

Vpliv statičnega magnetnega polja na odpadno vodo

Effect of static magnetic field on the wastewater

Jasmina Filipič

ROTO Pavlinjek, Gorička ulica 150, 9000 Murska Sobota

E-mail: jasmina.filipic@roto.si ; Tel.: +386-2-52-52-156

Povzetek: Vedno strožja okoljevarstvena zakonodaja in višanje stroškov obdelave, vezana predvsem na obdelavo vedno večjih količin odpadnih voda, nas silijo k pospešenemu iskanju novih naprednih tehnologij čiščenja. Številne dosedanje raziskave so pokazale, da se pod vplivom statičnega magnetnega polja poveča odstranjevanje organskih substratov iz odpadnih voda. Osnovni namen raziskave je tako bil opredeliti vpliv srednje močnega statičnega magnetnega polja na učinkovitost biološkega čiščenja realne komunalne odpadne vode obremenjene z dušikovimi spojinami. Vzorce odpadne vode z aktivnim blatom (v sekvenčen šaržnem reaktorju) smo direktno izpostavljali statičnemu magnetnemu polju gostote $B = (0, 10, 30, 50) \pm 0,5$ mT. Rezultati raziskav kažejo, da statično magnetno polje gostote $B = 10 \pm 0,5$ mT proces čiščenja inhibira, medtem, ko statično magnetno polje gostote $B = (30, 50)$ mT poveča oksidacijsko hitrost amonijevega dušika za $w = 60 \pm 5$ oz. do 85 ± 5 % pri obdelavi z aktivnim blatom. Iz rezultatov raziskav je razvidno, da lahko z ustrežno gostoto in časom izpostavitve aktivnega blata statičnemu magnetnemu polju povečamo odstranjevanje dušikovitih spojin iz odpadne vode.

Ključne besede: odpadna voda, bakterije, statično magnetno polje, dušikove spojine.

Abstract: Stricter environmental legislation and increasing costs of handling, which is tied especially with handling of growing amounts of wastewater, are forcing us towards accelerating search of finding new, advanced technologies of cleaning wastewater. Numerous studies have found that under the influence of static magnetic field the removal of organic substrates is increased. The fundamental goal of this research was to define the effect of moderate static magnetic field on effectiveness of biological cleaning real communal wastewater aggravated with nitrogen compounds. We directly exposed samples of wastewater with activated sludge (in sequencing batch reactor) to static magnetic field of density $B = (0, 10, 30, 50) \pm 0,5$ mT. Research results show that static magnetic field of density $B = 10 \pm 0,5$ mT inhibits the cleaning process while static magnetic field of density $B = (30, 50)$ mT increases oxidation speed of ammonium nitrogen for $w = 60 \pm 5$ respectively up to 85 ± 5 % at working with activated sludge. From the research results it is obvious that with the appropriate density and time of exposure of active sludge to static magnetic field we can increase removal of nitrogen compounds from wastewater.

Key words: wastewater, bacteria, static magnetic field, nitrogen compounds.

1. Uvod

Čiščenje odpadnih voda

Nagla rast prebivalstva na svetu je močno povečala probleme čiščenja odpadnih voda [1]. Odpadne vode delimo na: komunalne, industrijske in padavinske odpadne vode. Največja okoljska težava postaja onesnaževanje s komunalnimi in industrijskimi odpadnimi vodami, ki so resni onesnaževalci podtalnice, rek in jezer. Kakovost komunalne vode se določa v skladu s predpisano uredbo, tj. Uredbo o emisiji snovi pri odvajanju odpadne vode iz komunalnih čistilnih naprav (Ur. l. RS, št. 45/2007, 63/2009, 105/2010), ki določa mejne vrednosti parametrov odpadne vode na iztoku iz komunalne čistilne naprave.

Čiščenje odpadnih voda je kombinacija ločenih procesov, ki poteka v treh stopnjah. Prva stopnja predstavlja primarno/mehansko čiščenje (usedanje, flotacija, centrifugiranje, filtracija...), druga stopnja pa sekundarno (biološko) čiščenje, ki zajema odstranjevanje organskih snovi s pomočjo bakterij. Tretja stopnja je terciarno čiščenje, ki zajema odstranjevanje fosforja in dušika [2, 3, 4]. Najpomembnejši del čiščenja predstavlja biološko čiščenje, kjer imajo ključno vlogo mikroorganizmi. Biološko čiščenje je odvisno tudi od:

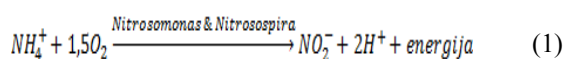
- koncentracije raztopljenega kisika;
- temperature;
- vrednosti pH-ja;
- prisotnosti toksičnih snovi;
- usedljivosti blata.

Nitrifikacija

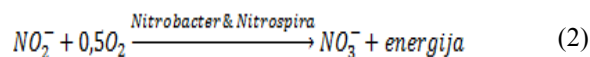
Med procese biološkega čiščenja spadata nitrifikacija in denitrifikacija, ki predstavljata najpomembnejšo stopnjo v procesu odstranjevanja dušikovih spojin.

