

GELEŽIES TURINČIŲ FILTRO UŽPILDŲ EFEKTYVUMO ŠALINANT TIRPUJĮ FOSFORĄ TYRIMAI

Audrius VARNAGIRIS*, Aušra MAŽEIKIENĖ

Vilniaus Gedimino technikos universitetas, Aplinkos inžinerijos fakultetas,

Aplinkos apsaugos ir vandens inžinerijos katedra, Vilnius, Lietuva

**El. paštas audrius.varnagiris@stud.vilniustech.lt*

Gauta 2024 m. kovo 4 d.; priimta 2024 m. kovo 18 d.

Santrauka. Šio darbo tikslas – išbandyti geležies turinčių medžiagų efektyvumą sorbuoti tirpų fosforą iš realių, biologiniu būdu jau išvalytų, nuotekų. Tyrimams pasirinktos ir į tris eksperimentinio stendo kolonėles patalpintos trys medžiagos, savo sudėtyje turinčios geležies: sorbentai GEH⁺102, SBGx ir plieno drožlės. Filtravimas vyko 0,74 m/h greičiu iš viršaus į apačią, sorbentų užpildams visą laiką esant apsemtiems, virš užpildų palaikant 25 cm aukščio skysčio sluoksnį. Adsorbentas GEH⁺102, skirtas geriamajam vandeniui ruošti, išsiskyrė efektyvumu (efektyvumas iki 98 %) šalinant PO₄-P iš biologiška valytų nuotekų, kuriose skandinčių medžiagų koncentracija yra nedidelė (<2 mg/l). Miltelių pavidalo adsorbentas SBGx maišomas su smėliu, jo efektyvumas šalinant PO₄-P iš nuotekų svyravo nuo 3 iki 41 %. Plieno drožlių užpildas yra tinkamas PO₄-P šalinti iš buitinių nuotekų, šalinimas vyko 91–94 % efektyvumu. Plieno drožlės yra atlieka, kurios antrinis panaudojimas nuotekoms valyti būtų naudingas aplinkos darnumui, todėl rekomenduojama šioje srityje atlikti daugiau tyrimų.

Reikšminiai žodžiai: nuotekos, fosforas, filtravimas, geležis, šalinimas, efektyvumas.

1. Įvadas

Daugelis ežerų ir kiti gamtiniai vandens telkiniai yra veikiami išorinės fosforo (P) apkrovos, kuri gali būti žalinga ekosistemų biotai (Klimeski et al., 2014). Paviršinio vandens eutrofikacija ir tankus cianobakterijų žydėjimas vandenyje kaip galima eutrofikacijos pasekmė yra visame pasaulyje opi problema (Stroom ir Kardinaal, 2016). Suvaldyti ištirpusio fosforo (P) nuotėkį į paviršinius vandenį yra sudėtinga, dažniausiai taikoma prevencijos praktika yra veiksminga tik siekiant užkirsti kelią netirpaus fosforo emisijoms. Ištirpęs P (fosfatai) turi daug didesnę biologinę prieinamumą nei fosforas, esantis kietųjų dalelių sudėtyje (Mendes, 2020). Todėl kuriamos konstrukcijos, skirtos tirpiam P filtruoti iš nuotekų, kol jos dar nepasiekė vandens telkinio (Mažeikienė, 2019; Penn et al., 2017). Iki šiol tirpiems fosfatams iš nuotekų šalinti buvo taikomi įvairūs būdai: cheminis nusodinimas, biologinis apdorojimas, struvitų susidarymas, membraninis sulaikymas ir adsorbicija (Guan et al., 2023). Įprastinis P apdorojimas paprastai pašalina mažiau nei 40 % tirpaus nereaktyvaus P (sNRP). Vadinas, maždaug 26–81 %

