

UKLANJANJE I OPORABA FOSFORA IZ OTPADNIH VODA

Ana Tutić, mag. ing. proc.

Sveučilište Josipa Jurja
Strossmayera u Osijeku,
Prehrambeno-tehnološki fakultet
Franje Kuhača 18, Osijek, Hrvatska

Andela Zeko-Pivač, mag. ing. proc.

Sveučilište Josipa Jurja
Strossmayera u Osijeku,
Prehrambeno-tehnološki fakultet
Franje Kuhača 18, Osijek, Hrvatska

prof. dr. sc.

Tibela Landeka Dragičević

Sveučilište u Zagrebu
Prehrambeno-biotehnološki fakultet
Pierottijeva 6, Zagreb, Hrvatska

izv. prof. dr. sc. Mario Šiljeg

Sveučilište Sjever
Jurja Križanića 31 b,
Varaždin, Hrvatska

izv. prof. dr. sc.

Mima Habuda-Stanić

Sveučilište Josipa Jurja
Strossmayera u Osijeku,
Prehrambeno-tehnološki fakultet
Franje Kuhača 18, Osijek, Hrvatska
e-mail: mima.habuda-stanic@ptfos.hr

Otpadna voda, ukoliko se nepročišćena ispušta u prirodne recipijente koja sadrži visoke koncentracije fosfora, predstavlja opasnost za okoliš uzrokujući eutrofikaciju i vodnih tijela širom svijeta. Tijekom proteklog desetljeća proveden je velik broj istraživanja o uklanjanju hranjivih tvari iz otpadne vode, osobito fosfora i dušika, kako bi se smanjio njihov štetan utjecaj na okoliš. Fosfor je element prirodno prisutan u okolišu, međutim povećane koncentracije istoga otkrivene su u mnogim slatkovodnim ekosustavima kao posljedica višegodišnjeg nekontroliranog ispuštanja nepročišćene ili nedovoljno pročišćene otpadne vode u prirodu. Povišene koncentracije fosfora u prirodnim vodama narušavaju kakvoću vode, uzrokuju, prije svega, prekomjeren rast algi i smanjenje koncentracije kisika. Stručnjaci ulažu velike napore kako bi se pronašlo učinkovito, ekološki prihvatljivo i ekonomično rješenje za smanjenje, odnosno uklanjanje fosfora iz otpadne vode. S druge strane, posljednjih 20 godina fosfor se smatra oporabljujućim elementom, radije nego onečišćujućom tvari. U ovom je radu prikazan pregled rezultata znanstvenih istraživanja provedenih u posljednjih 5 godina s ciljem uklanjanja i uporabe fosfora iz otpadnih voda.

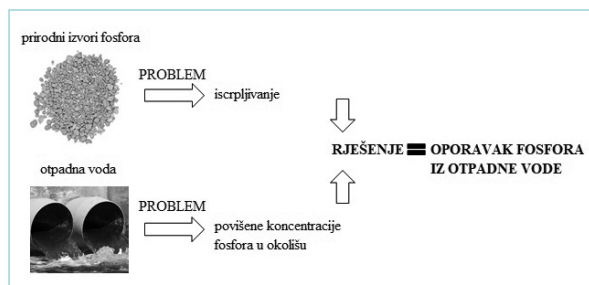
Ključne riječi: otpadna voda, uklanjanje fosfora, uporaba fosfora

1. UVOD

Fosfor je neobnovljiv element, prirodno prisutan u okolišu, važan za mikroorganizme, biljke, životinje i ljude (Zhang i sur., 2020.a). Prisutnost fosfora u okolišu poželjna je unutar određenih koncentracija kada pogoduje biološkoj produktivnosti u vodnoj cjelini. Nažalost, mnogobrojne površinske vode danas imaju povišene koncentracije fosfora, uglavnom uzrokovane ispuštanjem efluenta s uređaja za pročišćavanje otpadnih voda (UPOV) i nepročišćenih otpadnih voda, bilo kućanskih, bolničkih, urbanih ili industrijskih, ali i uzrokovane antropološkim aktivnostima kao što su poljoprivredne i/ili industrijske djelatnosti. Povišene koncentracije fosfora u prirodnim vodama ubrzavaju eutrofikaciju, narušavaju kakvoću vode te smanjuju bioraznolikost. Navedeni

proces eutrofikacije voda u značajnoj mjeri bio mogao biti usporen ili zaustavljen smanjenjem i kontrolom koncentracije fosfora u efluentima UPOV-a. Smanjenje koncentracije i/ili uklanjanje fosfora iz otpadne vode može se postići ionskom izmjenom, adsorpcijom, kemijskom precipitacijom sa solima željeza, aluminijske ili kalcija te biološkim metodama (Bunce i sur., 2018.; Huang i sur., 2017.). Osim uklanjanja, proteklih se godina opsežno istraživalo i obnavljanje fosfora, budući da procjene znanstvenika ukazuju da će se trenutnom dinamikom crpljenja prirodne rezerve fosfora značajno smanjiti tijekom ovog stoljeća. K tome, do 2050. godine očekuje se porast ljudske populacije za 1,3 puta, što će zahtijevati 3 puta više fosfora neophodnog

za proizvodnju ljudske hrane. U današnje se vrijeme otpadna voda smatra alternativnim izvorom fosfora, te su zbog toga najnoviji trendovi u obradi otpadne vode usmjereni upravo na obnavljanje i ponovnu uporabu fosfora iz otpadne vode (Melia i sur., 2017.; Habuda-Stanić i sur., 2019.; Iannacone i sur., 2019.; Shaddel i sur., 2019.b). Sastav otpadne, kao i mogućnost uporabe fosfora iz otpadne vode, ovisi o porijeklu otpadne vode. Prema Linu i sur. (2015.), koncentracija fosfora se kreće od nekoliko mg/L u komunalnoj otpadnoj vodi, nekoliko stotina mg/L u poljoprivrednoj otpadnoj vodi, do nekoliko desetaka tisuća mg/L u industrijskoj otpadnoj vodi. Ekonomska isplativost nekih od procesa obnavljanja fosfora iz otpadne vode je upitna, no korist za okoliš i zakonodavstvo vodeći su pokretači inovacija. Oporabljeni fosfor iz otpadne vode uglavnom se upotrebljava u poljoprivredi u svrhu poboljšanja plodnosti tla. Korištenje oporabljenog fosfora iz otpadne vode od velike je važnosti s obzirom da pokazuje veću učinkovitost kao izvor fosfora u odnosu na umjetna gnojiva, dajući veću stopu rasta usjeva (Bashar i sur., 2018.; Peng i sur., 2018.). U ovom su radu prikazane biološke i kemijske metode koje se najčešće primjenjuju u procesima uklanjanja i/ili obnavljanje fosfora iz različitih vrsta otpadnih voda. Ovdje je dan pregled rezultata novijih istraživanja o uklanjanju i uporabi fosfora iz otpadnih voda. **Slika 1** prikazuje problematiku fosfora.