Nitrifikacija je proces oksidacije amonijevega dušika v nitritni dušik in nadalje do nitratnega dušika [5]. Parametri, ki vplivajo na nitrifikacijo so temperatura, vsebnost ustreznih substratov, koncentracija NaCl, vsebnost kisika in pH [6, 7, 8]. Proces poteka v aeracijskem bazenu in se začne z mešanjem onesnažil z aerobnimi bakterijami in vpihovanjem kisika. Je pomemben biološki proces v dušikovem ciklu in ima vpliv na kakovost iztoka iz čistilnih naprav [5]. Poteka v dveh stopnjah, in sicer v prvi stopnji poteče oksidacija amonijevega dušika do nitritnega dušika, v drugi stopnji poteče oksidacija nitritnega dušika do nitratnega.

1. stopnja nitrifikacije:



2. stopnja nitrifikacije:



Proces je pomemben za odstranjevanje amonijaka iz odpadnih voda in poteka s pomočjo dveh kemoavtotrofnih bakterij: amonij oksidacijske bakterije (AOB) in nitritne oksidacijske bakterije (NOB). Poznavanje fiziološke aktivnosti in združbe AOB v procesu čiščenja odpadnih voda je zelo pomembno pri konstruiranju in delovanju čistilnih naprav, saj ti organizmi predstavljajo izredno nizko stopnjo rasti ter veliko občutljivost na spremembe in inhibitorje v procesu čiščenja odpadnih voda [2]. AOB najdemo v tleh, sladkih in morskih vodah [9]. Značilni predstavniki AOB so: *Nitrosomonas*, *Nitrospira* in *Nitrosococcus*. Značilni predstavniki NOB so *Nitrobacter*, *Nitrospira*, *Nitrospina* in *Nitrococcus*. Najpogosteje določena NOB v večini naravnih habitatov in biološkem čiščenju odpadnih voda je bakterija *Nitrobacter*. Za njo je značilno, da jo lahko zelo enostavno gojimo in izoliramo iz mnogih okoljskih vzorcev [2].

Dejavniki vpliva na nitrifikacijo

Narejenih je bilo veliko študij o vplivu nizkih koncentracij kisika, temperature in pH-ja na nitrifikacijo.

- vpliv temperature

Eden izmed najpomembnejših parametrov vpliva na nitrifikacijo je temperatura [6]. Z naraščajočo temperaturo postajajo nitrifikacijske bakterije vse bolj aktivne in se podvojujejo. Nitrifikacijske bakterije rastejo pri temperaturi $T = (12-40) \text{ }^\circ\text{C}$. Nizka temperatura ima velik vpliv na hitrost nitrifikacije, saj pod temperaturo $T = 15 \text{ }^\circ\text{C}$ hitrost strmo upada in se pri temperaturi $T = 12 \text{ }^\circ\text{C}$ zmanjša za $w = 50 \%$. Prav tako temperatura nad $T = 45 \text{ }^\circ\text{C}$ nitrifikacijo upočasni. Vpliv temperature $T = (30-45) \text{ }^\circ\text{C}$ na aktivnost nitrifikacijskih bakterij še vedno ni dobro raziskan. Guo in sodelavci so ugotovili, da parcialna nitrifikacija poteče pri optimalni temperaturi, tj. $T = (30-35) \text{ }^\circ\text{C}$ [10].

Za izračun maksimalne hitrosti rasti nitrifikacijskih bakterij pri različnih temperaturah se uporabljajo različni modeli, kot na primer Downin-hopwoodov, Bernardov in Hultmanov model, pri čemer EPA (Environmental protection agency) priporoča Downin-Hopwoodov model [11]:

$$\mu_n = (0,47) e^{0,098(T-15)} \quad (3)$$

Pri tem so:

μ_n = specifična hitrost rasti nitrifikatorjev

e = Eulerjevo število (2,7182...)

T = temperatura vode

Model predvideva, da je v primeru temperature $T = 15 \text{ }^\circ$

C hitrost rasti $0,47 \mu_n\text{max/d}$ oziroma $0,29 \mu_n\text{max/d}$ pri temperaturi $T = 10^\circ\text{C}$.

- vpliv pH-ja

Vrednost pH-ja vpliva na nitrifikacijo na dva načina: s spremenjenim razmerjem koncentracij amonijak/ amonijev ion ($\text{NH}_3/\text{NH}_4^+$) oziroma z razmerjem dušikove III-kislina oziroma nitrita ($\text{HNO}_2/\text{NO}_2^-$) pri različnih vrednostih pH-ja vpliva na dostopnost substrata. Med nitrifikacijo lahko pH pade, ker se med oksidacijo amonijaka do nitrata sproščajo protoni v vodno okolje, če odpadna voda nima zadostne puferske kapacitete [12], s čimer vpliva na razmerje $\text{NH}_3/\text{NH}_4^+$. Nitrifikacijske bakterije so aktivne v območju $\text{pH} = 6,5 - 8,5$ [13]. Čeprav je tudi za najpomembnejši nitrifikacijski bakteriji, Nitrosomonas in Nitrobacter, optimalni pH njune aktivnosti $7,5 - 8,5$ [14], je aktivnost bakterij zelo zmanjšana pri $\text{pH} = 8,0 - 9,0$ [15]. Večina procesov v aktivnem blatu poteka pri $\text{pH} = 6,8 - 7,2$. Vrednost pH-ja v biološkem sistemu se spreminja glede na reakcije, ki potekajo v samem sistemu – tako vrednost pH-ja narašča, če poteka denitrifikacija, oziroma vrednost pada, če poteka nitrifikacija [16].

