,27	1,17	1,13	1,07	1,04	1,01

U drugom koraku se izračunava potrebni volumen SBR reaktora (V_{SBR}). Pritom se proračun V_{SBR} provodi u dvije faze. U prvoj fazi se $V_{SBR,1}$ izračunava u odnosu na opterećenje SBR reaktora otpadnom tvari, i to prije svega biološkim opterećenjem. U drugoj fazi se $V_{SBR,2}$ izračunava u odnosu na hidrauličko opterećenje SBR reaktora. Kao mjerodavna vrijednost V_{SBR} usvaja se veća vrijednost od prethodno izračunanih $V_{SBR,1}$ i $V_{SBR,2}$. $V_{SBR,1}$ se izračunava prema izrazu:

$$n \cdot V_{SBR,1} = \frac{V_{BAR} \cdot KM_{BAR} \cdot t_z}{KM_{SBR} \cdot t_R} \text{ [m}^3\text{]} \quad (10)$$

gdje je:

n - broj SBR reaktora

V_{BAR} - volumen ekvivalentnog bioeracijskog reaktora izračunan prema izrazu (4) [m³]

KM_{BAR} - koncentracija mulja u ekvivalentnom bioeracijskom [kgMLSS/m³] prema izrazu (5)

t_z - vrijeme trajanja jednog ciklusa u SBR reaktoru [h]. Vrijednost t_z ovisi o odabranom broju ciklusa unutar jednog dana i preporučuje se odabrati na način da tijekom jednog dana SBR reaktor ima stalan broj ciklusa. t_z se najčešće odabire s vrijednosti 4, 6, 8, 12 ili 24 [h].

KM_{SBR} - koncentracija mulja u SBR reaktoru [kgMLSS/m³]. Preporuka je odabrati vrijednost unutar raspona 4,0 do 5,0 [kgMLSS/m³], neovisno o tome da li se želi osigurati istovremena stabilizacija mulja u SBR reaktoru.

t_R - vrijeme reakcije [h]. Vrijeme reakcije jednako je vremenu upuhivanja zraka u SBR reaktor, odnosno vremenu odvijanja bioloških procesa aerobne razgradnje organske tvari. Prekidom aeracije i početkom faze taloženja, završava faza reakcije. t_R se izračunava nakon što se definiraju vremena svih ostalih faza unutar jednog ciklusa koristeći izraz:

$$t_R = t_z - t_{punj} - t_{tal} - t_{isp} - t_{mir} \text{ [h]} \quad (11)$$

gdje je:

t_{punj} - vrijeme faze punjenja SBR reaktora [h]

t_{tal} - vrijeme faze taloženja unutar SBR reaktora [h]

t_{isp} - vrijeme faze ispuštanja pročišćene vode i viška mulja iz SBR reaktora [h]

t_{mir} - vrijeme faze mirovanja [h].

$V_{SBR,2}$ se izračunava u sklopu iteracijskog postupka prema izrazima (12), (13) i (14). Postupak proračuna podrazumijeva pretpostavku vrijednosti f_A (u prvom iteracijskom koraku se preporučuje odabrati vrijednost $f_A = 0,4$) i proračun prema izrazu (12). Zatim se izračunana vrijednost $n \cdot V_{SBR,2}$ uvrštava u izraz (13), te se dobivena vrijednost uvrštava u izraz (14). Iteracijski postupak se ponavlja sve dok se za izračunani f_A (prema izrazu 14) ne dobije vrijednost jednaka prvotno pretpostavljenoj vrijednosti f_A , koja je uvrštena u izraz (12).

$$n \cdot V_{SBR,2} = \frac{Q_{mjer} \cdot t_z}{f_A} \quad (12)$$

$$\Delta V = (n \cdot V_{SBR,2}) - (n \cdot V_{SBR,1}) \quad [m^3] \quad (13)$$

$$f_A = \frac{\Delta V}{n \cdot V_{SBR,2}} \quad (14)$$

gdje je:

f_A - maksimalni udio volumena pročišćene vode koji se prazni iz SBR reaktora u jednom ciklusu

$V_{SBR,1}$ - volumen SBR reaktora izračunan prema izrazu (10) [m³]

ΔV - maksimalni volumen pročišćene vode koji se prazni iz SBR reaktora u jednom ciklusu [m³]

U većini praktičnih slučajeva opisanim proračunom mjerodavan je volumen SBR reaktora dobiven na temelju hidrauličkog

opterećenja ($V_{SBR,2}$). Ipak, proračun u odnosu na hidrauličko opterećenje treba shvatiti uvjetno jer je unutar njega sadržan i faktor " f_A " koji je, prema izrazu (13), ovisan i o mjerodavnom organskom opterećenju (u odnosu na parametar $V_{SBR,1}$).