Slika 1: Problematika fosfora

Tablica 1: Pregled bioloških i kemijskih metoda uklanjanja fosfora

Klasifikacija	Metoda	Autori
biološke metode	biljni uređaji za pročišćavanje otpadnih voda	Chrispim i sur., 2019a; 2019b; Vymazal, 2020
	tehnologija aktivnog mulja	Kyrkjeeide Finstad 2018; Ji i sur., 2020; Shao i sur., 2020
	napredno biološko uklanjanje fosfora (engl. EBPR)	Ciešlik i Konieczka, 2016; Melia i sur., 2017; Shaddel i sur., 2019b; Liu i sur., 2020; Muisa i sur., 2020; Zhang i sur., 2020b
	sekvencijalni šaržni reaktor (engl. SBR)	Zaman i sur., 2019; Yuan i sur., 2020
	reaktor s pokretnim biofilmom (engl. MBBR)	Iannacone i sur., 2019; Waqas i sur., 2020
	senkvencijalni reaktor s pokretnim biofilmom (engl. SBBR)	Tang i sur., 2017; Ji i sur., 2020
	integrirani aktivni mulj s fiksnim biofilmom (engl. IFAS)	Waqas i sur., 2020
kemijske metode	precipitacija solima željeza	Hauduc i sur., 2015; Ifelebugu i Ojo, 2019; Prazeres i sur., 2020; Ren i sur., 2020
	precipitacija solima aluminija	Freitas i sur., 2016; Ge i sur., 2017; Liu i sur., 2019; Muisa i sur., 2020
	precipitacija solima kalcija	Lin i sur., 2015; Prazeres i sur., 2020

2. UKLANJANJE FOSFORA IZ OTPADAH VODA

Otpadne vode mogu se pročititi fizikalnim, kemijskim i biološkim metodama, a visoka učinkovitost pri uklanjanju fosfora u praksi pročišćavanja otpadnih voda zabilježena je kod biološke obrade i primjene kemijske precipitacije (Chrispim i sur., 2019.a). **Tablica 1** prikazuje biološke i kemijske metode uklanjanja fosfora opisane u ovom radu.

2.1. Biološko uklanjanje fosfora

Fosfor se u otpadnoj vodi pojavljuje u nekoliko oblika, kao ortofosfat, fosforat, polifosfat, organski fosfatni ester i organski fosfonat. Jedini oblik fosfora koji mogu koristiti bakterije, alge i biljke je ortofosfat, stoga je za biološko uklanjanje fosfora nužna konverzija svih navedenih oblika fosfora u ortofosfate kako bi se fosfor mogao biološkim putem ukloniti iz otpadne vode (Zhang i sur., 2018.).

Biljni uređaji za pročišćavanje otpadnih voda

Pročišćavanje otpadne vode biljnim uređajima za pročišćavanje otpadne vode temelji se na biološkim procesima i primjeni močvarnih biljaka koje koriste hranjive tvari za rast i proliferaciju. Močvarne biljke mogu skladištiti znatne količine hranjivih tvari zbog svoje visoke produktivnosti, a istraživanja ukazuju da ne postoji značajna razlika u količini skladištenog fosfora u močvarnim biljkama iz prirodnih staništa i biljaka korištenih u biljnim uređajima za pročišćavanje otpadne vode (Vymazal, 2020.). Izvedbu i učinkovitost četiriju umjetnih močvara u Češkoj, starosti između 9 i 25 godina, istražio je Vymazal (2020.). Autor ističe da su biljni uređaji stabilna i dugoročna rješenja izdvajanja fosfora, a rezultati pokazuju da se primjenom biljnih uređaja može ukloniti prosječno 46% od početne koncentracije fosfora iz otpadne vode. Oporaba fosfora skladištenog u močvarnim biljkama podrazumijeva njihovo branje

nakon akumulacije hranjivih tvari te korištenje kao stočne hrane ili organsko gnojivo (Chrispim i sur., 2019.a; 2019.b).

Tehnologija aktivnog mulja

Tehnologija aktivnog mulja je konvencionalni proces pročišćavanja otpadnih voda drugog stupnja, a u praksi pročišćavanja otpadnih voda primjenjuje se gotovo cijelo stoljeće. Tehnologija aktivnog mulja je ujedno i najčešće korištena metoda pročišćavanja otpadnih voda zbog svoje visoke učinkovitosti, iako zahtijeva značajne količine energije za aeraciju otpadne vode, a istraživanja ukazuju i na njen značajan doprinos pojačavanju efekta staklenika. Mikroorganizmi uklanjaju hranjive tvari iz otpadnih voda kroz tri procesa: akumulaciju fosfora, nitrifikaciju i denitrifikaciju, pri čemu aktivni mulj kruži kroz reaktore čineći ovaj proces kontinuiranim. Dio aktivnog mulja vraća se na početak procesa, dok se višak aktivnog mulja odvodi iz procesa i zbrinjava na prikladan način (Kyrkjeeide Finstad, 2018.; Ji i sur., 2020.; Shao i sur., 2020.).

Konvencionalna postrojenja za pročišćavanje otpadne vode primjenom tehnologije aktivnog mulja dizajnirana su uglavnom za uklanjanje organskog onečišćenja, pri čemu u efluentu najčešće zaostaju povišene rezidualne koncentracije fosfora. Shao i sur. (2020.) ispitujući uklanjanje fosfora metodom aktivnog mulja ističu da su mikrobna biokonverzija i biosorpcija mehanizmi tehnologije kojima se ugljik i fosfor uklanjaju iz otpadne vode. Autori navode da se primjenom tehnologije aktivnog mulja iz otpadne vode može ukloniti i do 90% fosfora, no za postizanje navedene učinkovitosti nužno je produžiti zadržavanje aktivnog mulja u sustavu s prosječnih 12 sati na 4 dana. Istraživanja su pokazala da je za uspješno biološko uklanjanje fosfora nužna modifikacija klasične tehnologije aktivnog mulja i to, prije svega, naizmjeničnom primjenom aerobnih i anaerobnih uvjeta. Jedan od najčešće primjenjivanih modela biološkog uklanjanja fosfora iz otpadnih voda je tzv. napredno biološko uklanjanje fosfora (EBPR, engl. *Enhanced Biological Phosphorus Removal*) koje podrazumijeva primjenu aktivnog mulja obogaćenog polifosfat akumulirajućim organizmima (PAO, engl. *Phosphate Accumulating Organisms*).