- vpliv kisika

Za nitrifikacijske bakterije je značilno, da so čisto aerobne bakterije, zato proces nitrifikacije poteka samo v prisotnosti prostega kisika [17]. Po teoriji koncentracija raztopljenega kisika v procesu nitrifikacije ne sme pasti pod $c = 2 \text{ mg L}^{-1}$ [18]. Literatura navaja, da nitrifikacija pri nizkih koncentracijah kisika ($c < 0,8 \text{ mg L}^{-1}$) ni učinkovita [19, 20], in tudi, da je pri koncentracijah raztopljenega kisika v mejah $c = (0,6 - 7,1) \text{ mg L}^{-1}$ vpliv na hitrost nitrifikacije težko izmeriti. To pomeni, da pri visokih koncentracijah kisika, ta ni omejujoči dejavnik in da znatno povečanje le-tega ne bi pospešilo nitrifikacije. Prav zato je kontroliranje koncentracije kisika v reaktorju zelo pomemben dejavnik [8, 21].

Vpliv statičnega magnetnega polja (SMP) na čiščenje odpadne vode

Dosedanji rezultati laboratorijskih raziskav o vplivu magnetnega polja (MP) na odstranjevanje dušikovih spojin iz odpadne vode so si nasprotujoči [22, 23] – nekatere raziskave navajajo zaviranje, druge pa kažejo na povečanje odstranjevanja dušikovih spojin pod vplivom MP-ja [23], kjer je vpliv odvisen tako od vrste MP-ja (statično ali dinamično; homogeno, pulzirajoče ali altenirajoče) kot tudi od časa izpostavljenosti in odpadne vode (sintetična, realna odpadna voda). Glede na objavljeno literaturo vpliv SMP-ja razdelimo na:

- vpliv na odpadno vodo;
- vpliv na mikroorganizme.

Vpliv magnetnega polja na biološke procese v odpadni vodi je preučevalo kar nekaj avtorjev. Leta 2000 sta Yavuz in Celebi ugotovila, da se je v vzorcu izpostavljenemu statičnemu magnetnemu polju gostote $B = 17,8 \text{ mT}$ in pH-ja 7,5, porabilo 44 % glukoze kot v neizpostavljenem kontrolnem vzorcu [24]. Medtem ko pa pri pulzirajočem magnetnemu polju ($v = 50 \text{ Hz}$, 2 s vklopljeno, 2 s izklopljeno, $\text{pH} = 7,5$) ugotovitve kažejo, da je vpliv rahlo inhibitoren oziroma da ni vpliva na odstranjevanje glukoze iz odpadne vode. Raziskave prav tako kažejo, da periodična izpostavitve magnetnemu polju ($B = 40 \text{ mT}$, permanentna magnetna) nima vpliva na odstranjevanje KPK-ja (kemijska potreba po kisiku) iz odpadne vode, medtem ko je bilo odstranjevanje dušikovih spojin (Kjeldahlov dušik, organski dušik) pospešeno za $w = (6 - 10) \%$ pod vplivom magnetnega polja, hkrati pa se je hitrost nitrifikacije povečala za 1,6-krat [23]. Chen in Li sta preučevala vpliv statičnega magnetnega polja na aktivno blato, ki sta mu dodajala različne substrate (acetat, propanoat, butarat) in dokazala, da se pod vplivom statičnega magnetnega polja gostote $B = (7, 21, 42) \text{ mT}$, časa izpostavitve $t = 10$ dni in temperature $T = 25^\circ\text{C}$ poveča odstranjevanje policikličnih aromatskih spojin (PHA) iz odpadne vode, vendar je vpliv odvisen od gostote statičnega magnetnega polja in vrste substrata [25]. Ľebkowska in sodelavci so prav tako dokazali, da se pod vplivom statičnega magnetnega polja ($B = 7 \text{ mT}$, $t = 28$ dni, $T = 20 \pm 2^\circ\text{C}$) poveča odstranjevanje formaldehida iz odpadne vode za približno $w = (26-30) \%$ [26]. Vpliv magnetnega polja na mikroorganizme je tesno povezniti tudi s temperaturo, pri kateri poteka [27, 28]. Ji in sodelavci so ugotovili, da je pozitiven učinek magnetnega polja na odstranjevanje KPK-ja iz odpadne vode najučinkovitejši v območju temperatur $T = (20-40)^\circ\text{C}$, medtem ko je pri nižjih temperaturah razlika med izpostavljenimi in neizpostavljenimi vzorci manjša. Podobno so opazili za pH, kjer je bil učinek statičnega magnetnega polja na odstranjevanje KPK-ja največji v intervalu pri $\text{pH} = 6,0 - 10,0$ [27].

Najnovejše raziskave kažejo, da magnetno polje pozitivno vpliva na čiščenje odpadne vode ter na rast in aktivnost mikroorganizmov [23, 24], raziskav na to temo je sicer relativno malo in zato mehanizem delovanja magnetnega polja ostaja bolj ali manj neznan. Problem nastane tudi, ker se objave razlikujejo v izboru gostot magnetnega polja $B = (10^{-7}-10) \text{ T}$, pri čemer je včasih aplicirano statično magnetno polje včasih pulzirajoče magnetno polje. Več raziskav je bilo narejenih na evkariontih. Ugotovili so, na primer, da srednje močno statično magnetno polje gostote $B = (10-500) \text{ mT}$ povzroča spremembe pri prenosu Ca^{2+} ionov in prepustnosti ionov skozi kanalčke celične membrane [29] ter tudi anizotropijo bioloških membran. To naj bi vplivalo na aktivnost membranskih proteinov [30], vendar škodljivi vpliv statičnega magnetnega polja na

