

PRIMERJAVA PREZRAČEVALNIH SISTEMOV NA KČN IN NJIHOVA UČINKOVITOST PRI PORABI ENERGIJE

COMPARISON OF WASTEWATER TREATMENT PLANT AERATION SYSTEMS AND THEIR ENERGY USAGE EFFICIENCY

asist. dr. Sabina Kolbl, univ. dipl. inž. vki.

sabina.kolbl@fgg.uni-lj.si

izr. prof. dr. Jože Panjan, univ. dipl. inž. grad.

joze.panjan@fgg.uni-lj.si

Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo

Jamova 2, 1000 Ljubljana

Znanstveni članek

UDK 551.4.013:628.32

Povzetek | V članku obravnavamo različne sisteme prezračevanja na komunalnih čistilnih napravah (KČN) in jih primerjamo na dveh čistilnih napravah, ČN1 in ČN2. Na podlagi teoretičnih osnov prezračevanja in pridobljenih podatkov na obeh KČN smo naredili večletni pregled porabe energije za prezračevanje. Na ČN1 se za prezračevalni biološki reaktor uporablja šaržni oz. sekvenčni biološki reaktor (SBR), na ČN2 pa imajo oksidacijski jarek. Na obeh ČN je vgrajen sistem prezračevanja z difuzorji, ki proizvajajo majhne mehurčke. Med sabo smo primerjali porabo energije glede na velikost čistilnih naprav oz. na enoto volumna prezračevalnega reaktorja. Za oba primera je glede na obremenitev izračunana količina potrebnega zraka za vpihovanje v reaktor, učinkovitost prenosa kisika pri standardnih pogojih ter predlog možnosti izboljšav glede na zadostno količina kisika in porabo energije.

Ključne besede: komunalne čistilne naprave, prezračevanje

Summary | The article deals with different aeration systems in wastewater treatment plants - WWTP and they are compared according to two wastewater treatment plants, WWTP1 and WWTP2. On the basis of the theoretical aeration principles and acquired data for both WWTPs, we conducted a multi-annual study on energy consumption for aeration. WWTP1 uses batch or sequencing biological reactor (SBR) as the aeration biological reactor, while WWTP2 uses oxidation ditch. Both WWTPs have installed aeration systems with diffusers, which produce small bubbles. Energy consumption with regard to the size of the treatment facilities or to the unit of volume of the aeration tank was compared. The amount of needed air for injection into the reactor, efficiency of the oxygen transfer in normal conditions and the suggested possibilities for the improvement with regard to the sufficient amount of oxygen and consumption of energy were calculated for both examples with regard to the loading.

Key words: wastewater treatment plants, aeration

1 • UVOD

Najbolj razširjeni biološki procesi za čiščenje komunalne odpadne vode so procesi z ak-

tivnim blatom. Na vnos kisika vplivajo različni faktorji, kot so nasičenost kisika, temperatura,

lastnosti odpadne vode, globina potopitve difuzorjev, barometrični tlak, gostota mikrobiološke populacije itd. Najprej bomo podali teoretične osnove prezračevanja in prezračevalnih sistemov na komunalnih čistilnih napravah – KČN. Za vse aerobne biološke procese potrebujemo

kisik, ki ga praviloma vnašamo z zrakom. Pri vnosu kisika nas je zanimal predvsem prenos med plinsko in tekočo fazo.

Z zadostno količino hrane in kisika lahko dosežemo zelo veliko hitrost rasti mikroorganizmov. Pri tem se porabljajo prisotne organske snovi kot oksidirani končni produkti (H_2O , CO_2 , NO_3 , SO_4 , PO_4) ali pa nastane biosinteza novih mikroorganizmov. Mikroorganizmi porabijo kisik na različne načine. Porabo kisika za pridobitev energije, s katero razgradijo dodatni substrat v odpadni vodi, imenujemo substratno dihanje. Porabo kisika, ki ga mikroorganizmi potrebujejo za lastno dihanje, brez dodajanja substrata, pa imenujemo endogeno dihanje ((Panjan, 2000), (Panjan, 2001)).

Prezračevanje ima dvojno funkcijo: (1) oskrbo s kisikom za dihanje aerobnih mikroorganiz-

mov in (2) mešanje odpadne vode za zagotovitev dobrega stika med površino kosmov in odpadno vodo, in zato da kosme obdržimo v suspenziji. Le neprestano mešanje zagotovi zadostno količino hrane, maksimalni gradient koncentracije kisika in zadosten masni prenos hranil. Prav tako pomaga razpršiti končne produkte presnove znotraj kosma. V večini primerov je hitrost porabe kisika odvisna od masnega prenosa kisika.

Metabolizem mikroorganizmov poteka po dveh ločenih poteh. Pri presnovi se tvorijo nove celice (sinteza), mikroorganizmi pa začnejo lastno dihanje (respiracija). Energija, ki se potroši pri sintezi, nastane pri prehodu prostih elektronov na kisik. Tako sinteza kot respiracija potekata vzporedno. Končna produkta presnove sta ogljikov dioksid in voda, sprosti

pa se tudi nekaj energije. Pri prezračevanju moramo upoštevati tudi določene korekcijske faktorje danega okolja, ki smo jih lastno izračunali in grafično prikazali za oba primera KČN.

Komunalne čistilne naprave potrebujejo veliko energije, ki pa jo lahko tudi pridobivajo v fazi anaerobne presnove blata (metan).

Ogljik, dušik in fosfor kot hranila v odpadni vodi imajo ključno vlogo pri rasti mikroorganizmov. Pri čiščenju odpadne vode jih želimo prav preko mikroorganizmov odstraniti. Če v odvodnik spustimo neprimerno očiščeno odpadno vodo s preveč hranili, se poveča rast alg, z njihovim odmiranjem pa se poveča poraba kisika. To stanje privede do pomanjkanja kisika in evtrofikacije, ki škoduje organizmom v vodi.

2 • MATERIALI IN METODE

2.1 Vnos kisika v prezračevalni bazen

Pri načrtovanju sistemov za prezračevanje je za osnovno analizo uporabljena enačba vnosa kisika $\frac{dC_L}{dt} = K_L a \cdot (C_{\infty}^* - C_L)$, kjer pomenijo $K_L a$ (koeficient prenosa kisika), C_{∞}^* (nasičena koncentracija kisika; topnost kisika) in C_L (koncentracija kisika v tekoči fazi). Maksimalna hitrost prenosa nastopi, ko je koncentracija kisika v raztopini enaka nič. Prenosa ni, ko koncentracija raztopljenega kisika doseže ravnotežje s plinsko fazo. Koeficient prenosa kisika je odvisen od kakovosti vode, vrste prezračevalne opreme in je enkraten za vsako situacijo. Vrednost koeficienta se določi eksperimentalno (Mueller, 2002).