Napredno biološko uklanjanje fosfora

EBPR je održiva i ekološki prihvatljiva tehnologija drugog stupnja pročišćavanja otpadnih voda koja se provodi izmjenom anaerobnih i aerobnih uvjeta kako bi se omogućila akumulacija fosfora polifosfat akumulirajućim organizmima (Izadi i sur., 2020.). U anaerobnim uvjetima, PAO skladište hlapive masne kiseline i otpuštaju fosfor. S druge strane, u aerobnim uvjetima, PAO troše pohranjene masne kiseline za fiziološke potrebe akumulirajući u stanicama veće količine ortofosfata kojeg skladište u obliku u vodi netopivih granula polifosfata, koji tada postaju dio ukupnih suspendiranih krutih čestica i uklanjaju se iz

procesa kao otpadni mulj. Denitrificirajući PAO (DPAO) provode denitrifikaciju zajedno s akumulacijom fosfora. DPAO koriste hlapive masne kiseline kao elektron donore, a nitrate i nitrite kao elektron akceptore (Ciešlik i Konieczka, 2016.; Iannacone i sur., 2019.; Izadi i sur., 2020.; Shaddel i sur., 2019.b; Zaman i sur., 2019.; Zhang i sur., 2020.b). Mnogi autori u svojim radovima identificirali su rodove mikroorganizama odgovorne za uklanjanje fosfora (Melia i sur., 2017.; Liu i sur., 2020.; Yuan i sur., 2020.; Zhang i sur., 2020.b). Zhang i sur. (2020.b) izvješćuju da fosfor akumulirajuće bakterije pripadaju uglavnom fiziološkoj skupini fosfat-akumulirajućih bakterija, dok Liu i sur. (2020.) navode da prema rezultatima njihove studije fosfor uklanjaju *Bacteroidetes* te *Planctomycete*. Melia i sur. (2017.) pronašli su *Candidatus Accumilibacter phosphatis* odgovornom za uklanjanje fosfora. Yuan i sur. (2020.) smatraju *Pseudomonas* jednim od najvažnijih rodova za uklanjanje fosfora iz otpadne vode.

Melia i sur. (2017.) tvrde da učinkovitost uklanjanja fosfora iz komunalne otpadne vode EBPR tehnologijom može doseći > 85%, dok Muisa i sur. (2020.) tvrde da se ovom tehnologijom može postići i 100% uklanjanja fosfora. Važno je spomenuti da EBPR pokazuje i veliki potencijal za obnavljanje fosfora iz aktivnog mulja (Ciešlik i Konieczka, 2016.; Melia i sur., 2017.; Yuan i sur. 2020.).

Zbog manjka hlapivih masnih kiselina u većini komunalnih otpadnih voda, EBPR je potrebno opskrbiti vanjskim izvorom ugljika. Najprikladniji oblici ugljika za EBPR su octena i propionska kiselina, etanol, aspartat, glutamat itd. Zaman i sur. (2019.) nedavno su objavili rezultate istraživanja u kojem su kao alternativni izvor ugljika koristili dehidrirani otpadni mulj dobiven tijekom pročišćavanja otpadne vode. Korištena su dva sekvencijska šaržna bioreaktora (engl. Sequencing Batch Reactor, SBR) kako bi se usporedile učinkovitosti uobičajenih i alternativnog izvora ugljika. Zaključeno je da se dehidrirani otpadni mulj može učinkovito koristiti kao alternativni izvor ugljika tijekom biološkog uklanjanja hranjivih tvari iz otpadnih voda, sa sporijom kinetikom i većom potrebnom dozom od acetata i propionata za postizanje niskih koncentracija fosfora u efluentu. Kako bi izbjegli dodavanje vanjskog izvora ugljika, Yuan i sur. (2020.) proveli su biološko uklanjanje fosfora u dvije faze. U prvoj fazi provodili su istovremeno napredno biološko uklanjanje fosfora i djelomičnu nitrifikaciju, a u drugoj fazi su primijenili Anammox proces. Ovom dvofaznom metodom nije postignuta samo visoka učinkovitost uklanjanja fosfora, već i ukupnog dušika, a smanjeni su i zahtjevi za organskom tvari.

Iannacone i sur. (2019.) ukazuju na široku primjenu reaktora s biofilmom za uklanjanje hranjivih tvari iz otpadne vode zbog njihove visoke učinkovitosti i robusnosti. Princip rada reaktora s pokretnim biofilmom (engl. Moving Bed Biofilm Reactor, MBBR) zasniva se na imobilizaciji specijalizirane mikrobne zajednice na pokretne nosače u obliku biofilma. Konstantno kretanje nosača kroz reaktor postignuto je mehaničkim

miješanjem u anoksičnim/anaerobnim tankovima te aeracijom u aerobnim tankovima (Iannacone i sur., 2019.; Waqas i sur., 2020.). Uklanjanje fosfora, dušika i organskog ugljika iz sintetske komunalne otpadne vode u kontinuiranom mikroaerobnom MBBR-u pri različitim C/N omjerima istražili su Iannacone i sur. (2019.). Najveći postotak uklanjanja fosfora od 66% postignut je pri C/N omjeru 4,2. Istraživanje Tanga i sur. provedeno 2017. godine prvo je istraživanje koje potvrđuje važnost razvoja simbioze algi i bakterija za poboljšano uklanjanje hranjivih tvari iz komunalne otpadne vode te utvrdili postojanje simbioze između zajednice algi i bakterija aktivnog mulja. Suspendirane alge pogoduju takvom sustavu jer koriste ugljikov dioksid koji otpuštaju bakterije proizvodeći kisik te smanjuju potrebu za aeracijom, a ujedno smanjuju i potencijalan rizik od eutrofikacije zbog adsorpcije algalne biomase na flokule aktivnog mulja. Istraživanje je provedeno inokulacijom sekvencijskog šaržnog reaktora s biofilmom (engl. Sequencing Batch Biofilm Reactor, SBBR) smjesom algi i aktivnog mulja. Dokazano je da dodatak algi aktivnom mulju poboljšava biološku asimilaciju fosfora. Autori su zaključili da simbioza algi i bakterija ima veliki potencijal primjene u pročišćavanju otpadne vode, budući da je učinkovitost uklanjanja fosfora u ovom istraživanju iznosila 89,3 %. Ji i sur. (2020.) utvrdili su da u simbiotskom sustavu algi i bakterija prevladavajući mikroorganizmi *Pantanalinema rosaneae* i *Thauera phenylacetica*.

Tehnologija koja obuhvaća pokretne/imobilizirane nosače i suspendirane flokule aktivnog mulja (engl. Integrated Fixed Film Activated Sludge, IFAS) razvijena je kao nadogradnja MBBR-a. Takva sinergija biofilma na nosačima i suspendirane biomase pogoduje i autotrofnim i heterotrofnim bakterijama. Danas je ova integrirana tehnologija jedan od vodećih procesa za biološko uklanjanje hranjivih tvari zbog minimalnih prostornih zahtjeva i visoke učinkovitosti (Waqas i sur., 2020.).