nuotekų P gali būti labiau reaktyvios formos (Qin et al., 2015). Siekiant pašalinti iš nuotekų kuo daugiau fosforo, reikalingas papildomas valymas. Fosforo šalinimas iš nuotekų, taikant adsorbicijos procesus, sulaukia daugiau mokslininkų dėmesio (Abukhadra et al., 2020; Penn ir Bowen, 2018). Sorbcijos procesais paremtos technologijos turi keletą privalumų, pavyzdžiui, susidaro mažiau dumblo ir technologijos nėra sudėtingos, veikia paprastai (Wang et al., 2017), tačiau sorbcijos efektyvumas labai priklauso nuo adsorbento pobūdžio ir reakcijos sąlygų. Filtrų sistemos yra perspektyvios technologijos, skirtos ištirpusiam P iš vandens ar nuotekų pašalinti (Penn ir Bowen, 2018). Pagrindinis filtrų sistemos komponentas yra filtro medžiaga, kuri paprastai yra natūralus, sintetinis arba šalutinis produktas, turintis metalo katijonų ir pasižymintis stipriu P sulaikymo afinitetu bei talpa (Mendes, 2020). Filtrų medžiagos paprastai yra akytos ir turtingos Fe, Al, Mg arba Ca (Gubernat et al., 2020). Šarminėje filtro medžiagoje, pvz., plieno šlake ir kalcinuotame kalkakmenyje, yra CaO arba MgO, kurie po gesinimo vandenyje virsta atitinkamais hidroksidais. Paprastai postuluojuama, kad amorfiniai trikalčio fosfatai susidaro

kaip pradinės P nuosėdos Ca pagrindo filtrų medžiagose. Valomų buitinių nuotekų pH dažniausiai būna neutralus (~7,5), todėl būtina ištirti sorbentų veikimą realiomis sąlygomis. Dauguma tyrimų atlikta su dirbtiniais tirpalais ir dirbtinėmis nuotekomis (Kirjanova, 2014). Labiausiai ištirtos medžiagos, sėkmingai adsorbuojančios fosfatą iš tirpalų, yra šios: geležies oksidai, mezosilikatai, ceolitas, bioanglys, raudonasis purvas ir aliuminio oksidai (Ahmed et al., 2016; Stepova et al., 2023). Be to, didėja susidomėjimas geležies atliekų naudojimu vandeniui valyti ir fosfatams regeneruoti (Öfverström et al., 2020).

Darbo tikslas – išbandyti geležies turinčių medžiagų efektyvumą sorbuojant tirpų fosforą iš realių, biologiniu būdu jau išvalytų, nuotekų.

2. Tyrimų metodika

Eksperimentinis kolonėlių stendas

Atlikti pasirinktam bandymui VILNIUS TECH Aplinkos apsaugos ir vandens inžinerijos katedros laboratorijoje įrengtas trijų kolonėlių stendas (1 paveikslas). Stendas sudarytas iš trijų skaidraus stiklo kolonėlių, kiekvienos kurių apačioje yra filtrato išleidimo žarnelės ir ventiliai.



1 paveikslas. Eksperimentinis trijų kolonėlių stendas

Trys kolonėlės užpildytos 7 cm aukščio tiriamų medžiagų (sorbentų) sluoksniu. Kiekvienos kolonėlės apačioje, virš dugno, supiltas palaikantysis smulkių granito akmenėlių sluoksnis (3 cm aukščio). Pirmojoje ir antrojoje kolonėlėse virš palaikančiojo sluoksnio supilti kvarcinio smėlio sluoksniai (2 cm). Antrojoje kolonėlėje 3 cm kvarcinio smėlio sluoksnis supiltas ir virš sorbuojančiojo užpildo. Granito akmenėliai bei kvarcinis smėlis laikomi inertinėmis medžiagomis, kurios pačios nesorbuoja fosforo. Eksperimente šios medžiagos panaudotos tik prilaikyti ar prispausti sorbentų sluoksniams.

Sorbciniai filtravimo kolonėlių užpildai

Trys medžiagos, savo sudėtyje turinčios geležies, patalpintos į eksperimentinio stendo kolonėles:

1. Komercinis produktas GEH[®]102 – patentuotas didelio našumo adsorbentas, skirtas geriamajam vandeniui ruošti. Geležies oksido hidroksido pagrindu pagamintos adsorbcinės granulės, kurios suriša sunkiuosius metalus ir kitus teršalus bei pašalina juos iš požeminio vandens. Nepakeičia natūralių ir vertingų vandens savybių. Cheminė sudėtis: β -FeOOH ir Fe(OH)₃; geležies kiekis, priklausomai nuo sausų medžiagų: 600 g/kg ($\pm 10\%$); granulėlių dydis: 0.2–2.0 mm.
2. Geležies oksidų pagrindu pagamintas priedas, gamintojas „SwissBiogas.com SBGx“ (SBGx). Produktas skirtas anaerobiniam dumblo pūdymui intensyvinti (<https://swissbiogas.com>). Jo sudėtyje yra vienodas FeO ir Fe₂O₃ kiekis, o kitų oksidų procentinė koncentracija yra nedidelė: CaO (<0,5), Al₂O₃ (<0,5), K₂O (<0,05), MnO (<1,0), NiO (<0,1), MgO (<0,5), Cr₂O₃ (<0,2), CoO (<0,05), Zn (<0,1) ir Cu (<0,1). Ši medžiaga yra miltelių pavidalo, dalelių dydis – 0,005–0,007 mm. Geležies oksidų pagrindu pagamintas priedas SBGx maišomas su kvarciniu smėliu santykiu 2:1. Maišyti su smėliu nuspręsta dėl SBGx dalelių smulkumo, kad būtų įmanomas filtravimas.
3. Plieno drožlės, gautos iš UAB „Destata Profil“ (DIN17135, AST45). Plieno drožlės yra atliekos, paimtos iš tekimo staklių. Drožlių sudėtyje C yra ne daugiau nei 2 %, o Si, Mn, Cr, Ni, Mo, S, P, N cheminių elementų kiekis yra ne didesnis nei 1,8 %. Drožlių dalelių dydis – 1,5–7,5 mm. Plieno drožlės pasirinktos todėl, kad yra atliekos ir jų panaudojimas fosforo sorbcijai iš nuotekų prisidėtų prie aplinkos darnumo. Iš visų metalinių gaminių masės geležis sudaro apie 95 %. Tam įtakos turi santykinis geležies pigumas ir tvirtumas, dėl kurio ją galima panaudoti įvairiose srityse, įskaitant automobilių pramonę, laivų statybą, statybinių konstrukcijų gamybą (Kareiva, 2021). Didžiausias geležies ar plieno panaudojimo trūkumas yra korozija, rūdžių, Fe(OH)₃ ir FeO(OH), susidarymas. Kasmet pasaulyje pagaminami milžiniški geležies kiekiai.

Eksperimentų eiga

Iš veikiančio individualaus nuotekų valymo įrenginio atvežta 100±10 litrų nuotekų. Šios gautos nuotekos jau išvalytos naudojant veiklųjį dumblą. Išmatuota atsivežtų

nuotekų temperatūra, pH, skendinčiųjų medžiagų koncentracija ir PO_4 -P koncentracija. Nuotekų temperatūra įvertinta matuokliu *SevenGo pro SG6* („Mettler Toledo“, Šveicarija). pH nustatytas potenciometriškai (LST EN ISO 10523:2012), matuojant WTW gamybos pH–metru pH – 330i, matavimų kokybės kontrolei naudoti *Hamilton* (Šveicarija) sertifikuoti etaloniniai buferiniai tirpalai pH 7,00±0,01 ir pH 9,21±0,02. Skendinčiųjų medžiagų koncentracija įvertinta gravimetriniu metodu, nuotekas košiant pro stiklo pluošto koštuvą (LAND 46–2007), svarta KERN (Vokietija) ABJ 220–4M tipo elektroninėmis laboratorinėmis svarstyklėmis. Skendinčiųjų medžiagų koncentracija apskaičiuota pagal 1 formulę:

$$C = \frac{1000 \times (m_2 - m_1)}{V_b}, \quad (1)$$

čia: C – skendinčiųjų medžiagų koncentracija, mg/l; m_2 – koštuvo masė po filtravimo, mg; m_1 – koštuvo masė prieš filtravimą, mg; V_b – bendras mėginio tūris, ml.

Visas eksperimentas yra pradedamas, nuotekas supilant į tris kolonėles. Filtravimas vykdomas iš viršaus į apačią, sorbentų užpildai visą laiką apsemti, palaikant 25 cm aukščio skysčio sluoksnį virš užpildų. Filtravimo greitis yra nustatomas tūriniu metodu. Atliekant eksperimentą nustatyta, kad nuotekos filtruojamos 0,00118 m³/h debitu. Skersmuo visose kolonėlose vienodas – 0,045 m. Apskaičiuotas kolonėlės skerspūvio plotas – 0,0016 m². Pasitelkus 2 formulę, apskaičiuotas filtravimo greitis:

$$v = \frac{Q}{A}, \quad \text{m/h}; \quad (2)$$

čia: v – filtravimo greitis, m/h; Q – filtravimo debitas, m³/h; A – kolonėlės užpildo paviršiaus plotas, m².