Procesi prenosa kisika so zelo kompleksni in odvisni od številnih vplivov, kot so kinetika reakcij, hitrost prenosa kisika, lastnosti in količine odpadne vode, lokalne okoljske razmere (temperatura, pH, nadmorska višina), prisotnost toksičnih ali prepovedanih substanc na vtoku, intenziteta mešanja in oblika prezračevalnega reaktorja, globina potopitve difuzorjev, stroški in fleksibilnost pri potrebah čiščenja v prihodnosti. Pri vrednotenju danega prezračevalnega sistema bodo na hitrosti prenosa kisika in učinkovitost prenosa vplivali tudi način vnosa oz. vrsta procesa, uporabljena metodologija kontrole in vzdrževanje opreme. Za prezračevanje z difuzorji so npr. ti faktorji (Mueller, 2002):

- vrsta difuzorja,

- postavitve difuzorjev,
- gostota difuzorjev,
- hitrost toka zraka na enoto površine,
- geometrija prezračevalnega reaktorja in globina potopitve difuzorjev,
- karakteristike odpadne vode in okolja,
- vrsta procesa in režim toka,
- obremenitev procesa,
- kontrolna enota za količino raztopljenega kisika,
- stopnja obraščanja, luščenja in kvarjenja sistema,
- mehanska »integriteta« prezračevalnega sistema.

Velikost mehurčka v vodi je odvisna od premera odprtine na difuzorju, površinske napetosti in gostote tekočine pri nizkih tokovih zraka (manj kot 100 mehurčkov na minuto). Pri prezračevanju odpadne vode so hitrosti toka zraka večje, velikost mehurčka pa je funkcija hitrosti toka plina, medtem ko je pogostost tvorjenja konstanta. Velikost in oblika mehurčkov na več načinov vplivata na masni prenos kisika. Razmerje med volumnom in površino posameznega mehurčka se bo zmanjšalo s povečanjem velikosti mehurčka in bo neposredno vplivalo na koeficient masnega prenosa $K_L a$. Zadrževalni čas mehurčka v prezračevalnem reaktorju je odvisen od oblike in velikosti mehurčka. Največja hitrost dviganja mehurčka in njegova oblika sta povezani z Reynoldsovim številom, ki je odvisno od površine mehurčka, hitrosti dvigovanja

in viskoznosti ($Re = \frac{v \cdot d}{\nu}$). Pri $Re < 300$ so mehurčki sferične oblike, njihovo dviganje pa je spiralno ali pa premočrtno (Mueller, 2002). Pri $300 < Re < 400$ je oblika mehurčkov elipsoidna, dvigajo pa se premočrtno ali gugalno (rocking motion). Obliko sferičnih klobukov mehurčki dobijo, ko je $Re > 4000$. Celotna površina mehurčkov v reaktorju je produkt ločene površine mehurčka v času t in distribucijskega zadrževalnega časa mehurčka. Celotno območje površine plina v reaktorju se zmanjša z naraščanjem hitrosti mehurčka (Mueller, 2002).

2.2 Analiza vplivnih faktorjev pri vnosu kisika

Topnost kisika in temperatura

Za natančno delovanje prezračevala uporabimo standardne pogoje pri 20 °C in nasičeno vrednost kisika (topnost kisika) pri tlaku 1 bar. Temperaturni brezdimenzijski korekcijski faktor τ je podan z naslednjo enačbo in prikazan na sliki 1 (Mueller, 2002):

$$\left. \begin{aligned} \tau &= \frac{C_{st}^*}{C_{s20}^*} \\ C_{s20}^* &= 9,09 \frac{\text{mg}}{\text{l}} \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

Kjer pomenijo:

C_{st}^* – nasičena koncentracija (topnost) kisika na površini pri temperaturi T (°C) (mg/l)

C_{s20}^* – nasičena koncentracija kisika (topnost) na površini pri temperaturi 20 °C (mg/l)

S slike 1 je razvidno, da se z višanjem temperature temperaturni korekcijski faktor τ zmanjšuje. Pri temperaturi 0 °C se vrednost τ giblje okrog 1,6, pri temperaturi 20 °C pa je $\tau = 1$.

Onesnaževala v odpadni vodi

Onesnaževala v odpadni vodi, kot so soli, razni delci in površinsko aktivne snovi, vplivajo na nasičeno koncentracijo (topnost) kisika v primerjavi s čisto vodo pri isti temperaturi. Zato uvedemo korekcijski faktor β (Tchobanoglous, 2003). Enačba je naslednja:

$$\beta = \frac{C_s(\text{odpadna...voda})}{C_s(\text{čista...voda})} \quad (2)$$

Kjer pomeni:

β – korekcijski faktor odpadne vode za nasičenje s kisikom (-)

Največji vpliv na nasičeno koncentracijo kisika v odpadni vodi imajo raztopljeni anorganski delci (TDS). To povečanje predvideva, da je sestava anorganskih sestavin podobna tistim v morski vodi. Dogovorjeno je (ASCE – Committee on Oxygen Transfer Standards), da je ta povečani faktor dovolj natančen, da ga lahko uporabimo v praksi (Mueller, 2002):