2.2. Kemijsko uklanjanje fosfora

Kemijska precipitacija podrazumijeva koagulaciju fosfatnih iona HPO_4^{2-} , H_2PO_4^- i H_3PO_4 u svrhu formiranja metalnog fosfatnog mulja koji se uklanja nakon flokulacije i taloženja. Ova metoda pripada 3. stupnju pročišćavanja otpadnih voda i široko je primjenjivana za uklanjanje fosfora iz otpadne vode zbog svoje jednostavnosti, brzine i dostupnosti (Bunce i sur., 2018.; Izadi i sur., 2020.). Fosfor može precipitirati sa solima željeza i aluminija, doziranim u proces u obliku klorida i sulfata, ili sa solima kalcija, odnosno vapnom (Melia i sur., 2017.; Iannacone i sur., 2019.; Prazeres i sur., 2020.). Liu i sur. (2019.) utvrdili su trovalentne katione kao pogodnije za flokulaciju u usporedbi s jednovalentnim i dvovalentnim kationima zbog njihovog većeg naboja i manje topivosti. Kemijska precipitacija fosfora može se primijeniti u različitim fazama procesa pročišćavanja otpadne vode, a pogodna je i za postrojenja za obradu otpadne vode koja koriste EBPR tehnologiju. Kemijsko uklanjanje fosfora učinkovit

je i stabilan tehnološki postupak izdvajanja fosfora, a pri tome nastali mulj moguće je koristiti u poljoprivredne svrhe. Međutim, nedostaci kemijskog uklanjanja fosfora uključuju moguće sekundarno onečišćenje, velike količine nezbrinutog mulja, potrebu za neutralizacijom pH vrijednosti nakon obrade vode i visoke operativne troškove (Muisa i sur., 2020.).

Uklanjanje fosfora solima željeza

Soli željeza često se primjenjuju pri uklanjanju fosfora iz otpadne vode, a proces uklanjanja se temelji na interakciji između PO_4^{3-} i Fe^{3+} , pri čemu nastaje netopivi talog Fe_3PO_4 . Thistleton i sur. (2001.) navode da je primjenom soli željeza iz otpadne vode moguće izdvojiti značajne količine fosfora, pri čemu učinkovitost izdvajanja fosfora primarno ovisi o početnoj pH vrijednosti i količini otopljenog kisika u otpadnoj vodi. Autori studije navode da su najveću količinu fosfora od 85,6% iz otpadne vode izdvojili pri koncentraciji otopljenog kisika 1,0-5,7 mg/L te pH vrijednosti od 7,5 do 8,0. Prednost primjene soli željeza pri izdvajanju fosfora je niska cijena, dok su ograničenja poteškoće u recikliranju fosfora iz taloga te nemogućnost uporabe željeznih fosfata kao gnojiva. Česta uporaba soli željeza u procesima izdvajanja fosfora rezultirala je promjenom tradicionalnih karakteristika mulja nastalog pri pročišćavanju otpadne vode. Naime, tijekom procesa uklanjanja fosfora iz otpadne vode dolazi do hidrolize soli željeza, a nastali kationi neutraliziraju negativno nabijene koloide što poboljšava taložna svojstva mulja. Stoga se soli željeza, osim za uklanjanje fosfora iz otpadne vode, mogu koristiti i za smanjivanje zamućenosti otpadne vode, ali i za pospješivanje dehidracije mulja (Hauduc i sur., 2015.; lfelebuegu i Ojo, 2019.; Prazeres i sur., 2020.; Ren i sur., 2020.). Prazeres i sur. (2020.) usporedili su učinkovitost uklanjanja ukupnog fosfora iz visoko opterećene otpadne vode mliječne industrije (koncentracija ukupnog fosfora 1796,1 mg/L -4894,1 mg/L) pomoću FeSO_4 i FeCl_3 . Bolji rezultati postignuti su primjenom FeCl_3 (67%) u odnosu na FeSO_4 (29-37%). Divalentno željezo oksidirat će u trovalentno željezo u prisutnosti kisika, no u uvjetima bez kisika divalentno željezo neće oksidirati, već reagira s ionima fosfora, pri čemu nastaje vivijanit (Prazeres i sur., 2020.).

Istraživanje u cilju optimizacije potrebne količine željezovih soli pri uklanjanju fosfora proveli su Ren i suradnici (2020.) implementirajući sinergistički učinak konvencionalnog koagulantnog željezova klorida (FeCl_3) i pratećeg flokulanta na bazi škroba (St-CTA). Zaključuju da se primjenom navedene kombinacije koagulanta i flokulanta može postići uklanjanje fosfora iz otpadne vode i do 90%, uz istovremeno reduciranje trećine ukupnih troškova procesa pročišćavanja otpadne vode.

Uklanjanje fosfora solima aluminija

Uz željezove, u praksi je vrlo česta uporaba i aluminijevih soli pri uklanjanju fosfora iz otpadnih voda

zbog niske cijene i jednostavnosti procesa te visokom afinitetu aluminijskih iona prema fosfatnim ionima (Muisa i sur., 2020.; Ren i sur., 2020.). Freitas i sur. (2016.) izvijestili su da Al^{3+} ima veliku sposobnost stvaranja kompleksa s organskim molekulama, pri čemu ujedno i neutralizira njihov naboj. Primjenom aluminijskih soli fosfor se uklanja iz otpadne vode formiranjem odgovarajućih taloga s aluminijem ($AlPO_4$), ili adsorpcijom fosfora na $Al(OH)_3$. Aluminijski mulj nastao u procesu obrade vode s aluminijskim solima vrijedan je produkt iz kojega se može izolirati $Al(OH)_3$ i ponovno koristiti za uklanjanje fosfora iz otpadne vode (Liu i sur., 2019.; Muisa i sur., 2020.). Ge i sur. (2017.) usporedili su učinkovitosti uklanjanja fosfora iz komunalne otpadne vode pomoću tri različita koagulant: aluminijska sulfata, najjednostavnijeg i najjeftinijeg koagulant na bazi aluminijskih; polialuminijska klorida (PAC) i željezova klorida ($FeCl_3$). Najučinkovitije uklanjanje fosfora od 80% zabilježeno je kod primjene aluminijske sulfata. Autori također ističu povezanost količine doziranog koagulant i učinkovitosti uklanjanja fosfora, pri čemu su veće doze koagulant pospješile učinak ukupnog fosfora. Navedenu visoku učinkovitost autori studije objašnjavaju nastankom veće količine hidroksilnog taloga koji dodatno adsorbira $H_2PO_4^-$ ione.

Uklanjanje fosfora solima kalcija

Lin i sur. (2015.) primijenili su soli željeza i soli kalcija u procesu uklanjanja fosfora iz otpadne vode. Rezultati su pokazali da se visoka učinkovitost uklanjanja fosfora može postići u širokom rasponu pH vrijednosti primjenom Fe-Ca kompleksa. Primjenu kalcijeva karbonata ($CaCO_3$) u procesu uklanjanja ukupnog fosfora iz otpadne vode mliječne industrije istražili su Prazeres i sur. (2020.). Autori studije ističu da je solima kalcija postignuta visoka učinkovitost pri uklanjanju fosfora iz otpadne vode od 94% koja je rezultat interakcije između kalcijevih i fosfatnih iona te nastanka kalcijeva fosfata.

