VILNIUS TECH
Vilniaus Gedimino technikos universitetas

28-oji Lietuvos jaunųjų mokslininkų konferencijos „Mokslas – Lietuvos ateitis" teminė konferencija
Proceedings of the 28th Conference for Junior Researchers "Science – Future of Lithuania"

DARNI APLINKA / SUSTAINABLE ENVIRONMENT

2025 m. balandžio 24 d., Vilnius, Lietuva
24 April 2025, Vilnius, Lithuania

ISSN 2029-7157 / eISSN 2029-7149
eISBN 978-609-476-390-8
https://doi.org/10.3846/da.2025.002

Aplinkos apsaugos inžinerija / Environmental Protection Engineering *https://vilniustech.lt/346238*

PAPILDOMO BUITINIŲ NUOTEKŲ VALYMO, NAUDOJANT GELEŽIES DROŽLIŲ UŽPILDĄ, TYRIMAI

Audrius VARNAGIRIS, Aušra MAŽEIKIENĖ*

Vilniaus Gedimino technikos universitetas, Aplinkos inžinerijos fakultetas,
Aplinkos apsaugos ir vandens inžinerijos katedra, Vilnius, Lietuva

**El. paštas ausra.mazeikiene@vilniustech.lt*

Gauta 2025 m. vasario 24 d.; priimta 2025 m. kovo 17 d.

Anotacija. Straipsnyje nagrinėjami papildomo buitinių nuotekų valymo metodai, naudojant geležies drožlių užpildą fosforui šalinti. Siekiant sumažinti eutrofikacijos poveikį, buvo tiriamas geležies apdirbimo atliekų efektyvumas fosforo adsorbcijai. Eksperimentai parodė, kad geležies drožlių užpildas gali pasiekti iki 95,7 % fosforo šalinimo efektyvumą, o regeneracijos metu naudojant natrio hidroksidą ir sieros rūgštį adsorbcijos geba gali būti atkurta. Tyrimo rezultatai rodo, kad šis metodas gali būti efektyvi ir tvari priemonė nuotekoms valyti, mažinant cheminio nusodinimo poreikį ir mažinant aplinkos taršą.

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

1. Įvadas

Paviršinio vandens eutrofikacija ir tankus cianobakterijų žydėjimas paviršiniame vandenyje, kaip galima pasekmė, yra viena iš vandens valdytojų problemų, su kuria vis dar susiduriama visame pasaulyje (Schoumans et al., 2015).

Siekiant užtikrinti tinkamą apsaugą nuo eutrofikacijos, nuotekų valymo įrenginiams keliami griežti reikalavimai dėl didžiausios leidžiamosios fosforo koncentracijos arba minimalaus jos sumažinimo procento, išleidžiant išvalytas nuotekas į vandenį ar gruntą.

Pavyzdžiui, Europos vandens kokybės standartai – Pagrindų direktyva (EB 2000/60/EB) galiausiai turės būti įvykdyta 2027 m. Viena iš galimybių tai įgyvendinti gali būti reaktyvių medžiagų naudojimas surišti P, imobilizuoti P viršutiniame dirvožemio sluoksnyje (Koopmans ir kt., 2020).

Sparčiai vystantis pramonei ir žemės ūkiui, kartu didėja fosforo emisija, o tai lemia didelį fosforo kiekį vandenyje (Han et al., 2020; Xiao et al., 2018). Fosforas yra vienas iš svarbiausių vandens eutrofikaciją sukeliančių veiksnių (Xu et al., 2017). Kai fosforo koncentracija vandenyje yra didesnė nei 0,3 mg/l, dumbliai gali daugintis dideliais kiekiais (Zhang et al., 2020). Šiuo metu nuotekų valymas aplinkos apsaugos srityje daugiausia priklauso nuo defosforizacijos ir vis dar yra rimtų trūkumų esamose technologijose (Afridi et al., 2020; Blatter et al., 2020; Yogev et al., 2020). Įprasti nuotekų valymo būdai dažniausiai yra pagrįsti aerobiniais procesais, o įprastiniai veikliojo dumblo bioreaktoriai yra orientuoti į teršalų (organinių, kietųjų medžiagų ir maistinių medžiagų) pašalinimą iš nuotekų taip, kad atitiktų išleidimo ribas (Robles et al., 2018).

Nuotekų valymo įrenginiuose pagrindiniai P pašalinimo metodai yra pagrįsti cheminio nusodinimo technologijomis, kuriose naudojamos kalkių, aliuminio ir geležies druskos, taip pat sustiprinto biologinio fosforo pašalinimo (EBPR) procesu (Cieslik & Konieczka, 2016). Biologinių metodų taikymas kai kuriais atvejais gali pasirodyti nepakankamas, kad būtų veiksmingai užkirstas kelias eutrofikacijos procesui. Priešingai, cheminiai metodai yra brangūs, nes reikia reagentų. Šiuolaikinės technologijos yra pagrįstos adsorbcijos ir nusodinimo procesais. Tačiau, vadovaujantis žaliosios chemijos ir darnaus vystymosi (ekožalios) koncepcijomis, šiuo metu ieškoma pigių ir aplinkai nekenksmingų medžiagų (Cieslik & Konieczka, 2016, Sorensen et al., 2015).