$$\beta = 1 - 5,7 \times 10^{-6} \times TDS \quad (3)$$

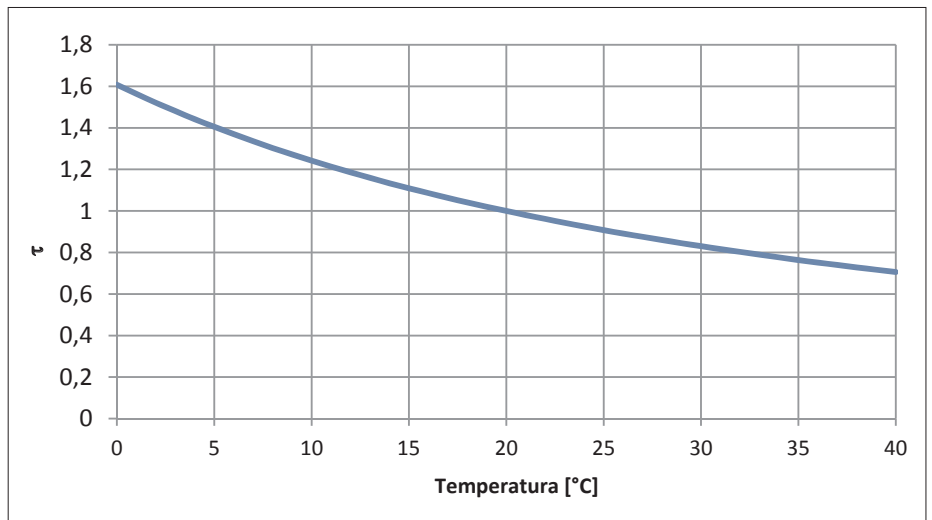
Vrednosti za β se gibljejo od 0,7 do 0,99. Najbolj pogosto uporabljena vrednost za komunalno odpadno vodo (pri TDS < 1500 mg/l) je 0,99, za industrijsko odpadno vodo, kot so na primer odpadne farmacevtske vode (pri TDS = 10.000 mg/l), pa se bo vrednost gibala pod 0,94.

Pri večanju koncentracije celotnih raztopljenih snovi (TDS) se vrednost korekcijskemu faktorju odpadne vode za nasičenje s kisikom manjša. Po ATV M 209E je za komunalno odpadno vodo faktor $\beta = 1,0$.

Globina potopitve prezračevala

Pri standardnih pogojih, ko je temperatura odpadne vode 20 °C in tlak 1 bar, lahko z globinskim korekcijskim faktorjem nasičenja s kisikom zapišemo δ vpliv potopljenosti difuzorjev na nasičenost s kisikom (Mueller, 2002):

$$\delta = \frac{C_{\infty 20}^*}{C_{s20}^*} = \frac{P_s + p_{d_e} - p_v}{P_s - p_v} \quad (4)$$



Slika 1 • Vpliv temperature na nasičenost s kisikom za brezdimenzijski faktor

Kjer pomenijo:

P_s – standardni barometrični tlak; 101,325 kPa

p_v – parni tlak (kPa)

p_{d_e} – efektivni tlak (povečan tlak zaradi potopitve prezračevala) (Pa)

$C_{\infty 20}^*$ – nasičena koncentracija kisika v čisti vodi na globini potopitve difuzorja pri temperaturi 20 °C (mg/l)

$h_e = 0,4h$
 $\delta = 1,00 + 0,03858h$ } drobni mehurčki in prezračevanje JET

$h_e = 0,3h$
 $\delta = 0,99 + 0,0291h$ } veliki mehurčki

Kjer pomenijo:

δ – korekcijski faktor za topnost kisika

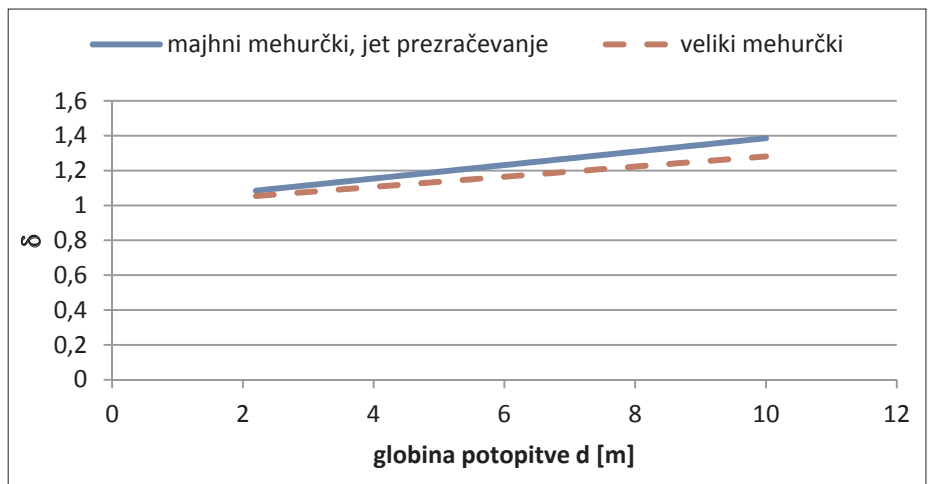
h_e – efektivna globina (m)

h – globina prezračevalnega reaktorja (m)

Vrednosti korekcijskega faktorja δ so za prezračevanje z majhnimi mehurčki in prezračevanje JET večje kot pri prezračevanju z velikimi mehurčki (slika 2).

Vpliv potopitve difuzorjev na topnost kisika lahko z uporabo enačb Yunta, Muellerja in Sauerja za majhne in velike mehurčke tudi grafično upodobimo, kot je prikazano na sliki 2 (Mueller, 2002).

Sistemi z velikimi mehurčki v primerjavi z drobnimi mehurčki in prezračevanjem s prezračevali JET zagotavljajo manjšo topnost kisika. Uporabljene so bile različne enačbe za drobne in velike mehurčke (Mueller, 2002):



Slika 2 • Vpliv globine potopitve difuzorjev na topnost kisika, povzeto po (Mueller, 2002)

2.3 Analiza vplivov na difuzijo, koncentracijo raztopljenega kisika v tekočini in kosmih aktivnega blata

Za določitev vrednosti koncentracije raztopljenega kisika moramo poznati minimalno koncentracijo raztopljenega kisika, da ohranimo maksimalno hitrost porabe kisika v aktivnem blatu. Prav tako moramo upoštevati različne potrebe po kisiku glede na spremembe v toku in organski obremenitvi.