živali in človeka še niso bili dokazani [31]. Pri prokariotih naj bi statično magnetno polje vplivalo bakterijski rast in preživetje [32, 33, 34], toda rezultati teh raziskav so si zelo nasprotujoči. Ji in sodelavci so pokazali, da statično magnetno polje gostote $B = 450$ mT inhibira rast in pobije bakterijo *E. coli*, ko je ta $t = 60$ min izpostavljena statičnemu magnetnemu polju [32]. Inhibitorni vpliv narašča tudi z naraščajočo temperaturo TEM in SEM sta pokazala strukturne spremembe na celicah *E. coli* izpostavljenih SMP-ju. Pojav so pripisali nastanku kisikovih radikalov (močan oksidacijski vpliv), nastalih pod vplivom statičnega magnetnega polja. Med normalno presnovo se kisik reducira do H_2O v mitohondriju med proizvodnjo energije z oksidativno fosforilacijo. Med samim procesom nastajajo vmesni reaktivni kisikovi radikali: anionski radikal superoksid, vodikov peroksid in vodikov radikal. Celice vsebujejo različne lovilce teh radikalov, ki skrbijo za obrambni mehanizem pred oksidanti. Če so ti lovilci izčrpani, na primer zaradi izpostavljenosti statičnemu magnetnemu polju, pride do nastajanja presežka kisikovih radikalov, kar povzroča poškodbe celic, tkiv itd. [35]. V nasprotju z Ji in sodelavci [32] so Potenza in sodelavci [33] ugotovili, da statično magnetno polje gostote $B = 300$ mT nima vpliva na rast bakterije *E. coli* v kulturno bogatem gojišču pod aerobnimi pogoji.

Kljub številnim raziskavam je vpliv statičnega magnetnega polja na bakterijsko fiziologijo in mehanizem, ki je odgovoren za razgradnjo dušikovih spojin v procesih čiščenja odpadne vode, skoraj neznan.

2. Materiali in metode

Tuljava in pretvornik

Statično magnetno polje je bilo sproženo s pomočjo tuljave, skozi katero smo spustili enosmerni električni tok, ki je v svoji okolici ustvaril statično magnetno polje. Karakteristike tuljave, izdelane v podjetju Elektromehanika in elektroinstalaterstvo, Peter Pihler, s. p., Ptuj, so podane v preglednici 1.

Preglednica 1. Karakteristike tuljave.

Število ovojev žice	1000
Premer žice	2 mm
Zunanji premer tuljave	250 mm
Notranji premer tuljave	152 mm
Višina tuljave	200 mm
Teža tuljave	5 kg

Tuljava se je napajala s pomočjo laboratorijskega AC/DC-pretvornika (Puctec model DF1730) z

maksimalno napetostjo $14,7 \pm 0,1$ V. V sredini tuljave, kjer so bili vzorci izpostavljeni statičnemu magnetnemu polju, je bila gostota statičnega magnetnega polja:

– $B = (10, 30, 50) \pm 0,5$ mT – bioreaktor z odpadno vodo;

Gostota statičnega magnetnega polja je bila izmerjena s pomočjo Gaussmetra (Magnet-Physics, Dr. Steingroever GmbH).



Slika 1. Uporabljen tuljava in pretvornik.

Uporabljeni magnetni sistem

Sekvenčni šaržni bioreaktor (SBR) je bil vstavljen v središče tuljave in s tem izpostavljen statičnemu magnetnemu polju. Gostota magnetnega polja v SBR-ju je bila $B = (10, 30, 50) \pm 0,5$ mT. Kontrolni (vzorci, ki niso bili izpostavljeni statičnemu magnetnemu polju) in izpostavljeni vzorci so bili ves čas preizkusa v temi zaradi izločitve vpliva svetlobe na sam preizkus. Vzorci v SBR-ju so bili izpostavljeni statičnemu magnetnemu polju v temperaturni komori, kjer je bila temperatura regulirana avtomatsko. Temperatura je bila merjena v obeh SBR-jih s pomočjo temperaturnega senzorja ali termometra, ki je bil poleg reaktorjev, in je bila ves čas preizkusa konstantna, tj. $T = 21 \pm 0,5$ °C. Vsi eksperimenti z aktivnim blatom in odpadno vodo so bili ponovljeni trikrat.

Vzorčenje odpadne vode

Pred vsakim preizkusom smo iz čistilne naprave vzeli sveže aktivno blato in ga štiri dni prilagajali novim pogojem. V fazi prilagoditve so se mikroorganizmi prilagodili na nove pogoje v reaktorju, kot so pH, raztopljeni kisik in temperatura. Ti so bili v reaktorju merjeni kontinuirano in so bili ves čas konstantni, tj. $pH = 7,8 \pm 0,2$; $T = 21 \pm 0,5$ °C in $DO = 3 \pm 0,3$ mg L⁻¹. Aktivno blato je bilo razdeljeno v dva SBR-ja z volumnom $V = 2$ L. En reaktor z aktivnim blatom je bil izpostavljen statičnemu magnetnemu polju, drugi je bil kontrolni vzorec. Po štirih dneh faze prilagoditve smo v reaktor dodali zamrznjeno odpadno vodo, ki je imela vedno iste koncentracije amonijevega dušika, nitratnega dušika, nitritnega dušika, celotnega dušika in celotnega organskega ogljika. Končna sestava vzorca v SBR-ju je bila iz 300 mL svežega aktivnega blata in 1700 mL

odpadne vode. Delež sušine je bil ves čas enak in je znašal $5,7 \pm 0,1 \text{ g L}^{-1}$.