Pagal ventili, kuris yra filtravimo kolonėlės apačioje, galima reguliuoti filtravimo greitį. Viso eksperimento metu palaikomas toks pat, 0,74 m/h, greitis. Filtrato mėginiai pirmomis dienomis imami kas valandą, o tęsiant eksperimentą mėginiai imami tuomet, kai filtratas prateka pro visą stiklo kolonėlę. Paimtuose mėginiuose matuojama tirpaus fosforo (PO_4 -P) koncentracija. Matavimams atlikti pasitelktas MERCK „Spectroquant“ testas. Testų ribos: 0,50–30,0 mg/l PO_4 -P. Matavimai kartojami po 3 kartus.

3. Rezultatai

Iš individualaus mažo debito nuotekų valymo įrenginio atsivežtose, biologiniu būdu išvalytose nuotekose skendinčiųjų medžiagų koncentracija labai nedidelė (<2 mg/l), todėl manoma, kad skendinčiosios medžiagos neužkimš filtrų ir nesusidarys dideli slėgio nuostoliai.

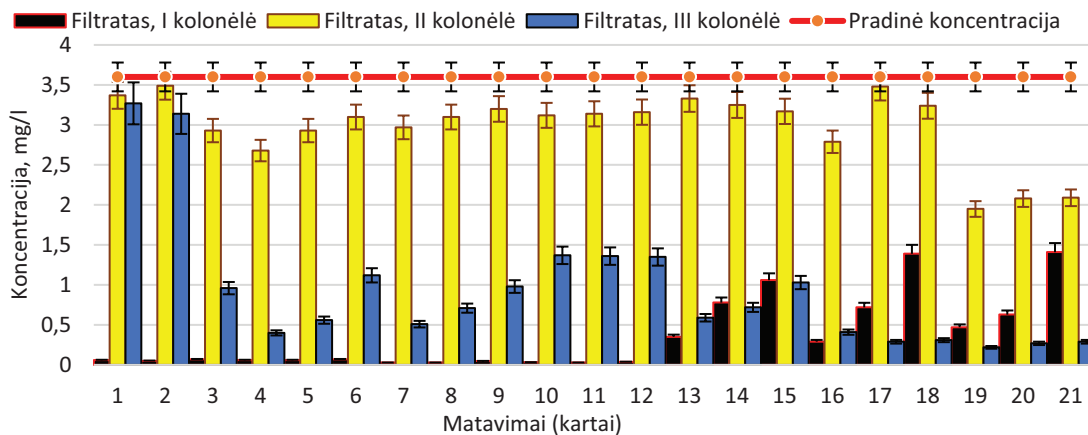
Gautų nuotekų fiksuotas pH – 7,38, o temperatūra – 15,1 °C. Išmatavus pradinę PO_4 -P koncentraciją nuotekose, gauta, kad ji yra 3,6±0,4 mg/l.

Visas filtravimo eksperimentas truko 17 valandų. PO_4 -P koncentracijos mažinimo nuotekose, jas filtruojant per kolonėlių užpildus, rezultatai pateikti 2 ir 3 paveiksluose.

Iš 2 paveiksle pateiktų rezultatų matyti, kad eksperimento pradžioje mažiausia (<0,1 mg/l) PO_4 -P koncentracija yra filtrate iš pirmosios kolonėlės, kuri užpildyta komerciniu sorbentu GEH[®] 102. Per pirmas dvi filtravimo valandas kiti du sorbentai (SBGx ir plieno drožlės), patalpinti atitinkamai į II ir III kolonėles, neveikė efektyviai, filtrate iš II kolonėlės liko 3,4–3,5 mg/l, o iš III kolonėlės – 3,3–3,2 mg/l PO_4 -P koncentracija. Tirpaus fosforo šalinimo iš nuotekų efektyvumas antrąją filtravimo valandą: 98,6 % (I kolonėlė), 3,1 % (II kolonėlė) ir 12,8 % (III kolonėlė). Iš 3 paveikslu matyti, kad tęsiantis eksperimentui, per 20 filtravimo valandų I kolonėlės efektyvumas šalinant PO_4 -P iš nuotekų sumažėjo nuo 98 iki 61 %. Daroma išvada, kad efektyviai veikiančio sorbento geba mažėja. Per visą eksperimento laikotarpį filtrate iš I kolonėlės tik 3 kartus išmatuota 1,1–1,4 mg/l PO_4 -P koncentracija, kitais atvejais ji mažesnė nei 1 mg/l. Tokia koncentracija neviršija griežčiausių DLK normų, apibrėžtų LR Nuotekų tvarkymo reglamente. Daroma išvada, kad sorbentas GEH[®] 102 tinkamas fosforui iš buitinių nuotekų šalinti, jei nuotekos jau yra po biologinio valymo ir skendinčiųjų medžiagų koncentracija jose yra maža (<2 mg/l).