Večina aktivnega blata je sestavljena iz kosmov mikroorganizmov. Najmanjša koncentracija raztopljenega kisika, ki ohrani celotno aktivnost razpršenih mikroorganizmov, da oksidirajo ogljikove organske snovi, je 0,0004 mg/l. Če želimo, da kisik doseže aktivno stran celične membrane v bakteriji, mora kisik najprej prodreti skozi tanko plast vode, ki obdaja kosme, nato pa se difundirati skozi matrico kosma v posamezno bakterijo. Celična membrana je tista, ki nadzoruje prehod raztopljenih snovi in dušikovih spojin v celico ter izločanje odpadnih snovi in stranskih produktov metabolizma iz celice. Padec koncentracije raztopljenega kisika od površine okroglega kosma v njegovo središče pri pogoju, da je hitrost porabe kisika konstantna, je podan z naslednjo enačbo (Mueller, 2002):

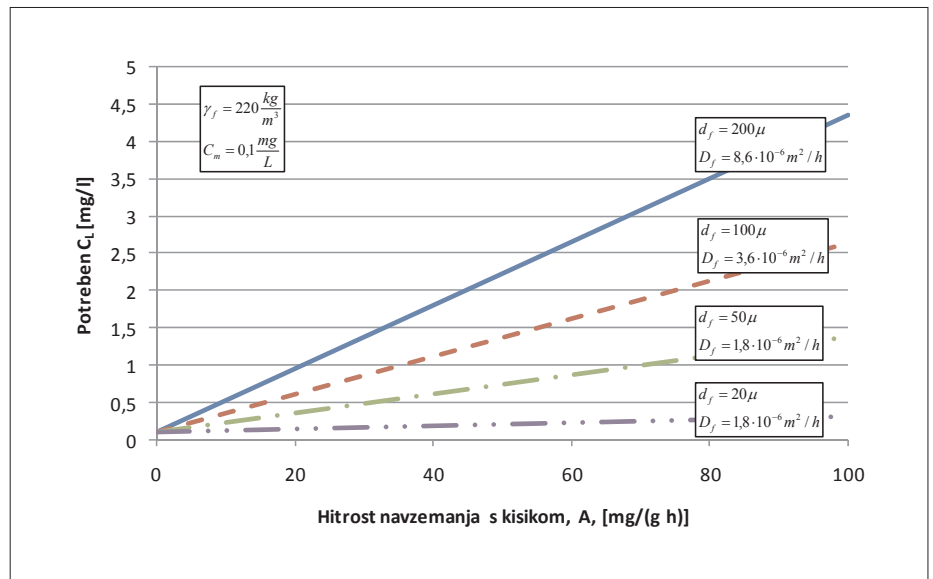
$$C_L = C_m + \frac{A\gamma_f d_f^2}{24D_f} \quad (6)$$

Kjer pomenijo:

- C_L – koncentracija kisika v tekoči fazi (mg/l)
- C_m – koncentracija kisika v centru kosma (mg/l)
- γ_f – specifična teža suhega kosma (kg/m³)
- D_f – difuznost kosma (m²/h)
- d_f – premer kosma (m)
- A – specifična hitrost porabe kisika $\left[\frac{mg}{g \cdot h}\right]$

Čim večji so kosmi in čim višja je hitrost porabe kisika, tem višja mora biti koncentracija raztopljenega kisika v odpadni vodi; kot je razvidno s slike 3. Večja ko je velikost kosmov, večje so učinkovite difuznosti.

Efektivna difuznost naraste s povečanjem indeksa volumna blata, specifično površinsko območje (specifična zunanja površina) pa najverjetneje zaradi povečane poroznosti kosma. Hitrost spremembe koncentracije kisika v prezračevalnem reaktorju označuje parameter specifične kapacitete oksigenacije (OC). Enačba za standardne pogoje je naslednja (Mueller, 2002):



Slika 3 • Vpliv upora masnega prenosa aktivnega blata na potrebno koncentracijo kisika

$$OC = \left(\frac{dC_L}{dt} \right)_{STD} = K_L a_{20} \cdot C_{\infty 20}^* = \frac{SOTR}{V} = SOTR_V \quad (7)$$

Pri tem so:

- OC – specifična kapaciteta prezračevanja v čisti vodi $\left[\frac{mg}{l \cdot h}\right]$
- SOTR – hitrost prenosa kisika pri standardnih pogojih (kg/h)
- SOTR_V – hitrost prenosa kisika pri standardnih pogojih na enoto volumna $\left[\frac{kg}{l \cdot m^3}\right]$
- V – volumen (m³)
- $K_L a_{20}$ – koeficient prenosa kisika v čisti vodi pri temperaturi 20 °C (h⁻¹)
- $C_{\infty 20}^*$ – nasičena koncentracija kisika (topnost) v čisti vodi na globini potopitve difuzorja pri temperaturi 20 °C (mg/l)
- C_L – koncentracija kisika v tekoči fazi (mg/l)
- t – čas (s)

Pri procesih čiščenja odpadne vode z aktivnim blatom je priporočena vrednost koncentracije raztopljenega kisika v aerobnem reaktorju med 1 mg/l in 3 mg/l.

2.4 Opis vnosa kisika na ČN1 in ČN2

ČN1

Prezračevanje odpadne vode na ČN1, ki je dimenzionirana za velikost 23.000 PE, poteka v šaržnem reaktorju (SBR), kjer se odvijejo štiri faze:

- faza polnjenja
- faza prezračevanja

- faza usedanja blata

- faza praznjenja

Faza polnjenja in prezračevanja traja dve uri. Prezračevanje reaktorja poteka z vpihovanjem stisnjenega zraka skozi na dnu položena cevna samozaporna membranska prezračevala. Prezračevanje je na začetku manj intenzivno, potem pa začne intenzivnost naraščati. Intenzivnost prezračevanja se prilagaja karakteristikam odpadne vode (IEI, 2005).

V fazi polnjenja in prezračevanja posameznega reaktorja se s potopno črpalko vsebina v reaktorju premeša. Po končani fazi polnjenja in prezračevanja se začne faza mirovanja, kjer vsebine reaktorja več ne prezračujemo in ne mešamo. Suspenzija aktivnega blata in vode se umiri in blato se začne usedati na dno prezračevalnika. Faza usedanja traja eno uro. Ob koncu te faze se odvečno blato izčrpa iz reaktorja. Sledi ji faza praznjenja, kjer se prečiščena voda preliva v iztočno kineto. Po končanem praznjenju se cikel čiščenja ponovi.

ČN2

ČN2 je klasična pretočna biološka čistilna naprava z dodatnim čiščenjem v peščenih filtrih in aerobno stabilizacijo blata velikosti 42.000 PE. Na ČN2 potekajo nitrifikacija, denitrifikacija in kemijsko čiščenje fosforja. Prezračevalnik ima dva enaka armiranobetonska reaktorja, ki sta zasnovana kot cevna reaktorja (plug flow) pravokotne oblike.