Določitev odstranjevanja dušikovih spojin iz odpadne vode in izračun hitrosti oksidacije amonijevega dušika

Po štirih dneh faze prilagoditve in dodatku odpadne vode smo 25 ur kontinuirano vsako uro jemali vzorce iz obeh reaktorjev (kontrolnega in izpostavljenega statičnemu magnetnemu polju). Spremljali smo porabo amonijevega dušika, nastanek nitritnega in nitratnega dušika ter celotni dušik.

Po pridobljenih podatkih iz preizkusa smo izračunali hitrost oksidacije amonijevega dušika (q_N), ki je izražena kot $\text{mg NH}_4^+ - \text{N}$, odstranjenega na uro na g sušine v reaktorju. Enačba 4 je izražena kot [18]:

$$q_N = \frac{d\gamma_{\text{NH}_4^+ - \text{N}}}{dt\gamma_X} \quad (4)$$

Pri tem sta:

$d\gamma$ – substrat ($\text{NH}_4^+ - \text{N}$) v odvisnosti od časa dt , mg L^{-1}

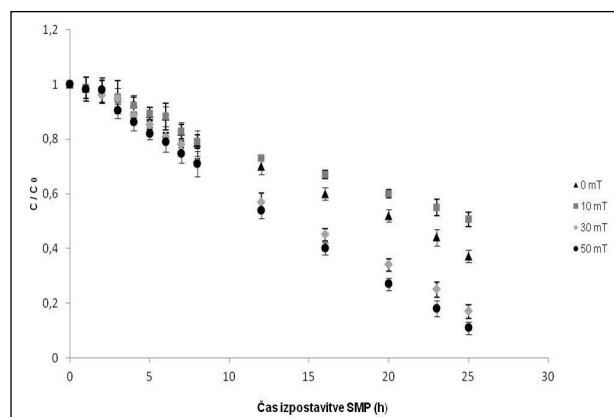
γ_X – sušina (koncentracija aktivnega blata v reaktorju), mg L^{-1}

3. Rezultati raziskav

Vpliv statičnega magnetnega polja na odstranjevanje amonijevega dušika iz odpadne vode

Vpliv magnetnega polja na odstranjevanje amonijevega dušika iz odpadnih voda je zelo slabo raziskan. V literaturi obstajata le dve objavi, ki preverjata to vprašanje [23, 24], pri čemer so avtorji prve objave proučevali odstranjevanje dušika iz umetne sintetične vode [23], medtem ko so avtorji druge objave [22] uporabili sintetično gojišče, sestavljeno iz amonijevega sulfata in natrijevega nitrita, ki sta ključna za delovanje anammox procesa. V okviru te raziskave smo prvič proučevali vpliv statičnega magnetnega polja ($B = (10, 30, 50) \pm 0,5 \text{ mT}$) na odstranjevanje amonijevega dušika iz realne odpadne vode. Rezultati kažejo (slika 2), da pod vplivom statičnega magnetnega polja gostote $B = 10 \pm 0,5 \text{ mT}$ pride do inhibicije odstranjevanja amonijevega dušika v primerjavi s kontrolnim vzorcem (neizpostavljenim statičnemu magnetnemu polju). Nasprotno je bil vpliv statičnega magnetnega polja gostote $B = (30, 50) \pm 0,5 \text{ mT}$ na odstranjevanje amonijevega dušika v primerjavi s kontrolnim vzorcem stimulativen. Odstranjevanje amonijevega dušika se je v našem procesu povečalo za $46 \pm 4 \%$ pri statičnemu magnetnemu polju gostote $B = 30 \pm 0,5 \text{ mT}$ in za $51 \pm 5 \%$ pri statičnemu magnetnemu polju gostote $B = 50 \pm 0,5 \text{ mT}$. Pri statičnem magnetnem polju gostote $B = 10 \pm 0,5 \text{ mT}$ je prišlo do inhibicije odstranjevanja amonijevega dušika, in sicer za $35 \pm 4 \%$ [36]. Pozitiven vpliv na odstranjevanje amonijevega dušika sta dokazala tudi Tomska in Wolny

[23], in sicer se je pri statičnemu magnetnemu polju gostote $B = 40 \text{ mT}$ to povečalo za približno $w = 10 \%$, hitrost nitrifikacije pa je bila višja pri izpostavljenih vzorcih ($5,1 \text{ g N m}^{-3} \text{ h}^{-1}$) v primerjavi s kontrolnimi ($4 \text{ g N m}^{-3} \text{ h}^{-1}$). Različen vpliv statičnega magnetnega polja na odstranjevanje dušika pri različnih gostotah statičnega magnetnega polja ni presenetljiv, saj so tudi drugi avtorji opazili podoben trend, ko so proučevali bodisi odstranjevanje dušika bodisi druge mikrobne procese, vezane na čiščenje odpadnih voda.