3. OPORABA FOSFORA

Kako se prirodne rezerve fosfora iscrpljuju, uporaba fosfora iz sekundarnih izvora postala je jedan od imperativa kružne ekonomije i održivog razvoja. Otpadne vode sadrže značajne količine fosfora, a prema procjenama, izdvajanjem fosfora iz otpadnih voda moglo bi se zadovoljiti 15–20% ukupne svjetske potražnje za fosforom (Wu i sur., 2019.; Prot i sur., 2020.).

Primjenom novih znanstvenih spoznaja i suvremenih tehnoloških rješenja, fosfor je moguće oporabiti iz otpadnog mulja nastalog u procesu pročišćavanja otpadne vode, iz tekuće faze efluenta ili supernatanta dobivenog nakon anaerobne digestije te iz pepela nastalog spaljivanjem mulja, pri čemu su najveći udjeli oporabljene fosfora dobiveni obradom pepela, dok uporaba fosfora iz tekuće faze zahtijeva manje energije i manje doprinosi efektu staklenika. Oporaba fosfora iz

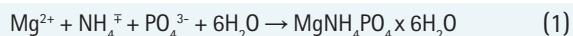
otpadnog mulja nastalog nakon pročišćavanja otpadne vode tehnologijom aktivnog mulja moguća je izdvajanjem fosfora iz vodene faze otpadnog aktivnog mulja ili oporabom fosfora iz pepela dobivenog spaljivanjem otpadnog mulja. Istraživanja pokazuju da se iz tekuće faze otpadnog mulja može oporabiti 10–60%, iz čvrstog dijela mulja 35–70% te iz pepela 70–98% fosfora (Ciešlik i Konieczka, 2016.). Mulj dobiven u obradi otpadne vode sadrži 1–5% fosfora, što ga čini povoljnim sekundarnim resursom za obnovu fosfora. Tijekom ugušćavanja i dehidracije takvog mulja oslobađa se PO_4^{3-} . Unatoč tome, otpadni mulj također sadrži i opasne organske te anorganske onečišćujuće tvari (teške metale, patogene mikroorganizme, lijekove itd.) stoga nije preporučljivo izravno ga primjenjivati na poljoprivrednim površinama (Ciešlik i Konieczka, 2016.; Chrispim i sur., 2019.a; Shaddel i sur., 2019.a; 2019.b; Monea i sur., 2020.). Ipak, Ciešlik i Konieczka (2016.) ističu da se mulj može koristiti izravno kao gnojivo. Međutim, većini zemalja članica Europske unije zabranjeno je korištenje mulja u poljoprivredne svrhe ako sadržaj mulja nije u skladu s propisima. Stoga, Monea i sur. (2020.) spominju alternativno rješenje, odnosno obnavljanje fosfora iz mulja dobivenog u trećem stupnju pročišćavanja otpadne vode. Takav mulj je manje opterećen onečišćujućim tvarima i ima manji volumen u odnosu na mulj dobiven u drugom stupnju pročišćavanja otpadne vode. Ciešlik i Konieczka (2016.) su opisali mogućnost oporabe fosfora iz pepela ekstrakcijom mineralnim ili organskim kiselinama (sumporna kiselina, dušična kiselina, klorovodična kiselina, fosfatna kiselina, oksalna kiselina). Autori navode da je ekstrakcija fosfora sumpornom kiselinom najekonomičnija, dok je ekstrakcija fosfora fosfatnom kiselinom najskuplja. Fosfor se u pepelu najčešće nalazi u obliku: $Fe_4(P_4O_{12})_3$ i $Al(PO_3)_3$, ovisno o vrsti soli korištenoj u procesu kemijske precipitacije. Također ističu da se u slučaju kemijske precipitacije fosfora solima aluminijska ekstrakcija fosfora iz pepela povećava za 10–95%. Autori navode i moguću izravnu primjenu pepela kao izvora fosfora, budući da se tijekom procesa spaljivanja otpadnog mulja većina potencijalno štetnih organskih spojeva, parazita i patogenih mikroorganizama uništi. Najveći nedostatak postupka oporabe fosfora iz pepela je složen proces gospodarenja nusproduktom koji zaostaje nakon izdvajanja fosfora iz pepela, no jedno od mogućih rješenja je i dodatak navedenog nusprodukta u betonske smjese.

Fosfor se iz otpadne vode može oporabiti u obliku vivijanita (hidratnog željezovog fosfata, $Fe_3(PO_4)_2 \cdot 8H_2O$), struvita ($NH_4MgPO_4 \cdot 6H_2O$) ili kalcijeva fosfata ($Ca_3(PO_4)_2$). Glavna strategija oporabe fosfora usmjerena je prema procesu izdvajanja fosfora precipitacijom u obliku struvita (Ciešlik i Konieczka, 2016.; Chrispim i sur., 2019.a).

3.1. Oporaba fosfora u obliku struvita

Fosfatni mineral struvit dolazi u obliku bijelih kristala, a nastaje reakcijom ekvivalentne količine magnezija,

amonijaka i fosfata sa šest molekula vode. Nastajanje struvita može se prikazati jednadžbom (1) (Yin i sur., 2020.).



Struvit je vrijedan produkt koji sadrži hranjive tvari esencijalne za rast biljaka te se može izravno primijeniti na tlo kao sigurno i učinkovito gnojivo. Nedostatak uporabe fosfora kroz precipitaciju struvita je mogućnost primjene navedenog izdvajanja samo u postrojenjima za obradu otpadne vode koja koriste EBPR. Usprkos tome, precipitacija struvita je najčešće preporučena metoda u literaturi, jer učinkovitost uporabe fosfora ovom tehnikom seže i do 97%, ukoliko su koncentracije dušika i magnezija u mulju dostatne (Ciešlik i Konieczka, 2016.; Melia i sur., 2017.; Chrispim i sur., 2019.a; Wu i sur., 2019.; Kumari i sur., 2020.). Međutim, budući da mulj općenito ne sadrži dovoljne koncentracije magnezija, Yin i sur. (2020.) primijenili su otopinu dolomita kao zamjenu za konvencionalne kemijske spojeve magnezija i kalcija u postupku uklanjanja i uporabe fosfora. Naime, primjena magnezijevih i kalcijevih reagenasa značajno utječe na cijenu procesa i konačnog proizvoda, dok je dolomit prirodan, jeftin i dostupan materijal. Autori ističu da je cijena primjene dolomita za obradu 1 m³ otpadne vode visoko opterećene fosforom manja za 45,9% u odnosu na magnezijev klorid, 25,9% u odnosu na magnezijev sulfat i 75,9% u odnosu na kalcijev klorid. Oporaba fosfora kroz precipitaciju struvita postaje izazov, ukoliko je koncentracija fosfora manja od 50 mg/L. U tom slučaju, Chrispim i sur. (2019.) predlažu rješenje i uporabu fosfora iz ugušćenog primarnog mulja ili dehidratiziranog mulja nakon anaerobne digestije.