Ovisno od obratovalnih pogojev sta možni diskontinuirana ali simultana nitrifikacija in denitrifikacija. Potopna banana mešala omogočajo krožno gibanje vode v vsakem

reaktorju. Horizontalna hitrost gibanja vode je nad 0,3 m/s. Stisnjeni zrak se v oba prezračevalnika dovaja po skupnem cevovodu. V obeh prezračevalnikih je nameščen merilnik

koncentracije kisika v vodi. Območje merjenja vsebnosti kisika merilne sonde je od 0,1 do 20 mg/l kisika.

3 • REZULTATI MERITEV IN PRIMERJALNI IZRAČUNI VNOSA KISIKA

3.1 ČN1

Prezračevanje ČN1 poteka s cevnimi difuzorji, ki so narejeni iz fleksibilne membrane. Podpor-na cev membranskega difuzorja je narejena iz PVC-plastike, ki je kemijsko odporna proti zunanjim vplivom, prav tako pa je mehansko vzdržljiva. Največja hitrost zraka v cevovodih je 12 m/s, dobavljena količina zraka po projektni dokumentaciji pa znaša 2.900 m³/h na reaktor. Specifičen vnos kisika pri standardnih pogojih je minimalno 0,017 kgO₂/m³m. Difuzorji so nameščeni na nosilnem in razvodnem cevnem omrežju, ki je na betonska tla pritrjeno z nosilci na globini 4,12 m (IEI, 2005).

Iz podatkov merilnika kisika na ČN1 smo izdelali grafikone nihanja koncentracije kisika v prezračevalnem reaktorju za različne mesece. S slike 4 je razvidno, da v fazi polnjenja in prezračevanja koncentracija kisika skokovito naraste in se giblje nekje med 3 in 4 mg/l, po prenehanju prezračevanja pa začne strmo padati. Povprečna vrednost maksimalne koncentracije raztopljenega kisika je 3,19 mg/l.

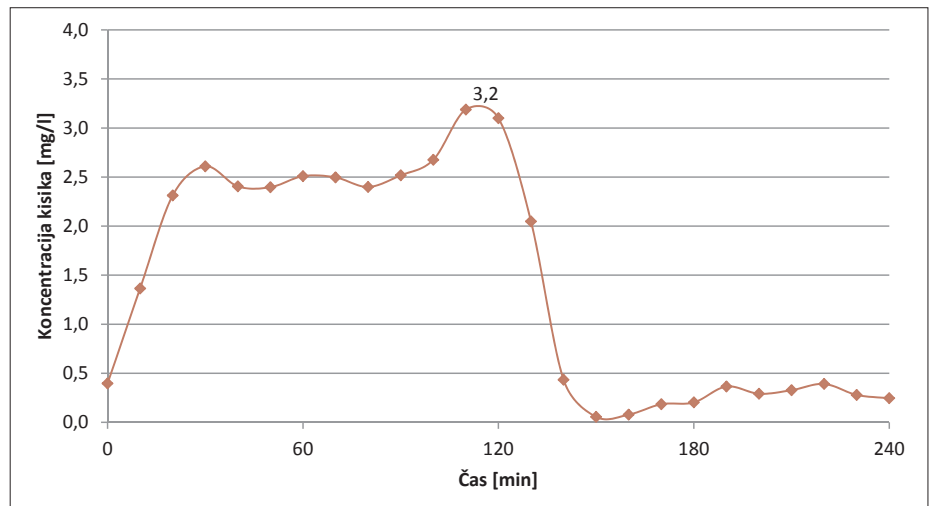
3.2 ČN2

Na ČN2 so na globini 4,75 m vgrajeni samozaporni membranski diski, ki proizvajajo majhne mehurčke. Hitrost zraka v cevovodih je maksimalno 12 m/s, vrednost faktorja alfa pa je 0,65. Vnos zraka pri normalnih pogojih znaša 2.500 m³/h, specifičen vnos kisika pri standardnih pogojih pa minimalno 0,015 kg · O₂/m³m. Globina vode v prezračevalnem reaktorju je 5,00 m, skupna prostornina reaktorja pa je 5.930 m³.

Izmerjeni podatki koncentracije kisika v posameznih conah (oksične in anoksične) so podani v preglednici 1 in zajemajo minimalne, maksimalne in povprečne koncentracije raztopljenega kisika v vodi v prezračevalniku 1 in 2 na ČN2. Na sliki 5 je prikazano mesečno nihanje koncentracije raztopljenega kisika v prezračevalniku.

3.3 Primerjava rezultatov

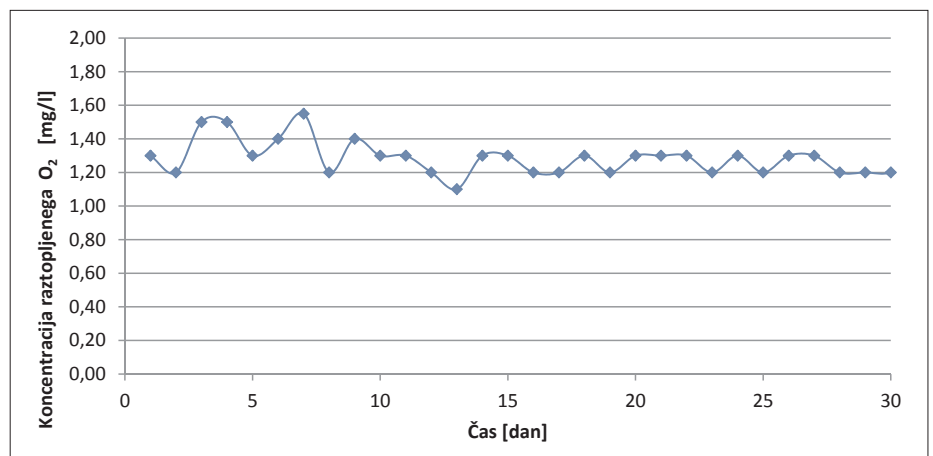
V ČN1 poteka prezračevanje z membranskimi perforiranimi cevmi, v ČN2 pa se uporabljajo



Slika 4 • Povprečna koncentracija raztopljenega kisika v prezračevalnem reaktorju v letu 2008 v prezračevalniku na ČN1

diski iz perforirane membrane za ustvarjanje majhnih mehurčkov. Aerobna biološka postopka odstranjevanja organsko razgradljivih snovi se med seboj razlikujeta. Na ČN1 uporabljajo modificiran postopek šaržnega biološkega reaktorja, kjer se med posameznimi cikli prezračevanje prekine. Oksidacijski jarek na ČN2 pa je nepretrgoma prezračevan, vsebuje pa anoksične cone, kjer poteka denitrifikacija.