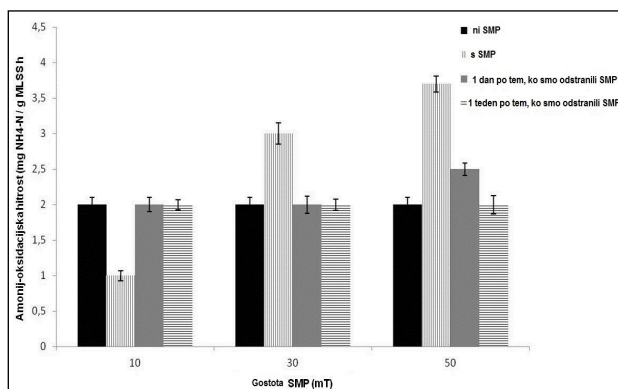
Slika 2. Vpliv statičnega magnetnega polja gostote $B = (10, 30, 50) \pm 0,5 \text{ mT}$ in časa izpostavitve na odstranjevanje amonijevega dušika iz odpadne vode z aktivnim blatom v SBR-ju pri temperaturi $T = 21 \pm 0,5 \text{ °C}$ in aerobnih pogojih (koncentracija kisika $c = 3 \pm 0,3 \text{ mg L}^{-1}$) v času 25 ur. Razmerje C/C_0 predstavlja koncentracijo amonijevega dušika ob času t in času 0. Izračunane so standardne napake iz treh bioloških ponovitev ($n = 3$).

Rezultati meritev amonij-oksidiacijske hitrosti so pokazali, da se je v povprečju učinkovitost oksidacije v 25 urah povečala za $w = 45 \pm 3 \%$ pri statičnemu magnetnemu polju gostote $B = 50 \pm 0,5 \text{ mT}$ in za $w = 32 \pm 5 \%$ pri statičnem magnetnem polju gostote $B = 30 \pm 0,5 \text{ mT}$ v primerjavi s kontrolnimi vzorci. Pri statičnem magnetnem polju gostote $B = 10 \pm 0,5 \text{ mT}$ je trend drugačen, hitrost odstranjevanja amonijevega dušika v enakem časovnem intervalu izpostavitve pade za $w = 55 \pm 3 \%$ (slika3). Rezultati kažejo, da je odstranjevanje amonijevega dušika v odpadni vodi z aktivnim blatom močno odvisno od gostote in časa izpostavitve statičnemu magnetnemu polju [36].

Vpliv statičnega magnetnega polja na odstranjevanje amonijevega dušika iz odpadne vode po prenehanju izpostavitve

Glede na ugotovljeno dejstvo, da se pod vplivom statičnega magnetnega polja poveča amonij-oksidiacijska hitrost, nas je nadalje zanimalo, kaj se zgodi s hitrostjo oksidacije amonijevega dušika po prenehanju izpostavitve aktivnega blata statičnemu magnetnemu polju. Predhodne raziskave drugih avtorjev so pokazale povečanje anaerobne amonij-

oksidacijske aktivnosti anamox združbe z uporabo statičnega magnetnega polja in vrnitev v začetno stanje amonij-oksidacijske aktivnosti po prenehanje izpostavitve [22], zato smo predvidevali, da bo učinek statičnega magnetnega polja na hitrost oksidacije amonijaka tudi v aerobnih pogojih prenehal, ko bomo statično magnetno polje izključili. Iz rezultatov, prikazanih na sliki 3 (stolpca III in IV), je razvidno, da se vpliv statičnega magnetnega polja, tako inhibitoren ($B = 10 \pm 0,5$ mT) kot stimulatoren ($B = 30 \pm 0,5$ mT), izniči že po enem dnevu. Najdaljši vpliv statičnega magnetnega polja po izključitvi je opazen pri vzorcih, ki so bili izpostavljeni statičnemu magnetnemu polju gostote $B = 50 \pm 0,5$ mT, kjer je bil vpliv po 24 urah po izključitvi še vedno opazen, po enem tednu pa vpliva statičnega magnetnega polja na hitrost oksidacije amonijaka ni bilo več mogoče izmeriti. Glede na ugotovljeno lahko potrdimo, da je vpliv statičnega magnetnega polja na odstranjevanje amonijevega dušika iz odpadne vode je odvisen od gostote polja. Statično magnetno polje vpliva na hitrost odstranjevanja dušikovih spojin samo ob neposredni izpostavitvi odpadne vode z aktivnim blatom statičnemu magnetnemu polju. Učinek statičnega magnetnega polja se izgubi kmalu po tem, ko magnetno polje izključimo [36].



Slika 3. Hitrost oksidacije amonijevega dušika brez in z izpostavitvijo odpadne vode z aktivnim blatom statičnemu magnetnemu polju gostote $B = (10, 30, 50) \pm 0,5$ mT pri temperaturi $T = 21 \pm 0,5$ °C in času $t = 25$ ur v SBR-ju in aerobnih pogojih (koncentracija kisika $c = 3 \pm 0,3$ mg L⁻¹). Stolpec I: odpadna voda z aktivnim blatom ni izpostavljena magnetnemu polju. Stolpec II: odpadna voda z aktivnim blatom je izpostavljena magnetnemu polju 25 ur. Stolpec III: odpadna voda z aktivnim blatom 1 dan po prenehanju predhodne 25-urne izpostavitve magnetnemu polju. Stolpec IV: odpadna voda z aktivnim blatom 1 teden po prenehanju predhodne 25-urne izpostavitve magnetnemu polju. Izračunane so standardne napake iz treh bioloških ponovitev ($n = 3$) povprečja (vseh meritev v časovnem intervalu 12–25 ur).