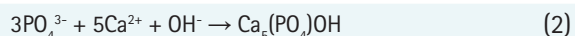
3.2. Oporaba fosfora u obliku vivijanita

Oporaba fosfora u obliku vivijanita je nova moguća strategija za uporabu fosfora iz otpadne vode. Vivijanit je dominantan spoj željeza i fosfata pronađen u aktivnom mulju, višku aktivnog mulja i mulju nakon anaerobne digestije. U prirodi se pojavljuje u obliku tamnoplavih do tamno plavozelenih kristala. Sveprisutan je u prirodi, dostupan, i može se koristiti kao gnojivo u poljoprivredi. Učinkovitost uporabe fosfora kroz precipitaciju vivijanita može doseći 62,1% (Wu i sur., 2019.). Ukoliko se fosfor iz mulja nakon anaerobne digestije izdvaja kemijskom precipitacijom željezovim solima, nastali vivijanit se iz vode može izdvojiti jednostavnim postupkom primjene magnetske sile (Prot i sur., 2020.). Spomenuti autori naglašavaju da se koncentracija vivijanita u mulju povećava povećanjem doze željezovih soli.

3.3. Oporaba fosfora u obliku kalcijeva fosfata

Fosfor se iz otpadne vode može izdvojiti i precipitacijom u obliku kalcijevih fosfata, primarno u

obliku hidroksiapatita, HAP (Ca₅(PO₄)₃OH). Hidroksiapatit je sličnog sastava kao prirodne fosfatne stijene, a nastaje kristalizacijom fosfatnih, kalcijevih i hidroksilnih iona pri visokim pH vrijednostima (Melia i sur., 2017., Yin i sur., 2020.). Reakcija nastajanja hidroksiapatita prikazana je jednadžbom (2).



Cichy i sur. (2019.) ispitili su uporabu fosfora iz modelne otpadne vode precipitacijom kalcijeva fosfata s 10%-tnim kalcijevim oksidom (CaO). Pri pH vrijednosti > 10, fosfor se primarno izdvojio u obliku hidroksiapatita. U zaključku ovog istraživanja, autori su naglasili visoku učinkovitost uporabe fosfora iz otpadne vode kao rezultat reakcije između CaO i fosfora.

4. ZAKLJUČCI

Sve veća iscrpljenost nalazišta fosfora i povećana potražnja značajno su povećale cijenu fosfora na globalnom tržištu. U isto vrijeme, mnogobrojna istraživanja kakvoće površinskih voda ukazuju da je jedan od trenutno najznačajnijih problematičnih parametara koji narušava njihovu kakvoću upravo povišena koncentracija fosfata. Stoga je iznalaženje učinkovite i ekološki prihvatljive metode uklanjanja i uporabe fosfora iz otpadnih voda jedan od značajnijih ekoloških izazova današnjice čije bi učinkovito i ekološki prihvatljivo rješenje značajno pridonijelo i usporavanju globalnog trenda smanjenja kakvoće vodnih resursa i daljnjoj dostupnosti fosfora, neizostavnog biogenog elementa za mnogobrojne životne procese na Zemlji, ali i ljudske djelatnosti.

U ovom radu prikazani su rezultati novijih znanstvenih istraživanja koja opisuju različite tehnologije i učinkovitost uklanjanja fosfora iz otpadnih voda na temelju kojih se može zaključiti sljedeće:

- biljnim uređajima za pročišćavanje otpadnih voda moguće je uklanjanje do 45% fosfora iz otpadnih voda
- obradom otpadne vode tehnologijom EBPR moguće je ukloniti fosfor s učinkovitošću od 85 do 100%
- učinkovito uklanjanje fosfora iz otpadne vode može se postići kemijskom precipitacijom uz dodatak željezovih, aluminijskih ili kalcijevih soli. U praksi se najčešće koriste soli željeza i aluminijske zbog niske cijene i jednostavnosti tehnologije. Primjenom željezovih soli moguće je ukloniti do 90%, aluminijskih soli do 80%, dok se primjenom kalcijevih soli može precipitacijom izdvojiti i do 94% fosfora iz otpadne vode.

Iako je potražnja za fosforom u svijetu svakog dana sve veća, idealna tehnologija uporabe fosfora iz otpadnih

voda još uvijek nije osmišljena s obzirom da do danas ne postoji jedinstveno i u potpunosti ekonomski i ekološki prihvatljivo rješenje. Naime, fosfor iz otpadnih voda moguće je oporabiti daljnjom obradom ili korištenjem otpadnog mulja, efluenta i supernatanta dobivenom anaerobnom digestijom te pepelom dobivenim spaljivanjem otpadnog mulja. Pri tome su istraživanja pokazala da se, ovisno o načinu izdvajanja i načinu naknadnog korištenja fosfora, iz tekuće faze može oporabiti 10–60%, iz mulja 35–70% te iz pepela 70–98% fosfora. Oporaba fosfora direktnim odlaganjem mulja na poljoprivredne i nepoljoprivredne površine u obliku

organskog gnojiva ograničena je ponajprije kemijskim sastavom otpadnog mulja, vrstom kulture ili biljnog pokrova na površini odlaganja te karakteristikama tla na koje se otpadni mulj odlaže, kao i zakonskom regulativom.

Postojećim tehnologijama fosfor se najčešće i najučinkovitije iz otpadnih voda oporabljuje precipitacijom fosfora u obliku struvita (do 97%), no tehnologija izdvajanja fosfora u obliku sturivita podrazumijeva prethodnu primjenu EBPR postupka u procesu pročišćavanja otpadne vode, što postupak pročišćavanja otpadne vode čini tehnološki zahtjevnijim i skupljim. ■