4. Analiza problema i rezultati

Ovisno o veličini uređaja, sastavu otpadne vode i mjerodavnim dotocima, upitno je ima li konfiguracija uređaja s prethodnim taložnicama u funkciji prvog stupnja pročišćavanja izražene prednosti i u kojoj mjeri u odnosu na varijante bez prethodnih taložnica. Analizirajući smjernice za dimenzioniranje SBR uređaja s drugim stupnjem pročišćavanja, može se očekivati da će se uz izgradnju prethodnih taložnica ispred SBR reaktora smanjiti ne samo potrebni volumen SBR reaktora (posljedica smanjenja opterećenja SBR reaktora otpadnom tvari) nego i troškovi pogona uređaja (manji zahtjevi za aeracijom, koja predstavlja najznačajniju stavku u ukupnim energetske potrebama na ovakvom tipu uređaja).

Tablica 5. Mjerodavni ulazni parametri

Kapacitet UPOV-a [ES]	Specifični dotok otpadnih voda [l/stanovnik-dan]	Ukupna neravnomjernost dotoka otpadnih voda (umnožak koeficijenta dnevne i satne neravnomjernosti)	Dotok tuđih voda [m ³ /h]	Srednji dnevni dotok industrijskih otpadnih voda [m ³ /dan]	Mjerodavni dotok otpadnih voda na UPOV [m ³ /h]	
					razdjelni sustav odvodnje	mješoviti sustav odvodnje
1.000	100	3,0	2,0	0,0	15,0	27,0
2.000	100	3,0	4,0	0,0	29,0	54,0
5.000	100	3,0	10,0	0,0	73,0	135,0
10.000	100	2,0	20,0	0,0	103,0	187,0
20.000	100	2,0	50,0	480,0	258,0	463,0
50.000	125	1,75	150,0	1.200,0	693,0	1.236,0
100.000	125	1,5	300,0	2.400,0	1.231,0	2.163,0
200.000	125	1,5	600,0	4.800,0	2.463,0	4.325,0

Tablica 6. Mjerodavne veličine SBR reaktora i PT-a za pojedine varijante i veličine uređaja

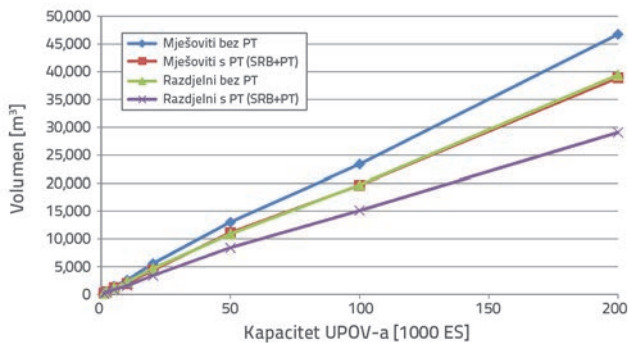
Kapacitet UPOV-a [ES]	Mješoviti sustav odvodnje			Razdjelni sustav odvodnje		
	bez PT-a	s PT-om		bez PT-a	s PT-om	
	SBR [m ³]	PT [m ³]	SBR [m ³]	SBR [m ³]	PT [m ³]	SBR [m ³]
1.000	292	27	216	242	15	161
2.000	584	54	432	483	29	322
5.000	1.460	135	1.080	1.208	73	806
10.000	2.575	187	1.778	2.259	103	1.450
20.000	5.532	465	3.914	4.667	258	3.129
50.000	13.015	1.237	9.892	10.874	693	7.703
100.000	23.378	2.163	17.475	19.700	1.231	13.873
200.000	46.757	4.325	34.600	39.400	2.463	26.622

Prikazat će se rezultati proračuna SBR uređaja s drugim stupnjem pročišćavanja i kapaciteta unutar raspona 1.000 do 200.000 ES, u varijantama s prethodnim taložnicama i bez njih. Pritom su provedene analize uz pretpostavku oba tipa sustava odvodnje ispred UPOV-a – razdjelni i mješoviti. Mjerodavni ulazni parametri za dimenzioniranje prikazani su u tablici 5.