4. Zaključek

Ko je človeška skupnost prešla iz nomadskih kultur k razvoju trajnejših naselij in mest, je postala skrb za

odpadne vode zelo pomembna. Razvoj mest pa je prinesel tudi potrebe po odstranjevanju odpadnih snovi. Človekove dejavnosti, način življenja in hitri gospodarski razvoj so vir onesnažen in odpadne vode, ki lahko v naravnih vodah porušijo naravno ravnotežje. Prav zato je nujno potrebno umno gospodarjenje z odpadnimi vodami, saj so te potrebne za zagotavljanje ustreznih življenjskih pogojev.

Možnost izboljšanja čiščenja odpadne vode se je v literaturi pokazala z uporabo magnetnega polja. Raziskave so bile usmerjene v iskanje optimalne gostote statičnega magnetnega polja in časa izpostavitve, kjer bi bilo odstranjevanje amonijevega dušika iz realne odpadne vode z aktivnim blatom najučinkovitejše. Rezultati kažejo, da lahko s pomočjo statičnega magnetnega polja pospešimo odstranjevanje dušikovih spojin iz odpadne vode iz čistilnih naprav. Zavedati pa se je treba, da je vpliv statičnega magnetnega polja prehodnega značaja in deluje le v času izpostavitve. Za vsako čistilno napravo bi bilo treba natančno določiti gostoto magnetnega polja, ki bi delovala v danih pogojih, saj je od gostote magnetnega polja odvisen tudi vpliv. Poleg tega je vpliv odvisen od bakterijske vrste in njenega metabolizma. Za morebitno aplikacijo magnetnega polja na čistilne naprave bo treba predhodno ekonomsko ovrednotiti stroške vgradnje tuljave v aeracijske bazene ter stroške delovanja in vzdrževanja te naprave. Poleg potrebe po boljšem razumevanju ekonomskih dejavnikov aplikacije magnetnega polja na področju čiščenja odpadnih voda ostajajo tudi na nivoju vplivov magnetnega polja številna vprašanja še vedno neodgovorjena. Kljub temu predstavlja aplikacija magnetnega polja potencialno možnost in pot k čistejšim iztokom iz čistilne naprave ter posledično k čistejšemu in zdravemu okolju, v katerem živimo. Rezultati opravljene študije predstavljajo prispevek k temeljnemu razumevanju vplivov magnetnih polj na biološke sisteme. Imajo pa tudi aplikativni značaj, saj odpirajo potencialno možnost za razvoj novih tehnologij na področju biološkega čiščenja odpadnih voda.

5. Zahvala

Zahvaljujem se Komunalnemu podjetju Ptuj, sektorju Čistilna naprava in laboratorij, Fakulteti za strojništvo v Mariboru ter Biotehniški Fakulteti v Ljubljani, oddelku za Mikrobiologijo, za vso pomoč pri izvajanju analiz.

Literatura

1. Yavuz, H., Celebi, S. S. Effects of magnetic field on activity of activated sludge in wastewater treatment. *Enzyme and Microbial Technology* **2000**, *26*, 22–27.
2. Daims, H., Nielsen, J. L., Nielsen, P. H., Schleifer, K. H., Wagner, M. In situ characterization of