LITERATURA

- Bashar, R.; Gungor, K.; Karthikeyan, K. G.; Barak, P. (2018.): Cost effectiveness of phosphorus removal processes in municipal wastewater treatment. *Chemosphere* 197, 280–290.
- Bunce, J.T.; Ndam, E.; Ofiteru, I.D.; Moore, A.; Graham, D.W. (2018.): A Review of Phosphorus Removal Technologies and Their Applicability to Small-Scale Domestic Wastewater Treatment Systems. *Front. Environ. Sci.* 6(8), 1–15.
- Chripim, C. M.; Scholz, M.; Nolasco, M., A. (2019.a): Phosphorus recovery from municipal wastewater treatment: Critical review of challenges and opportunities for developing countries. *J. Environ. Manag.* 248, 109268.
- Chripim, C. M.; Scholz, M. (2019.b): Phosphorus recovery from municipal wastewater treatment: Critical review of challenges and opportunities for developing countries. *J. Environ. Manag.* 248, 109268.
- Cichy, B.; Kuzdzal, E.; Krzton, H. (2019.): Phosphorus recovery from acidic wastewater by hydroxyapatite precipitation. *J. Environ. Manag.* 232, 421–427.
- Ciešlik, B.; Konieczka, P. (2016.): A review of phosphorus recovery methods at various steps of wastewater treatment and sewage sludge management. The concept of "no solid waste generation" and analytical methods. *J. Clean. Prod.* 142, 1728–1740.
- Freitas, J. H. E. S.; de Santana, K. V.; do Nascimento, A. C. C.; de Paiva, S. C.; de Moura, M. C.; Coelho, L. C. B. B.; de Oliveira, M. B. M.; Paiva, P. M. G. P.; do Nascimento, A. E.; Napoleao, T. H. (2016.): Evaluation of using aluminum sulfate and water-soluble *Moringa oleifera* seed lectin to reduce turbidity and toxicity of polluted stream water. *Chemosphere* 163, 133–141.
- Ge, J.; Meng, X.; Song, Y.; Terracciano, A. (2017.): Effect of phosphate releasing in activated sludge on phosphorus removal from municipal wastewater. *J. Environ. Sci.* 67, 216–223.
- Habuda-Stanić, M.; Nujic, M.; Gonzales Silva, B. M.; Sægrov, S.; Østerhus, S. W.; Šiljeg, M. (2019.): Date Palm Assisted Nanocomposite Materials for the Removal of Nitrate and Phosphate from Aqueous Medium. *Sust. Agr. Reviews* 34, 265–278.
- Hauduc, H.; Takacs, I.; Smith, S.; Szabo, A.; Murthy, S.; Daigger, G.T.; Sperandio, M. (2015.): A dynamic physicochemical model for chemical phosphorus removal. *Water Res.* 73, 157–170.
- Huang, W.; Zhang, Y.; Li D. (2017.): Adsorptive removal of phosphate from water using mesoporous materials: A review. *J Environ Manage* 193, 470–482.
- Iannacone, F.; Di Capua, F.; Granata, F.; Gargano, R.; Pirozzi, F.; Esposito, G. (2019.): Effect of carbon-to-nitrogen ratio on simultaneous nitrification denitrification and phosphorus removal in a microaerobic moving bed biofilm reactor. *J. Environ. Manag.* 250, 109518.
- Ifelebuegu, A. O.; Ojo, P. 2019.: Modelling the effects of ferric salt dosing for chemical phosphorus removal on the settleability of activated sludge. *J. Environ. Chem. Eng.* 7, 103256.
- Izadi, P.; Izadi, P. & Eldyasti, A. (2020.): Design, operation and technology configurations for enhanced biological phosphorus removal (EBPR) process: a review. *Rev. Environ. Sci. Biotechnol.* 19, 561–593.
- Ji, B.; Wang, S.; Guo, D.; Pang, H. 2020.: Comparative and comprehensive analysis on bacterial communities of two full-scale wastewater treatment plants by second and third-generation sequencing. *Biores. Tech.* 11, 100450.
- Kumari, S.; Jose, S.; Tyagi, M.; Jagadevan, S. (2020.): A holistic and sustainable approach for recovery of phosphorus via struvite crystallization from synthetic distillery wastewater. *J. Clean. Prod.* 254, 120037.
- Kyrkjeeide Finstad I: Biological Phosphorous Removal in a Continuous MBBR. Master thesis. NTNU, Trondheim, 2018.
- Lin, Q.; Ping, Z.; Meng, Z.; Xiaoqing, Y.; Ghulam, A. (2015.): Phosphorus removal using ferric-calcium complex as precipitant: Parameters optimization and phosphorus-recycling potential. *Chem. Eng. J.* 268, 230–235.
- Liu, Z.; Zhou, L.; Liu, F.; Gao, M.; Wang, J.; Zhang, A.; Liu, Y. (2019.): Impact of Al-based coagulants on the