Antrosios kolonėlės efektyvumas šalinant tirpų fosforą svyravo ribose nuo 3 iki 41 % (3 paveikslas). Efektyvumas padidėjo eksperimento pabaigoje ir paskutines tris valandas viršijo 40 %. Keliama hipotezė, kad pasikeitė sorbento SBGx sudėtyje esančios geležies valentingumas. Gauta sorbento sudėtyje pastebėtas vienodas FeO ir Fe₂O₃ kiekis, tačiau, filtruojant nuotekas apsemtame SBGx sluoksnyje, galėjo vykti bakterijų vykdoma oksidacija ir divalentė geležis galėjo pereiti į trivalentę formą. Kaip pastebėjo Su ir kt. (2019), bakterijos, esančios vandeninėje terpėje, veikia sorbcijos procesus.

Trečiosios kolonėlės efektyvumas šalinti tirpų fosforą svyravo ribose nuo 9 iki 94 % (3 paveikslas). Pažymėtina, kad iš pradžių plieno drožlių užpildas nepasidėmėjo efektyvumu šalinti PO_4 -P iš nuotekų, o eksperimento pabaigoje III kolonėlės efektyvumas užfiksuotas pats didžiausias. Efektyvumas kito pagal logaritminę funkciją, kurios determinacijos koeficientas $R^2 = 0.5745$. Daroma prielaida, kad nuotekomis apsemtame plieno drožlių sluoksnyje vyko fizikiniai ir biologiniai procesai, kurių metu geležis oksidavosi ir perėjo į trivalentę formą. Eksperimento rezultatai patvirtina jau anksčiau

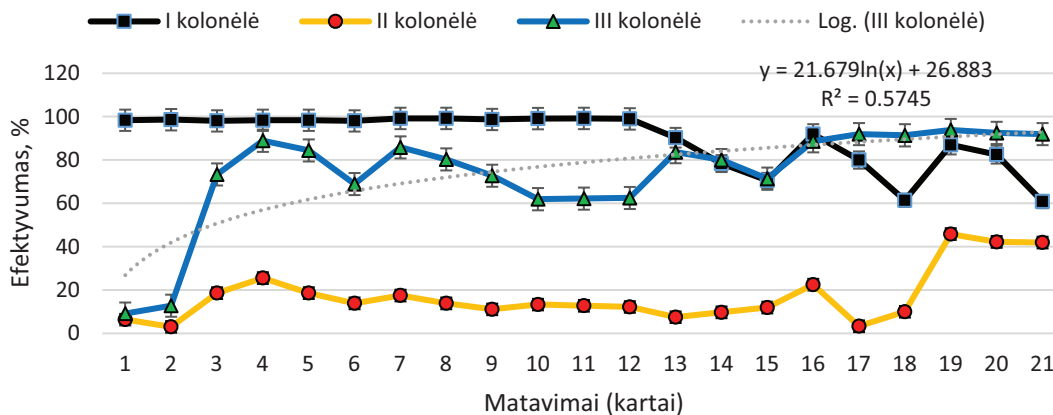


2 paveikslas. Išmatuotos PO_4-P koncentracijos filtratuose iš trijų kolonelių bei pradinė PO_4-P koncentracija atsivežtose nuotekose

pastebėtą (Jakubėnas et al., 2014) aplinkybę, kad pieno drožlių užpildui tam, kad jis pradėtų veikti efektyviai (efektyvumas $>90\%$), reikalingas paleidimo-derinimo laikotarpis. Šio darbo skirtumas tas, kad filtravimo kolonėlėje pieno drožlių užpildas yra apsemtas ir filtruojamos realios nuotekos po biologinio valymo, o Jakubėno ir kt. (2014) tyrime laistomuoju filtru buvo valomos dirbtinės nuotekos.