V preglednici 2 je prikazana primerjava med izračuni za prezračevanje na obeh napravah. ČN sta različnih velikosti, zato se razlikujeta tudi mesečna dotoka na čistilno napravo in s tem obremenitev z BPK₅ (kg/d). Globina v obeh prezračevalnih reaktorjih znaša 5 m, potopitev prezračeval pa se razlikuje, kar nekoliko vpliva na topnost kisika v vodi. Tako pri ČN1 znašata globinski korekcijski faktor za



Slika 5 • Koncentracija raztopljenega kisika v prezračevalnikih na KČN2 za oktober 2008 po podatkih SCADA v prezračevalniku

Čas meritev		O ₂ – meritev s prenosnim merilnikom				O ₂ – meritev s prenosnim merilnikom			
		reaktor 1 merilno mesto				reaktor 2 merilno mesto			
mesec		1 - OX.1	2 - ANOX.2	3 - OX.2	4 - ANOX.2	1 - OX.1	2 - ANOX.2	3 - OX.2	4 - ANOX.2
		mg/l O ₂							
okt. 2008	povprečje:	0,9	0,2	0,8	0,2	1,3	0,2	0,9	0,1
	min:	0,8	0,1	0,6	0,1	1,0	0,1	0,6	0,1
	max:	1,0	0,3	0,9	0,3	1,5	0,3	1,1	0,1
nov. 2008	povprečje:	1,0	0,2	0,8	0,1	1,1	0,3	0,9	0,1
	min:	0,9	0,2	0,7	0,1	1,0	0,2	0,8	0,1
	max:	1,0	0,2	0,8	0,1	1,1	0,3	0,9	0,1
dec. 2008	povprečje:	1,0	0,5	0,8	0,2	1,0	0,5	0,7	0,1
	min:	0,9	0,4	0,7	0,1	0,9	0,4	0,7	0,1
	max:	1,0	0,5	0,8	0,2	1,0	0,5	0,7	0,1
jan. 2009	povprečje:	1,0	0,4	0,8	0,2	0,9	0,4	0,8	0,1
	min:	0,9	0,4	0,7	0,2	0,9	0,3	0,7	0,1
	max:	1,0	0,4	0,8	0,2	0,9	0,4	0,8	0,1
feb. 2009	povprečje:	1,0	0,4	0,9	0,3	1,1	0,3	0,9	0,3
	min:	1,0	0,3	0,9	0,3	1	0,3	0,8	0,2
	max:	1,0	0,4	0,9	0,3	1,1	0,3	0,9	0,3

Preglednica 1 • Koncentracija kisika v prezračevalnih reaktorjih ČN2 na različnih merilnih mestih za različne mesece

nasičenje s kisikom $\delta = 1,15895$ in nasičena koncentracija kisika pri standardnih pogojih $C_{\infty,20}^* = 10,54$ mg/l, medtem ko sta na ČN2 $\delta = 1,18325$ in $C_{\infty,20}^* = 10,76$ mg/l. Tlačni korekcijski faktor za topnost kisika je odvisen od nadmorske višine ČN. ČN1 leži malo nižje od ČN2. Ker zračni tlak z višino pada, znaša zračni tlak na nadmorski višini 172,8 m 1012,71 hPa, na višini 189 m pa 990,80 kPa. Izračunani korekcijski faktor tlaka za nasičenost s kisikom za ČN1 znaša 0,999, za ČN2 pa 0,978. Vrednosti temperaturnih korekcijskih faktorjev so skoraj enake.

Koncentracija kisika v prezračevalniku ČN1, kjer potekata tudi nitrifikacija in denitrifikacija, v povprečju znaša 3,1 mg/l. Za razliko je na ČN2 koncentracija kisika v oksičnem delu reaktorja 1,1 mg/l, potekata pa tudi nitrifikacija in denitrifikacija. Razlika je zelo velika. Po izračunih za prezračevanje je količina kisika, ki je potrebna za odstranjevanje ogljikovega onesnaženja, v ČN1 1.295 kg O₂/d, v ČN2 pa 4.800 kg O₂/d. Učinkovitost prenosa kisika pri standardnih pogojih (SOTE), ki je v večini primerov tudi pomemben projektni parameter za difuzne prezračevalne sisteme, je v ČN1 manjša kot v ČN2.

3.4 Energetska učinkovitost

Pri konvencionalnem čiščenju se največ energije porabi za (Tschobanoglous, 2003):

Parameter	ČN1	ČN2
Količina očiščene odpadne vode (m ³ /dan)	2.099	12.866
BPK ₅ (mg/l; kg/dan)	514; 1.078,8	4.000 kg/dan
Amonijev dušik (mg/l)	26,1	28,0
Nadmorska višina (m.n.m.)	172,8	189
Korekcijski faktor tlaka za nasičenost s O ₂	$\Omega = 0.999$	$\Omega = 0.978$
Povpr. temp. odp. vode v pr. reaktorju pozimi (°C)	11	12
Povpr. temp. odp. vode v pr. reaktorju poleti (°C)	21	22
Temperaturni korekcijski faktor τ (zima)	1,2136	1,2423
Temperaturni korekcijski faktor τ (poletje)	0,9802	0,9614
Globina vode v prezračevalnem reaktorju (m)	5	5
Globina vpihavanja zraka (m)	4,12	4,75
Dejanska koncentracija raztopljenega O ₂ v odpadni vodi (mg/l)	3,1	1,1
Količina kisika za ogljikovo oksidacijo pri obratovalnih pogojih* (kg/dan)	1.295	4.800
Kisik za celotno nitrifikacijo* (kg/dan)	252	1.670
potrebe po kisiku pri obratovalnih pogojih (AOR)* (kg/h)	64,5	269
Alfa faktor	0,65	0,65
Beta faktor	0,98	0,98
Nasičena koncentracija O ₂ pri stand. pogojih (mg/l)	10,54	10,76
Trajanje prezračevanja (h/dan)	12	24
SOR (potreba sistema po kisiku)* (kg/h)	149,5	481,2
Potrebna količina zraka* (m ³ /h; m ³ /h bazen)	2.074; 1.037	5.091; 2.545
Potrebna energija za prezračevanje (kW)	47	127

* teoretično izračunane vrednosti glede na podatke, ki so bili na razpolago

Preglednica 2 • Primerjava obremenitev in rezultatov prezračevanja na ČN1 in ČN2

- biološko čiščenje s procesi aktivnega blata (prezračevanje),
- črpalne sisteme,
- opremo za obdelavo blata.