- formation of aerobic granules: Comparison between poly aluminum chloride (PAC) and aluminum sulfate (AS). *Sci. Total Environ.* 685, 74–84.
- Liu, S.; Daigger, G. T.; Liu, B.; Zhao, W.; Liu, J. (2020.): Enhanced performance of simultaneous carbon, nitrogen and phosphorus removal from municipal wastewater in an anaerobic-aerobic-anoxic sequencing batch reactor (AOA-SBR) system by alternating the cycle times. *Biores. Techn.* 301, 122750.
- Melia, P. M.; Cundy, A. B.; Sohi, S. P.; Hooda, P. S.; Busquets, R. (2017.): Trends in the recovery of phosphorus in bioavailable forms from wastewater. *Chemosphere* 186, 381–395.
- Moher, D.; Liberati, A.; Tetzlaff, J.; Altman, D.G. (2009.): Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses: The PRISMA Statement. *J. Clinical Epidemiology* 62, 1006–1012.
- Monea, M. C.; Lohr, D. K.; Meyer, C.; Preyl, V.; Xiao, J.; Steinmetz, H.; Schonberger, H.; Drenkova-Tuhtan, A. (2020): Comparing the leaching behaviour of phosphorus, aluminium and iron from post-precipitated tertiary sludge and anaerobically digested sewage sludge aiming at phosphorus recovery. *J. Clean. Prod.* 247, 119129.
- Muisa, N.; Nhapi, I.; Ruziwa, W.; Manyuchi, M. M. (2020.): Utilization of alum sludge as adsorbent for phosphorus removal in municipal wastewater: A review. *J. Water Process Eng.* 35, 101187.
- Peng, L.; Dai, H.; Wu, Y.; Peng, Y.; Lu, X. (2018.): A comprehensive review of phosphorus recovery from wastewater by crystallization processes. *Chemosphere* 197, 768–781.
- Prazeres, A.R.; Fernandes, F.; Luz, S.; Jeronimo, E. (2020.): Simple processes for contamination removal in cheesemaking wastewater: CaCO_3 , Mg(OH)_2 , FeSO_4 and FeCl_3 . *J. Environ. Chem. Eng.* 8, 104034.
- Prot, T.; Wijdeveld, W.; Ekua Eshun, L.; Dugulan, A. I.; Goubitz, K.; Korving, L.; Van Loosdrecht, M. C. M. (2020.): Full-scale increased iron dosage to stimulate the formation of vivianite and its recovery from digested sewage sludge. *Water Res.* 182, 115911.
- Ren, J.; Li, N.; Wei, H.; Li, A.; Yang, H. (2020.): Efficient removal of phosphorus from turbid water using chemical sedimentation by FeCl_3 in conjunction with a starch-based flocculant. *Water Res.* 170, 115364.
- Shaddel, S.; Ucar, S.; Andreassen, J.-P.; Østerhus, S. W. (2019.a): Enhancing efficiency and economics of phosphorus recovery process by customizing the product based on sidestream characteristics – an alternative phosphorus recovery strategy. *Water Sci. Technol.* 79.9, 1777–1789.
- Shaddel, S.; Bakhtiary-Davijany, H.; Kabbe, C.; Dadgar, F.; Østerhus, S. W. (2019.b): Sustainable Sewage Sludge Management: From Current Practices to Emerging Nutrient Recovery Technologies. *Sustainability* 11, 3435.
- Shao, Y.; Liu, G.; Wang, Y.; Zhang, Y.; Wang, H.; Qi, L.; Xu, X.; Wang, J.; He, Y.; Li, Q.; Fan, H.; Zhang, J. (2020.): Sludge characteristics, system performance and microbial kinetics of ultra-short-SRT activated sludge process. *Environ. International* 143, 105973.
- Tang, C.-C.; Zuo, W.; Tian, Y.; Wang, Z.-W.; Zhang, J.; He, Z.-W. (2017.): Enhanced nitrogen and phosphorus removal from domestic wastewater via algae-assisted sequencing batch biofilm reactor. *Biores. Techn.* 250, 185–190.
- Thistleton, J., Clark, T., Pearce, P., Parsons, S.A. (2001.): Mechanisms of Chemical Phosphorus Removal: 1—Iron (II) Salts. *Process Saf. Environ. Prot.* 9(6), 339–344.
- Vymazal, J., 2020. Removal of nutrients in constructed wetlands for wastewater treatment through plant harvesting – Biomass and load matter the most. *Eco. Eng.* 155, 105962.
- Waqas, S.; Bilal, M. R.; Man, Z.; Wibisono, Y.; Jaafar, J.; Mahlia, T. M. I.; Khan, A. L.; Aslam, M. (2020.): Recent progress in integrated fixed-film activated sludge process for wastewater treatment: A review. *J. Environ. Manag.* 268, 110718.
- Wu, Y.; Luo, J.; Zhang, Q.; Aleem, M.; Fang, F.; Xue, Z.; Cao, J. (2019.): Potentials and challenges of phosphorus recovery as vivianite from wastewater: A review. *Chemosphere* 226, 246–258.
- Yin, Z.; Chen, Q.; Zhao, C.; Fu, Y.; Li, Y.; Feng, Y.; Li, L. (2020.): A new approach to removing and recovering phosphorus from livestock wastewater using dolomite. *Chemosphere* 255, 127005.
- Yuan, C.; Wang, B.; Peng, Y.; Hu, T.; Zhang, Q.; Li, X. (2020.): Nutrient removal and microbial community in a two-stage process: Simultaneous enhanced biological phosphorus removal and semi-nitrification (EBPR-SN) followed by anammox. *Bioresour. Technol.* 310, 123471.
- Zaman, M.; Kim, M.; Nakhla, G.; Singh, A.; Yang, F. (2019.): Enhanced biological phosphorus removal using thermal alkaline hydrolysed municipal wastewater biosolids. *J. Environ. Sci.* 86, 164–174.
- Zhang, X.; Lin, X.; He, Y.; Chen, Y.; Zhou, J.; Luo, X. (2018.): Adsorption of phosphorus from slaughterhouse wastewater by carboxymethyl konjac glucomannan loaded with lanthanum. *Intern. J. Bio. Macromol.* 119, 105–115.
- Zhang, J.; Tang, L.; Tang, W.; Zhong, Y.; Luo, K.; Duan, M.; Xing, W.; Liang, J. (2020.a): Removal and recovery of phosphorus from low-strength wastewaters by flow-electrode capacitive deionization. *Sep. Pur. Tech.* 237, 116322.
- Zhang, X.; Wang, C.; Wu, P.; Yin, W.; Xu, L. (2020.b): New insights on biological nutrient removal by coupling biofilm-based CANON and denitrifying phosphorus removal (CANDPR) process: Long-term stability assessment and microbial community evolution. *Sci. Total Env.* 730, 138952.
- Zou, J.; Zhang, L.; Wang, L.; Li, Y. (2017.): Enhancing phosphorus release from waste activated sludge containing ferric or aluminum phosphates by EDTA addition during anaerobic fermentation process. *Chemosphere* 171, 601–608.

The removal and recycling of phosphorus from wastewater

Abstract. If untreated wastewater containing high concentrations of phosphorus is discharged into a natural recipient, it poses an environmental threat, causing eutrophication of water bodies all over the world. In the past century, numerous investigations in nutrient removal from wastewater, particularly phosphorus and nitrogen, were conducted in order to reduce their adverse impact on the environment. Phosphorus is an element that is naturally present in the environment; however, its increased concentrations have been detected in many freshwater ecosystems as a consequence of many years of uncontrolled untreated or insufficiently treated wastewater discharges into the nature. Increased phosphorus concentrations in natural waters impair water quality by causing primarily excessive algae growth and reduced oxygen concentrations. Experts are making great efforts to find an efficient, ecologically acceptable and feasible solution to its reduction, i.e. removal of phosphorus from wastewater. On the other hand, rather than being considered a pollutant, phosphorus has been considered a recyclable element in the past 20 years. This paper presents an overview of the results of scientific research conducted in the past 5 years within the aim of removing and recycling phosphorus from the environment.

Key words: wastewater, phosphorus removal, phosphorus recycling

Die Entfernung und Rückgewinnung von Phosphor aus dem Abwasser

Zusammenfassung. Wenn das Abwasser mit hohem Phosphorgehalt ungereinigt in natürliche Gewässer eingeleitet wird, stellt es eine Gefahr für die Umwelt dar, da dies zur Eutrophierung von Gewässern weltweit führt. Im letzten Jahrzehnt wurden zahlreiche Untersuchungen über Entfernung von Nährstoffen, vor allem Phosphor und Stickstoff, aus dem Abwasser durchgeführt, um ihre schädlichen Auswirkungen auf die Umwelt zu reduzieren. Phosphor ist ein chemisches Element, das in der Natur in gebundener Form vorkommt. Die erhöhten Phosphorkonzentrationen wurden allerdings in vielen Süßwasserökosystemen gefunden als Folge von mehrjähriger unkontrollierter Einleitung von ungereinigtem oder ungenügend gereinigtem Abwasser in die Umwelt. Der in natürlichen Gewässern erhöhte Phosphorgehalt verschlechtert die Wasserqualität, verursacht eine Massenentwicklung von Algen und reduziert den Gehalt an verfügbarem Sauerstoff. Fachleute unternehmen große Anstrengungen, um eine wirkungsvolle, umweltfreundliche und wirtschaftliche Lösung zur Reduzierung bzw. Entfernung von Phosphor aus dem Abwasser zu finden. Andererseits wird Phosphor in den letzten 20 Jahren als Aufbereitungsmittel anstatt Verunreinigungselement angesehen. In diesem Beitrag wird ein Überblick über die Ergebnisse von in den letzten fünf Jahren durchgeführten Untersuchungen gegeben, die sich mit der Entfernung und Rückgewinnung von Phosphor aus dem Abwasser befassen.

Schlüsselwörter: Abwasser, Phosphorentfernung, Phosphorrückgewinnung