Može se također istaknuti da kapaciteti UPOV-a od 1.000 ES do 10.000 ES u većini slučajeva nisu toliko interesantni s aspekta razmatrane problematike, jer se za te veličine UPOV-a podrazumijeva primjena tehnologije s istovremenom stabilizacijom koja isključuje primjenu prethodnih taložnica. Međutim, u određenim okolnostima koje isključuju potrebu za stabilizacijom mulja na UPOV-u predmetne analize mogu biti interesantne te su sastavni dio prikazanih rezultata.

Proračun svih varijanti proveden je prema smjernicama prikazanim u poglavlju 3. Dodatno su provedeni i proračuni pomoću računalnog paketa AquaDesigner (BITControl), verzija 6.3, čime su provjerene prethodno utvrđene računске vrijednosti.

Dobiveni rezultati provedenog proračuna potrebnih volumena za pojedine objekte UPOV-a prikazani su u tablici 6. i grafički na slici 2.



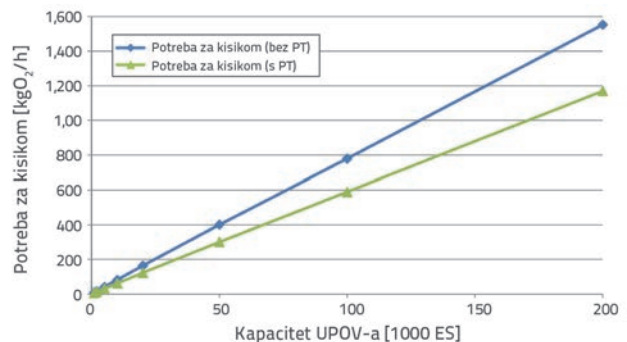
Slika 2. Potrebni volumeni objekata UPOV-a (SBR reaktor i PT) ovisno o kapacitetu UPOV-a i primijenjenoj konfiguraciji

Detaljnijom analizom prikazanih podataka uočena je prednost konfiguracija SBR uređaja s prethodnim taložnicama (PT), što je

osobito izraženo kod uređaja većeg kapaciteta. Naime, ukupni potrebni volumen (SBR reaktor + PT) manji je od potrebnog volumena SBR reaktora bez prethodnih taložnica za sve razmatrane varijante. Također, razlike između varijanti značajnije su kod razdjelnog sustava odvodnje. U varijantama s taložnicama ukupni potrebni volumen manji je 14 do 24 % kod mješovitog, odnosno 23 do 31 % kod razdjelnog sustava odvodnje.

Neovisno o tipu sustava odvodnje, potrebne količine kisika za aeraciju su za isti kapacitet UPOV-a podjednake, odnosno ovise samo o organskom opterećenju, tako da su prisutne razlike između SBR uređaja s taložnicama i bez njih. Uz analizu potreba za kisikom dodatno je provedena i analiza potreba za ukupnim volumenom zraka i snagom kompresora prema stvarno dostupnim tipovima i broju aeratora za odabrane konfiguracije uređaja. Pritom je korišten računalni paket AquaDesigner (BITControl), verzija 6.3. Dobiveni rezultati su prikazani u tablici 7. i grafički na slikama 3. do 5.

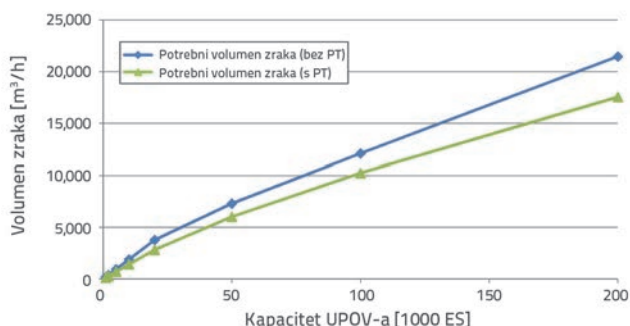
Za aeraciju SBR reaktora trebat će oko 25 % manje kisika kod SBR uređaja s taložnicama, neovisno o kapacitetu UPOV-a. Ukupni potrebni volumen zraka bit će manji 15 do 25 % kod SBR uređaja s taložnicama, ovisno o kapacitetu UPOV-a. Potrebna snaga kompresora za aeraciju SBR reaktora u odnosu na broj bazena i potrebe za kisikom te dostupnim tipovima kompresora i aeracijskih tijela bit će manja i do 38 % kod SBR uređaja s taložnicama (prosječno 20 %).