Okrog 60 % celotne energije na čistilni napravi z aktivnim blatom se porabi za prezračevanje, zato je treba z ukrepi pri vodenju doseči zmanjšanje porabe energije in stroškov (Tschobanoglous, 2003). V (Rosso, 2007) je navedeno, da se za prezračevanje porabi od 40 do 75 % celotne energije.

Napredne čistilne naprave potrebujejo še večje količine električne energije. Naprave z biološkim čiščenjem za odstranjevanje dušika in filtracijo porabijo od 30 do 50 % več elektrike za prezračevanje, črpanje in obdelavo blata kot konvencionalne naprave z aktivnim blatom (Tschobanoglous, 2003).

Koncentracija raztopljenega kisika se pri procesih z aktivnim blatom navadno giblje med 1,0 in 1,5 mg/l. Za učinkovito obratovanje in kontrolo je nujno, da opravljamo točne meritve raztopljenega kisika v prezračevalnem reaktorju (Tschobanoglous, 2003).

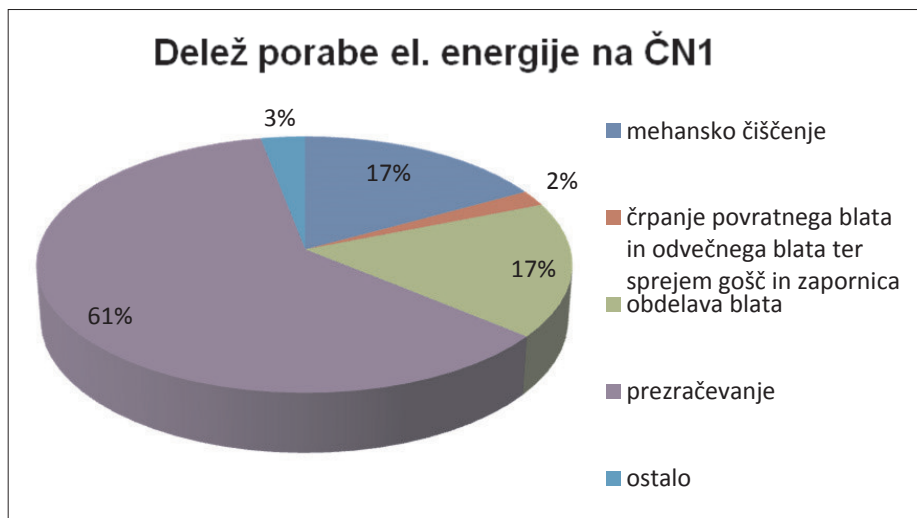
Čistilne naprave, v katerih potekata tudi nitrifikacija in denitrifikacija, imajo izboljšano učinkovitost prenosa kisika (OTE), kar posledično zmanjša potrebe po energiji (Rosso, 2007). Izboljšani prenos je posledica večjega srednjega zadrževalnega časa (MCRT), ki je povezan s povečanimi faktorji (od 0,2 do 0,5 za konvencionalno čiščenje, od 0,4 do 0,7 samo za nitrifikacijo ter od 0,5 do 0,75 za nitrifikacijo in denitrifikacijo), česar pa inženirji ne upoštevajo vedno.

3.5 Energetska učinkovitost na ČN1

Iz projektnih podatkov za ČN1 smo izračunali delež porabe električne energije prezračevanja, ki glede na vso porabljeno električno energijo znaša okoli 61 %. Razmerja med posameznimi stopnjami so podana na sliki 6. Ker na objektu za prezračevanje ni merilnika porabe električne energije, smo predpostavili, da se ta delež v obratovanju ni spremenil. Tako smo dobili rezultate za mesečno porabo elektrike samo za prezračevanje ter povprečno porabo energije za prezračevanje na PE. Rezultati so podani v preglednici 3. Največ električne energije se je porabilo oktobra, poraba za prezračevanje je znašala 31.730,4 kWh oziroma 1,4 kWh/PE. Najmanjša poraba za prezračevanje je bila januarja, znašala je 1,2 kWh/PE, če za PE upoštevamo, da je kapaciteta ČN 23.000 PE. Trenutno je povprečni dnevni dotok odpadne vode na čistilno napravo 2100 m³/d. Tako je

Leto 2008	celotna poraba elektrike (kWh)	elektrika za prezračevanje (61 %)		
		(kWh)	kWh/PE	Wh/m ³
Januar	45455	27727,6	1,2	426
Februar	46088	28113,7	1,2	478
Marec	51712	31544,3	1,4	485
April	46903	28610,8	1,2	454
Maj	47993	29275,7	1,3	450
Junij	50659	30902,0	1,3	491
Julij	47555	29008,6	1,3	446
Avgust	47715	29106,2	1,3	447
September	45519	27766,6	1,2	441
Oktober	52017	31730,4	1,4	488
November	48842	29793,6	1,3	473
December	47039	28693,8	1,2	441
SKUPAJ	577497	352273,2	15,3	5520
POVPREČJE	48125	29356	1,3	460

Preglednica 3 • Mesečna poraba električne energije na PE/m³ za prezračevanje na ČN1



Slika 6 • Delež porabe energije posameznih delov ČN1

povpr. kWh/leto	poraba el. energije kWh/PE/leto	% energije za prezračevanje	Energija za prezračevanje			
			kWh/mesec	kWh/mesec/PE	Wh/dan/PE	Wh/m ³
1668.000	39,7	45	62550	1,489	49,6	162
		50	69500	1,655	55,2	180
		55	76450	1,820	60,7	198
		60	83400	1,986	66,2	216
		65	90350	2,151	71,7	234

Preglednica 4 • Predvidena poraba električne energije za prezračevanja glede na povprečno porabo energije na mesec

poraba električne energije za prezračevanje, če upoštevamo dnevni dotok na čistilno napravo, naslednja: 488 Wh/m³ za oktober in 426 Wh/m³ za januar.