Trečiosios kolonėlės efektyvumas šalinant tirpų fosforą svyravo nuo 9 iki 94 % (3 paveikslas). Pažymėtina, kad iš pradžių pieno drožlių užpildas nepasizymėjo efektyvumu šalinant PO_4-P iš nuotekų, o eksperimento pabaigoje užfiksuotas III kolonėlės efektyvumas yra pats didžiausias. Efektyvumas kito pagal logaritminę funkciją, kurios determinacijos koeficientas $R^2 = 0.5745$. Daroma prielaida, kad nuotekomis apsemtame pieno drožlių sluoksnyje vyko fizikiniai ir biologiniai procesai, kurių metu geležis oksidavosi ir perėjo į trivalentę formą. Eksperimento rezultatai patvirtina jau anksčiau pastebėtą (Jakubėnas et al., 2014) aplinkybę, kad pieno drožlių užpildui tam, kad jis pradėtų veikti efektyviai (efektyvumas $>90\%$), reikalingas paleidimo-derinimo

laikotarpis. Šio darbo skirtumas yra tas, kad filtravimo kolonėlėje pieno drožlių užpildas yra apsemtas ir filtruotos realios nuotekos po biologinio valymo, o Jakubėno ir kt. (2014) tyrime laistomuoju filtru valomos dirbtinės nuotekos. Ankstesnių tyrimų metu nepsemti filtrai dirbo 24 valandas per parą, į kiekvieną filtrą buvo tiekama 4,32 l/d dirbtinių nuotekų, pieno drožlių sluoksnis buvo 0,9 m ir pasiektas 99 % PO_4-P šalinimo efektyvumas. Šiame tyrime filtravimas vyko per 0,07 m aukščio užpildo sluoksnį, į kolonėlės buvo tiekama 1,18 l/h realių, biologiškai valytų nuotekų ir buvo pasiektas 91–94 % efektyvumas. Daroma išvada, kad pieno užpildas gana efektyviai šalina PO_4-P iš dirbtinių bei realių nuotekų (tiek apsemtame filtre, tiek laistomajame). Pastebėta, kad, filtravimą vykdant po 5 valandas su pertraukomis, po pertraukų II ir III kolonelių efektyvumas padidėdavo. Tai galima paaiškinti geresne PO_4-P adsorbicija į gilesnius sorbentų sluoksnius, kai filtravimas nevyksta. PO_4-P šalinimo iš skystosios terpės mechanizmas nėra pilnai išaiškintas. Manoma, kad vyksta heterogeninės reakcijos. Pasiekusios kietą geležies paviršių, fosforo junginių molekules jungiasi su



3 paveikslas. PO_4-P šalinimo trijose kolonėlėse efektyvumas (%)

paviršiumi reaktyviose (cheminė reakcija) ir nereaktyviose (sorbicijos sąveika) vietose. Filtruojant realias nuotekas, kurios yra jau po biologinio valymo, sorbcijos procesai yra veikiami bakterinių fermentų. Venkiteshwaran ir kt. (2018) pastebėjo, kad, panaudojus selektyvias, didelio afiniteto *E. coli* bakterijų fosfatą surišančio baltymo adsorbicijos savybes, atsiranda galimybė sukurti naujovišką valymo sistemą, kuri gali veiksmingai pašalinti tirpų fosforą, jį sumažindama iki itin žemo lygio (<100 µg/L). Geležies turintys sorbentai gali būti panaudoti tretinio nuotekų valymo grandyje, kuriant filtravimo sistemas (Mažeikienė et al., 2021). Plieno drožlių efektyvumas su laikant PO₄-P šio tyrimo pabaigoje susilygino su didelio našumo sorbento GEH[®] 102 efektyvumu ir jį viršijo. Pažymėtina, kad apsemtas plieno drožlių užpildas nesurūdijo, jo tūris nepadidėjo. Rekomenduojama šiuos preliminarinius tyrimus išplėsti, ypač atkreipiant dėmesį į plieno apdirbimo atliekas – plieno drožlių – antrinį panaudojimą nuotekoms valyti nuo PO₄-P. Kitas svarbus aspektas – kaip atsiimti fosforą iš panaudotų filtrų užpildų. Norint sukurti žiedinę fosforo ekonomiką, būtina sukurti naujoviškas nuotekų valymo sistemas, kurios galėtų grįžtamai pašalinti neorganinį fosfatą, jį sumažindamos iki itin žemo lygio (<100 µg/L).