Siekiant efektyviai atkurti vandens kokybę šalinant fosfatą, buvo naudojamos įvairios technologijos, pvz., atvirkštinis osmosas (Kress et al., 2019), sedimentacija (Chen et al., 2019), biologiniai procesai (Yang et al., 2019), įrengta pelkė (Kabenge et al., 2018), jonų mainai

© 2025 Autoriai. Leidėjas Vilniaus Gedimino technikos universitetas. Šis straipsnis yra atvirosios prieigos straipsnis, turintis Kūrybinių bendrijų (Creative Commons) licenciją (CC BY 4.0), kuri leidžia neribotą straipsnio ar jo dalių panaudą su privaloma sąlyga nurodyti autorių ir pirminį šaltinį.

(Tong et al., 2017), membrana (Koh et al., 2020), elektrochemija (Huang et al., 2019), adsorbcija (Karami, et al. 2022; Muisa et al., 2020) ir flotacija (Xiao et al., 2019). Kiti metodai turi daug apribojimų, pavyzdžiui, sudėtingų daugelio cheminių reagentų veikimas ir naudojimas; be to, sudėtingesnis susidariusio dumblo tvarkymas, o regeneracija yra sunki ir nestabili (Lin et al., 2019; Xiao et al., 2019).

Iki šiol mokslininkai ištyrė keletą didelio poringumo adsorbentų, kurie adsorbuoja fosfatą nuotekose. Šie adsorbentai, tokie kaip organiniai polimerai, mezoporinis silicio dioksidas, aktyvintoji anglis, raudonasis purvas ir ceolitas, turi didelį specifinį paviršiaus plotą (Cheng et al., 2022). Vienas iš pagrindinių šių adsorbentų trūkumų yra tas, kad juos paprastai yra sunku regeneruoti ir atgauti fosforą, todėl reikia papildomos atskyrimo technologijos.

Fosforo pašalinimui iš nuotekų svarbi adsorbento cheminė sudėtis. Reaktyviosios medžiagos yra medžiagos, galinčios selektyviai pašalinti medžiagas sorbcijos arba nusodinimo būdu. Norint pašalinti fosforą iš nuotekų ar kitų vandenų, potencialioje medžiagoje turi būti junginių, galinčių surišti fosforą, pvz., Ca, Mg, Fe ir Al. Fosfato adsorbcijos Fe ir Al mechanizmas gali atsirasti keičiantis ligandais.

Dėl tendencijos naudoti natūralias atliekas arba atliekas, kurios susijusios tiek su ekologiniais, tiek su ekonominiais aspektais, nusodinimo metodai dažniausiai pakeičiami metodais, pagrįstais filtravimo, sorbcijos ir biofiltravimo procesais, kuriuose naudojamos tokios medžiagos kaip Leca®, Polonite®, Rockfos®. Naudojami Pollytag®, Filtralite® ir Filtra P. Šios medžiagos buvo sukurtos iš natūralių medžiagų, atitinkamai modifikuotų, kad būtų gautas produktas, kuriam būdingas didelis fosforo šalinimo efektyvumas (Cieslik et al., 2017).

Geležies drožlės yra pramoninės atliekos, kurios susidaro metalo apdirbimo procesuose ir kurios gali būti panaudotos kaip alternatyvi ir tvari medžiaga nuotekoms valyti. Dėl savo cheminės sudėties geležies drožlės turi puikių adsorbcinių savybių, leidžiančių efektyviai surišti fosforą iš užterštų vandenų. Tai ypač svarbu mažinant eutrofikacijos poveikį ir gerinant paviršinių vandens telkinių kokybę. Naudojant šias atliekas, ne tik mažinamas pramoninių likučių kiekis, bet ir sukuriama ekonomiškai efektyvi bei aplinkai draugiška nuotekų valymo alternatyva. Šis metodas gali tapti perspektyvia alternatyva tradiciniams cheminiams ir biologiniams fosforo šalinimo būdams, suteikiant galimybę sumažinti cheminių reagentų poreikį ir skatinti žiedinės ekonomikos principų taikymą. Tyrimo tikslas – įvertinti geležies drožlių užpildo efektyvumą fosforui šalinti iš biologiniu būdu išvalytų buitinių nuotekų, siekiant sumažinti eutrofikacijos poveikį paviršiniams vandens telkiniams ir ištirti užpildo regeneracijos galimybes, taikant skirtingas chemines medžiagas.