Potrebna izračunana energija za prezračevanje pri dnevnem dotoku odpadne vode 2099 m³/d pri koncentraciji BPK5 514 mg/l znaša 47 kW. Če koncentracijo kisika v prezračevalniku zmanjšamo s 3,1 mg/l na 2,0 mg/l, znaša izračunana energija, ki jo rabimo za prezračevanje 38 kW, kar je okrog 20 % manj, kot je bilo pri višji koncentraciji kisika.

3.6 Energetska učinkovitost na ČN2

Na ČN2 v prezračevalnikih niso vgrajeni merilniki porabe električne energije. Iz različnih virov je znano, da se delež prezračevanja na komunalnih čistilnih napravah giblje med 50 in 60 %, zato smo pri določitvi porabe električne energije uporabili ta podatek. Za leto 2008 je povprečna poraba električne energije na ČN2 znašala 139.000 kWh/mesec, kar je 1668.000 kWh/leto.

Poraba električne energije za prezračevanje, glede na dotok na ČN, če je delež po-

rabe energije za prezračevanje 45 %, je 162 Wh/m³ in 234 Wh/m³ pri deležu 65 % električne energije za prezračevanje (kot je prikazano v preglednici 4).

Na obe ČN bi bilo smotno namestiti merilnike porabe električne energije za prezračevanje, saj je le iz dejanskega stanja različnih parametrov v času obratovanja možno določiti točno porabo energije za prezračevanje in zmanjšati stroške porabe energije. Na ČN1 je smiselno zmanjšati koncentracijo kisika v prezračevalnem reaktorju na 2,0 mg/l.

4 • SKLEP

V članku smo predstavili in analizirali procese prezračevanja ter jih primerjali na dveh čistilnih napravah srednje velikosti. Povečanje učinkovitosti energijske porabe prezračevalnih procesov ima lahko največji vpliv na porabo energije in posledično tudi na obratovalne stroške čistilne naprave, saj stroški prezračevanja obsegajo od 45 do 75 odstotkov vseh stroškov ČN. Ker dejanske vrednosti za porabo energije samo za prezračevanje niso na razpolago, smo izračune naredili na podlagi podatka, da se okrog 60 % celotne energije na ČN z aktivnim blatom porabi za prezračevanje. Pričakovano je poraba energije za prezračevanje na čistilni napravi z oksidacijskim jarkom za 53 % večja od porabe za prezračevanje na ČN zaradi njene velikosti in

delovanja prezračeval 24 h/dan. Večje razlike nastajajo pri koncentraciji raztopljenega kisika v prezračevalniku, kjer je ta tudi do 4-krat večja na ČN1 in presega priporočeno mejo raztopljenega kisika med 1 in 3 mg/l, s tem pa porabi bistveno več energije, kot je treba. To potrjuje tudi okrog 200 % večja poraba električne energije na ČN1 glede na dnevni dotok odpadne vode na čistilno napravo v primerjavi s ČN2. Velikokrat se izkaže, da so pri vodenju čistilne naprave pomanjkljivosti, ki sicer ne vplivajo na učinkovitost čiščenja, ampak zaradi slabega poznavanja delovanja procesov ustvarjajo veliko večje stroške čiščenja, kot je potrebno. Sistemi za nadzor prezračevanja na ČN morajo zato delovati pravilno in zanesljivo. Njihovo delovanje je odvisno od dinamičnih ka-

rakteristik, kot so vrsta procesa, prezračevalna oprema, meritvena oprema, vrsta nadzora in kontrolni parametri. Vse te lastnosti je treba vključiti v načrtovanje, merjenje in nadzorne sisteme. Izobraževanje zaposlenih pri ČN ima pri tem ključno vlogo, saj je le tako omogočeno optimalno čiščenje odpadne vode. Z vidika vodij čistilnih naprav je pomembno, da zmanjšajo stroške čiščenja ter zagotovijo stabilno in zanesljivo delovanje ČN. Investicije v različne meritve in monitoring učinkovitosti prenosa kisika ter delovanja sistema prezračevanja lahko pomenijo večji investicijski strošek, vendar so dolgoročno priporočljive, saj z njimi lahko ocenimo dejansko stanje in z različnimi ukrepi izboljšamo delovanje procesov, prihranimo pri porabi energije in s tem tudi pri stroških. Z zmanjšanjem koncentracije kisika na ČN1 z vrednosti 3,1 mg/l na 2,0 mg/l bi po naših izračunih lahko zmanjšali porabo energije za prezračevanje za okrog 15 do 20 %.

5 • LITERATURA

- ASCE, Design of municipal wastewater treatment plants: WEF Manual Practice 8: ASCE Manual and Report on Engineering Practice No. 76: Volume 2. Water Environment Federation, Alexandria, Reston, 2500 str., 1998.
- ATV-DVWK-A, 131E, Dimensioning of Single-Stage Activated Sludge Plants, 57 str., 2000.
- ATV-M 209, Measurement of the Oxygen Transfer in Activated Sludge Aeration Tanks with Clean Water and in Mixed Liquor, 56 str., 1996.
- Xylem, <http://www.xylem.com/Assets/Resources/460-Sanitaire-Difussers.Jetaerators.Blowers-Aeration.pdf>, povzeto 28. 9. 2015.
- IEI, Inštitut za ekološki inženiring, PID, CČN Ljutomer, Maribor, 2005.
- Mueller, J., Boyle, W., Pöpel, J., AERATION: Principles and Practise, Boca Raton, Florida, CRC Press, 353 str., 2002.
- Panjan, J., Čiščenje odpadnih voda, Študijsko gradivo, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, 169 str., 2000.
- Panjan, J., Osnove čiščenja odpadnih voda, Študijsko gradivo, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, 172 str., 2001.
- Rosso, D., Stenstrom, M. K., Surfactant effects on - factors in aeration systems, Water research no. 40, str. 1397-1404., 2006.
- Rosso, D., Libra, J.A., Wiehe, W., Stenstrom, M. K., Membrane properties change in fine-pore aeration diffusers: Full-scale variations of transfer efficiency and headloss, Water research no. 42, str.: 2640-2648., 2008.
- Roš, M., Biološko čiščenje odpadne vode, Ljubljana, GV Založba, d. o. o., 243 str., 2001.
- Tchobanoglous, G., Metcalf, L., Eddy, H. P., Wastewater engineering, Treatment and Reuse. New York, McGraw-Hill, 1819 str., 2003.
- Wiesmann U., Choi, I. S., Dombrowski, E. M., Fundamentals of Biological Wastewater Treatment, Weinheim, Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, 391 str., 2007.