4. Išvados

1. Adsorbentas GEH[®]102, skirtas geriamojo vandens ruošimui, yra efektyvus (efektyvumas iki 98 %) ir tinkamas PO₄-P šalinti iš biologiskai valytų nuotekų, kuriose skendinčiųjų medžiagų koncentracija yra nedidelė (<2 mg/l).
2. Grynas miltelių pavidalo adsorbentas SBGx nėra tinkamas nuotekoms filtruoti, todėl turi būti maišomas su smėliu ar kita inertine medžiaga. Šio adsorbento efektyvumas šalinant iš nuotekų PO₄-P svyravo nuo 3 iki 41 %.
3. Plieno drožlių užpildas yra tinkamas PO₄-P šalinti iš buitinių nuotekų, kuriose po biologinio valymo yra sumažinta skendinčiųjų medžiagų koncentracija (iki 2 mg/l). Apsemtas 7 cm aukščio plieno drožlių užpildas gali sorbuoti iš nuotekų PO₄-P 91–94 % efektyvumu, kai nuotekos filtruojamos 0,74 m/h greičiu.
4. Plieno drožlės yra atlieka, kurios antrinis panaudojimas nuotekoms valyti būtų naudingas aplinkos darnumui. Todėl rekomenduojama šioje srityje atlikti daugiau tyrimų.

Literatūra

Abukhadra, M. R., Ali, S. M., Nasr, E. A., Mahmoud, H. A. A., & Awwad, E. M. (2020). Effective sequestration of phosphate and ammonium ions by the bentonite/zeolite Na-P composite as a simple technique to control the eutrophication

- phenomenon: Realistic studies. *ACS Omega*, 5(24), 14656–14668. <https://doi.org/10.1021/acsomega.0c01399>
- Ahmed, M. B., Zhou, J. L., Ngo, H. H., & Guo, W. (2016). Insight into biochar properties and its cost analysis. *Biomass and Bioenergy*, 84, 76–86, <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2015.11.002>
- GEH wasserchemie. (n.d.). *GEH[®]102*. <https://www.geh-wasserchemie.com/en/applications/drinking-water/>
- Guan, Q., Li, Y., Zhong, Y., Liu, W., Zhang, J., Yu, X., Ou, R., & Zeng, G. (2023). A review of struvite crystallization for nutrient source recovery from wastewater. *Journal of Environmental Management*, 344, Article 118383. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2023.118383>
- Gubernat, S., Masłoń, A., Czarnota, J., & Koszelnik, P. (2020). Reactive materials in the removal of phosphorus compounds from wastewater – a review. *Materials (Basel)* 13(15), Article 3377. <https://doi.org/10.3390/ma13153377>
- Jakubėnas, A., Daukyns R. ir Kirjanova, A. (2014). Fosfatų šalinimo iš nuotekų, panaudojant metalo drožles, tyrimai. Iš 17-osios Lietuvos jaunųjų mokslininkų konferencijos „Mokslas – Lietuvos ateitis“ teminės konferencijos „Pastatų inžinerinės sistemos“ straipsnių rinkinio (p. 26–31). Technika.
- Kareiva, A. (2021). *Nuostabusis cheminių elementų pasaulis*. Lietuvos mokslų akademija. <https://www.lma.lt/uploads/LMA%20leidyba/Kareiva%20internetui1.pdf>
- Kirjanova, A. (2014). *Buitinių nuotekų individualaus valymo technologijos tyrimai ir sukūrimas* [daktaro disertacija, Vilniaus Gedimino technikos universitetas]. Technika. <https://doi.org/10.20334/2307-M>
- Klimeski, A., Uusitalo, R., & Turtola, E. (2014). Screening of Ca- and Fe-rich materials for their applicability as phosphate-retaining filters. *Ecological Engineering*, 68, 143–154. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2014.03.054>
- Mažeikienė, A., Vaiškūnaitė, R. ir Šarko, J. (2021). Sand from groundwater treatment coated with iron and manganese used for phosphorus removal from wastewater. *Science of The Total Environment*, 764, Article 142915. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.142915>
- Mažeikienė, A. (2019). Improving small-scale wastewater treatment plant performance by using a filtering tertiary treatment unit. *Journal of Environmental Management*, 232, 336–341. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2018.11.076>
- Mendes, L R. D. (2020). Edge-of-field technologies for phosphorus retention from agricultural drainage discharge applied sciences. *Applied Sciences*, 10(2), Article 634. <https://doi.org/10.3390/app10020634>
- Öfverström, S., Davidsson, Å., Haghghatafshar, S., Kjerstadius, H., & la Cour Jansen, J. (2020). Waste ochre for control of phosphates and sulfides in digesters at wastewater treatment plants with enhanced biological phosphorus removal. *Clean Technologies*, 2(1), 116–126. <https://doi.org/10.3390/cleantechnol2010008>
- Penn, C., Chagas, I., Klimeski, A., & Lyngsie, G. (2017). A review of phosphorus removal structures: How to assess and compare their performance. *Water*, 9(8), Article 583. <https://doi.org/10.3390/w9080583>
- Penn, C. J., & Bowen, J. M. (2018). *Design and construction of phosphorus removal structures for improving water quality* (1st ed.). Springer International Publishing. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-58658-8>