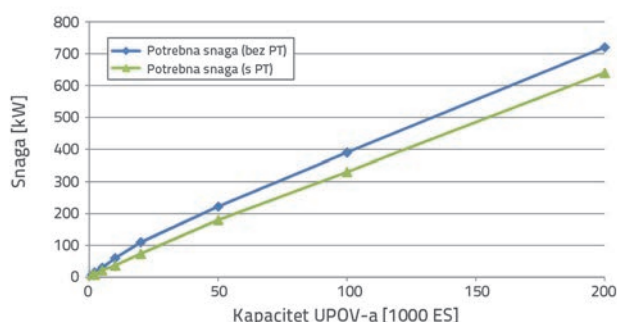
Slika 3. Usporedni prikaz potreba za kisikom u SBR reaktorima na uređajima različitih kapaciteta s PT-om i bez PT-a

Tablica 7. Usporedba zahtjeva za aeraciju za pojedine varijante i kapacitete UPOV-a

Broj ES	SBR bez PT-a			SBR s PT-om		
	Potrebe za kisikom [kgO ₂ /h]	Potrebni volumen zraka [m ³ /h]	Potrebna snaga kompresora [kW]	Potrebe za kisikom [kgO ₂ /h]	Potrebni volumen zraka [m ³ /h]	Potrebna snaga kompresora [kW]
1.000	8	190	8	6	144	8
2.000	16	378	15	12	285	12
5.000	41	945	30	31	709	22
10.000	82	1.891	60	61	1.419	37
20.000	163	3.776	110	122	2.832	74
50.000	401	7.300	222	300	6.020	180
100.000	780	12.100	390	590	10.235	330
200.000	1.554	21.465	720	1.170	17.550	640



Slika 4. Usporedni prikaz ukupnog potrebnog volumena zraka za aeraciju SBR reaktora na uređajima različitih kapaciteta s PT-om i bez PT-a



Slika 5. Usporedni prikaz potrebne snage kompresora za aeraciju SBR reaktora na uređajima različitih kapaciteta s PT-om i bez PT-a

Na osnovi analiza o potrebnom kisiku za aeraciju SBR uređaja treba istaknuti da je izostavljena eventualna potrošnja kisika u procesu obrade mulja (aerobna stabilizacija mulja). Analize provedene u ovom radu važne su isključivo za UPOV-e s istovremenom stabilizacijom mulja (produženom aeracijom) ili sa zasebnom anaerobnom stabilizacijom mulja ili za UPOV-e kod kojih zbog određenih razloga nije potrebno stabilizirati mulj (npr. ako se mulj namjerava spaljivati/suspaljivati). Naime, ako je stabilizacija mulja potrebna i ako se provodi aerobno, onda će se ušteda na potrošnji kisika u SBR reaktorima dobivena ugradnjom primarne taložnice djelomično izgubiti u postupku aerobne stabilizacije mulja.

LITERATURA

- [1] U.S.EPA, Sequencing Batch Reactors for Nitrifications and Nutrient Removal, U.S. Environmental Protection Agency, EPA 832 R-92-003, 1992.
- [2] Chang, C.H., Hao, O.J.: Sequencing batch reactor system for nutrient removal: ORP and pH profiles, *J. Chem. Tech. Biotech.*, 67 (1996), pp. 27-38, [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1097-4660\(199609\)67:1<27::AID-JCTB430>3.0.CO;2-2](https://doi.org/10.1002/(SICI)1097-4660(199609)67:1<27::AID-JCTB430>3.0.CO;2-2)
- [3] U.S.EPA, Wastewater Technology Fact Sheet: Sequencing Batch Reactors, Office of Water, Washington, D.C., United States Environmental Protection Agency, EPA 932-F-99-073, 1999.
- [4] Mahvi, A.H., Mesdaghinia, A., Karakani, F.: Nitrogen removal from wastewater in a continuous flow sequencing batch reactor, *Pakistan J. Bio. Sci.*, 7 (2004) 11, pp. 1880-1883.
- [5] Karakani, F., Mahvi, A.H.: Wastewater phosphorus removal in an intermittent cycle extended aeration system, *Pakistan. J. Bio. Sci.*, 8 (2005) 2, pp. 335-337.
- [6] Laitinen, N., Luonsi, A., Vilen, J.: Landfill leachate treatment with sequencing batch reactor and membrane bioreactor, *Desalination*, 191 (2006), pp. 86-91, <https://doi.org/10.1016/j.desal.2005.08.012>