- Nitrospira-like nitrite-oxidizing bacteria active in wastewater treatment plants. *Applied Environmental Microbiology* **2001a**, 67, 5273–5284.
3. Gerardi, M. H. *Wastewater bacteria*. John Wiley & Sons, Inc, Hoboken, New Jersey, 2006.
 4. Roš, M., Zupančič, D. G. *Čiščenje odpadnih voda*. Visoka šola za varstvo okolja, Velenje, 2010.
 5. Yanda, O. S., Akinsoji, O. S. Biological wastewater treatment: Microbiology, chemistry and diversity measurements of ammonia oxidizing bacteria. *African Journal of Microbiology Research* **2011**, 5, 5831–5840.
 6. Guo, J., Zhang, L., Chen, W., Ma, F., Liu, H., Tian, Y. The regulation and control strategies of a batch reactor for simultaneous nitrification and denitrification at different temperatures. *Bioresource Technology* **2013**, 133, 59 – 67.
 7. Li, B., Irvin, S. The comparison of alkalinity and ORP as indicators for nitrification and denitrification in a sequencing batch reactor (SBR). *Biochemical Engineering Journal* **2007**, 34, 248 – 255.
 8. Yang, Q., Peng, Y., Liu, X., Zeng, W., Mino, T., Satoh, H. Nitrogen removal via nitrite from municipal wastewater at low temperature using real-time control to optimize nitrifying communities. *Environmental Science Technology* **2007**, 41, 8159 –8164.
 9. Koops, H. P., Purkhold, U., Pommerening-Röser, A., Timmermann, G., Wagner, M. The lithoautotrophic ammonia oxidizers. In: *The Prokaryotes: An evolving electronic resource for the microbiological community*: M. Dworkin et al. (Eds). Springer Verlag, New York, 2003.
 10. Guo, J., Peng, Y., Huang, H., Wang, S., Ge, S., Zhang, J., Wang, S. Short- and long-term effects of temperature on partial nitrification in a sequencing batch reactor treating domestic wastewater. *Journal of Hazardous Materials* **2010**, 179, 471–479.
 11. Sears, K., Oleszkiewicz, J. A., Lagasse, P. Nitrification in pure oxygen activated sludge systems. *Journal of Environmental Engineering* **2003**, 129, 130–135.
 12. Park, S., Bae, W., Chung, J., Seung-Cheon Baek, S. C. Empirical model of the pH dependence of the maximum specific nitrification rate. *Process Biochemistry* **2007**, 42, 1671–1676.
 13. Hoffmann, H., Barbosa da Costa, T., Wolff, D. B., Platzer, C., Riberio da Costa, R. H. Potential of Denitrification for the stabilization of activated sludge processes affected by low alkalinity problems. *Brazilian archives of biology and technology* **2007**, 50, 329–337.
 14. Philippot, L., Mirleau, P., Mazurier, S., Siblot, S., Hartmann, A., Lemanceau, P., Germon, J. C. Characterization and transcriptional analysis of *Pseudomonas fluorescens* denitrifying clusters containing the nar, nir, nor and nos genes. *Biochimica Biophysica Acta* **2001**, 1517, 436–440.
 15. Campos, J. L., Garrido, J. M., Mosquera-Corral, A., Mendez, R. Stability of a nitrifying activated sludge reactor. *Biochemical Engineering Journal* **2007**, 35, 87–92.
 16. Akin, B. S., Ugurlu, A. Monitoring and control of biological nutrient removal in a Sequencing Batch Reactor. *Process Biochemistry* **2005**, 40, 2873–2878.
 17. Philips, S., Laanbroek, H. J., Verstraete, W. Origin, causes and effects of increased nitrite concentration in aquatic environments. *Reviews in Environmental Science and Biotechnology* 2002, 1, 115–141.
 18. Metcalf and Eddy Inc. *Wastewater Engineering: Treatment and Reuse*, fourth ed. McGraw-Hill, New York, 2003.
 19. Shin, J., Sang, B., Chung, Y. The removal of nitrogen using an autotrophic hybrid hollow-fiber membrane biofilm reactor. *Desalination* **2005**, 183, 447–454.
 20. Hwang, J. H., Cicek, N., Oleszkiewicz, J. Effect of loading rate and oxygen supply on nitrification in a non-porous membrane biofilm reactor. *Water Research* **2009**, 43, 3301–3307.
 21. Cowman, J., Torres, C. I., Rittman, B. E. Total nitrogen removal in an aerobic/anoxic membrane biofilm reactor system. *Water Science Technology* **2005**, 52, 115–120.
 22. Liu, S., Yang, F., Meng, F., Chen, H., Gong, Z. Enhanced anammox consortium activity for nitrogen removal: Impacts of static magnetic field. *Journal of Biotechnology* **2008**, 138, 96–102.
 23. Tomska, A., Wolny, L. Enhancement of biological wastewater treatment by magnetic field exposure. *Desalination* **2008**, 222, 368–373.
 24. Yavuz, H., Celebi, S. S. Effects of magnetic field on activity of activated sludge in wastewater treatment. *Enzyme and Microbial Technology* **2000**, 26, 22–27.
 25. Chen, H., Li, X. Effect of static magnetic field on synthesis of polyhydroxyalkanoates from different short-chain fatty acids by activated sludge.

- Bioresource Technology **2008**, 99, 5538–5544.
26. Łebkowska, M., Rutkowska, N. A., Pajor, E., Pochanke, Z. Effect of a static magnetic field on formaldehyde biodegradation in wastewater by activated sludge. *Bioresource Technology* **2011**, 102, 8777–8782.
 27. Ji, Y., Wang, Y., Sun, J., Yan, T., Li, J., Zhao, T., Yin, X., Sun, C. Enhancement of biological treatment of wastewater by magnetic field. *Bioresource Technology* **2010**, 101, 8535–8540.
 28. Liu, B., Gao, B., Xu, X., Hong, W., Yue, Q., Wang, Y., Su, Y. The combined use of magnetic field and iron-based complex in advanced treatment of pulp and paper wastewater. *Chemical Engineering Journal* **2011**, 178, 232–238.
 29. Rosen, A. D. Effect of a 125 mT static magnetic field on the kinetics of voltage activated Na⁺ channels in GH3 cells. *Bioelectromagnetics* **2003b**, 24, 517–523.
 30. Rosen, A. D. Mechanism of action of moderate-intensity static magnetic fields on biological systems. *Cell Biochem. Biophys.* **2003a**, 39, 163–173.
 31. Crumpton, M. J. The Bernal Lecture 2004. Are low-frequency electromagnetic fields a health hazard? *Philosophical Transactions of the Royal Society B* 360, 2005.
 32. Ji, W., Huang, H., Deng, A., Pan, C. Effects of static magnetic field on *Escherichia coli*. *Micron* **2009**, 40, 894–898.
 33. Potenza, L., Ubaldi, L., De Sanctis, R., De Bellis, R., Cucchiari, L., Dacha, M. Effects of static magnetic field on cell growth and gene expression in *Escherichia coli*. *Mutation Res.* **2004**, 561, 53–62.
 34. Triampo, W., Dounghawee, G., Triampo, D., Wong-Ekkabut, J., Tang, I. M. Effects of static magnetic field on growth of leptospire, *Leptospira interrogans* serovar canicola: immunoreactivity and cell division. *J. Biosci. Bioeng.* **2004**, 98, 182–186.
 35. Brocklehurst, B., McLauchlan, K. A. Free radical mechanism for the effects of environmental electromagnetic field on biological systems. *Int J Radiat Biology* **1996**, 69, 3–12.
 36. Filipič, J., Kraigher, B., Tepuš, B., Kokol, V., Mandić, M.I. Effects of low-density static magnetic fields on the growth and activities of wastewater bacteria *Escherichia coli* and *Pseudomonas putida*. *Bioresour. Technol.* 2012, 120, 225–232.