- Qin, C., Liu, H., Liu, L., Smith, S., Sedlak, D. L., Gu, A. Z. (2015). Bioavailability and characterization of dissolved organic nitrogen and dissolved organic phosphorus in wastewater effluents. *Science of The Total Environment*, 511, 47–53. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2014.11.005>
- Stepova, K., Fediv, I., Mažeikienė, A., Šarko, J., & Mažeika, J. (2023). Adsorption of ammonium ions and phosphates on natural and modified clinoptilolite: Isotherm and breakthrough curve measurements. *Water*, 15(10), Article 1933. <https://doi.org/10.3390/w15101933>
- Stroom, J. M., & Kardinaal, W. E. A. (2016). How to combat cyanobacterial blooms: Strategy toward preventive lake restoration and reactive control measures. *Aquatic Ecology*, 50, 541–576. <https://doi.org/10.1007/s10452-016-9593-0>
- Su, M., Han, F., Wu, Y., Yan, Z., Lv, Z., Tian, D., Wang, S., Hu, S., Shen, Z., & Li, Z. (2019). Effects of phosphate-solubilizing bacteria on phosphorous release and sorption on montmorillonite. *Applied Clay Science*, 181, Article 105227. <https://doi.org/10.1016/j.clay.2019.105227>
- Venkiteshwaran, K., Pokhrel, N., Hussein, F., Antony, E., & Mayer, B. K. (2018). Phosphate removal and recovery using immobilized phosphate binding proteins. *Water Research X*, 1, Article 100003. <https://doi.org/10.1016/j.wroa.2018.09.003>
- Wang, N., Feng, J., Chen, J., Wang, J., & Yan, W. (2017). Adsorption mechanism of phosphate by polyaniline/TiO₂ composite from wastewater. *Chemical Engineering Journal*, 316, 33–40. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2017.01.066>

EFFICIENCY OF IRON-CONTAINING FILTER FILTERS IN THE REMOVAL OF SOLUBLE PHOSPHORUS

A. VARNAGIRIS, A. MAŽEIKIENĖ

Abstract. The aim of this work is to test the effectiveness of iron-containing materials in sorbing soluble phosphorus from real, biologically treated wastewater. Three materials containing iron were chosen for the research: sorbents GEH[®]102, SBGx and steel chips, which were placed in 3 columns of the experimental bench. Filtration took place at a speed of 0.74 m/h from top to bottom, the sorbent fillers were covered all the time, and a 25 cm high liquid layer was maintained above the fillers. The GEH[®]102 adsorbent for drinking water treatment has been shown to be effective (up to 98% efficiency) in removing PO₄-P from biologically treated wastewater with low suspended solids concentrations (<2 mg/l). Powdered adsorbent SBGx was mixed with sand, its efficiency for PO₄-P removal from wastewater ranged from 3 to 41%. Steel chip filler proved to be suitable for PO₄-P removal from domestic wastewater, with 91–94% efficiency. Steel shavings are a waste whose secondary use for wastewater treatment would be beneficial in the context of environmental sustainability, and more research is recommended in this area.

Keywords: wastewater, phosphorus, filtration, iron, disposal, efficiency.