5. Zaključak

Sve je veći broj SBR uređaja za pročišćavanje otpadnih voda na svjetskoj razini pa tako i u Hrvatskoj. Pri definiranju koncepcije SBR uređaja na liniji vode, potrebno je odlučiti hoće li se obavljati prvi stupanj pročišćavanja ili neće, pri čemu se najčešće razmatra izgradnja taložnica. U ovom radu analizirani su isključivo SBR uređaji u funkciji drugog stupnja pročišćavanja bez aerobne stabilizacije mulja. Na temelju rezultata proračuna prikazanih u ovom radu uočava se prednost varijantnih rješenja SBR uređaja s taložnicama, što posebno dolazi do izražaja kod uređaja većeg kapaciteta (većih od 100.000 ES). Također, konfiguracije s taložnicama pokazuju nešto veće prednosti kod razdjelnih sustava odvodnje. Spomenute prednosti ogledaju se prije svega kroz smanjenje opterećenja otpadnom tvari SBR reaktora te smanjenje ukupnog potrebnog volumena uređaja (SBR reaktor + PT, u odnosu na sam SBR reaktor bez PT-a) i to u prosjeku oko 25 %. Nadalje, rezultati provedene analize pokazuju da su kod SBR reaktora s taložnicama smanjene potrebe za kisikom oko 25 %, što rezultira smanjenjem potrebne snage kompresora za aeraciju SBR reaktora (smanjenje početne investicije) i smanjenjem ukupne potrošnje energije. U slučaju da je stabilizacija mulja potrebna i ako se provodi aerobno, ističe se da se ušteda na potrošnji kisika u SBR reaktorima dobivena ugradnjom primarne taložnice djelomično gubi u postupku aerobne stabilizacije mulja i naglašava se važnost provođenja daljnjih analiza u sklopu opisane problematike. Prema tome se može zaključiti da su s tehničkog i ekonomskog aspekta primarne taložnice opravdane na liniji vode kod SBR uređaja s drugim stupnjem pročišćavanja bez aerobne stabilizacije mulja, osobito kod UPOV-a s većim kapacitetom i kojima prethodi razdjelni sustav odvodnje. Taj zaključak upućuje na potrebu da se već na razini studijskih analiza u sklopu razmatranja primjene SBR uređaja s drugim stupnjem pročišćavanja detaljnije analiziraju minimalno dva varijantna rješenja – s prvim stupnjem pročišćavanja ispred SBR reaktora i bez njega. Budući da se planira izgraditi više uređaja s trećim stupnjem pročišćavanja, koji uključuju i mogućnosti primjene SBR tehnologije, daljnje analize u sklopu opisane problematike odnose se na analize isplativosti izgradnje primarnih taložnica kod SBR uređaja s trećim stupnjem pročišćavanja.

- [7] Guo, J., Yang, Q., Peng, Y., Yang, A., Wang, H.: Biological nitrogen removal with real-time control using step-feed SBR technology, *Enzyme Microb. Tech.*, 40 (2007), pp. 1564–1569, <https://doi.org/10.1016/j.enzmictec.2006.11.001>
- [8] Singh, M., Srivastava, R. K.: Sequencing batch reactor technology for biological wastewater treatment: A review. *Asia-Pacific Jnl. of Chem. Eng.*, 6 (2011) 1, pp. 3–13, <https://doi.org/10.1002/apj.490>
- [9] Metcalf & Eddy: Wastewater Engineering: Treatment and Resource Recovery. Fifth Edition. New York, McGraw-Hill, 2014.
- [10] Chauvon, G., Vassel, J.L., Wouwer, A.V.: Dynamic Simulation and Optimisation of a SBR Wastewater Treatment System, *Proceedings of the 20th International Conference on System Theory, Control and Computing (ICSTCC)*, October 13-15, Sinaia, Romania (2016), pp. 198-203.
- [11] Awaleh, M.O., Soubaneh, Y.D.: Waste Water Treatment in Chemical Industries: The Concept and Current Technologies, *Hydrol. Current Res.* 5 (2014) 164, <https://doi.org/10.4172/2157-7587.1000164>
- [12] Mane, S.S., Munavalli, G.R.: Sequential Batch Reactor- Application to Wastewater –A Review, *Proceeding of International Conference SWRDM-2012*, pp. 121-128.
- [13] ATV – DVWK, ATV - DVWK Standard A 131E, Dimensioning of Single-Stage Activated Sludge Plants, ATV - DVWK, Water, Wastewater, Waste, Hennef, Germany, 2000.
- [14] ATV Regelwerk, Merkblatt ATV - M 210, Belebungsanlagen mit Aufstaubetrieb, Gesellschaft zur Förderung der Abwassertechnik e.V. (gfa), Hennef, Germany, 1997.