2. Tyrimų metodika

PO_4-P koncentracijos nuotekose mažinimo eksperimentas

Nuotekos tyrimams buvo penkis kartus paimtos iš mažo (kurio debitas 1,5 m^3/d) individualaus nuotekų valymo įrenginio, esančio Vilniaus miesto sodų bendrijoje. Biologiniu būdu išvalytų nuotekų mėginiai buvo imami iš nuotekų valymo įrenginio ištekėjimo vamzdžio ryte (apie 7:30 val.), jų temperatūra buvo matuojama vietoje. Paimti mėginiai buvo vežami ištirti į VILNIUS TECH laboratoriją. Laboratorijoje mėginiai buvo laikomi, kol sušils iki kambario temperatūros (20 °C), tuomet buvo matuojama jų pH ir orto-fosfatų fosforo (PO_4-P) koncentracija.

Fosforo (PO_4-P) koncentracija atsivežtose į laboratoriją nuotekose buvo mažinama naudojant kolonėlę, pripildytą geležies drožlių. Geležies (plieno) drožlės, kaip iš tekinimo staklių paimtos atliekos, buvo gautos iš UAB „Destata Profil“ (DIN17135, AST45) (1 paveikslas). Gautos drožlės buvo susmulkintos taip, kad jų dalelių dydis būtų nuo 1 iki 10 mm, tuomet jos buvo supiltos į kolonėlę (skersmuo 4,5 cm, aukštis 7 cm) ir užėmė 111,3 ml tūrį.



1 paveikslas. Geležies (plieno) drožlės

Atsivežtos, biologiniu būdu išvalytos nuotekos buvo filtruojamos per kolonėlę iš viršaus į apačią 0,74 m/h greičiu.

Visi eksperimentiniai tyrimai buvo padalinti į du etapus: pradinį filtravimo etapą ir poregeneracinį tyrimų etapą. Pradiniame etape buvo filtruojamos atsivežtos nuotekos, nekeičiant PO_4-P koncentracijos jose.

Siekiant padidinti fosforo koncentraciją atsivežtose nuotekose, į jas buvo pridedama K_2HPO_4 druskos. Tai buvo atlikta, kad užpildas adsorbuotų daugiau fosforo ir būtų prasminga jį regeneruoti. Nepadidinus pradinės koncentracijos, filtravimo procesas galėjo tęstis dar ilgai, ir tam būtų naudojami nepigūs reagentai bei laikas.

Taigi, taupumo sumetimais nuotekose po biologinio valymo buvo 4,5 mg/l fosfatų fosforo koncentracija.

Druskos buvo pridedama atsižvelgiant į pradinę PO_4-P koncentraciją, kaip parodyta 1 lentelėje.

1 lentelė. Pridedamas K_2HPO_4 masės kiekis g

Pradinė PO_4-P koncentracija nuotekose	Pridedama K_2HPO_4 masė, g
1	24,22
2	23,38
3	22,55
4	21,72
5	20,89

Kolonėlės regeneravimo eksperimentas

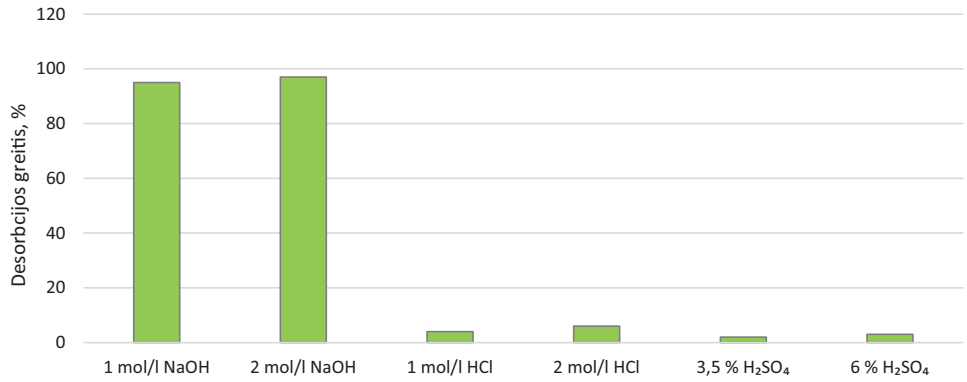
Kolonėlės geležies užpildui regeneruoti galėtų tikti NaOH, HCl ar H_2SO_4. Kolonėlės regeneravimo greitis buvo maždaug 4 m/h. Tris litrus tirpato prafiltravome maždaug per 30 min, kolonėlės užpildo paviršiaus plotas 0,00159 m^2, taigi greitis yra apie 4 m/h. Cheng et al. (2022) tyrime buvo ištirta šių medžiagų koncentracijos įtaka fosforo desorbcijos greičiui, kaip parodyta 2 paveiksle.

Iš 2 paveikslo rezultatų matyti, kad H_2SO_4 tirpalas ir HCl tirpalas turi mažą fosforo desorbcijos pajėgumą; geriausią fosforo desorbcijos efektą turi 2 mol/L koncentracijos NaOH tirpalas, tačiau desorbcijos greičio gerinimo efektas nėra akivaizdus lyginant su 1 mol/l NaOH tirpalu. Efektyvumo ir ekonomiškumo balansą galima pasiekti naudojant 1 mol/L NaOH tirpalą kaip desorbcijos tirpalą, o tai atitinka Afridi et al. (2020) tyrimus.

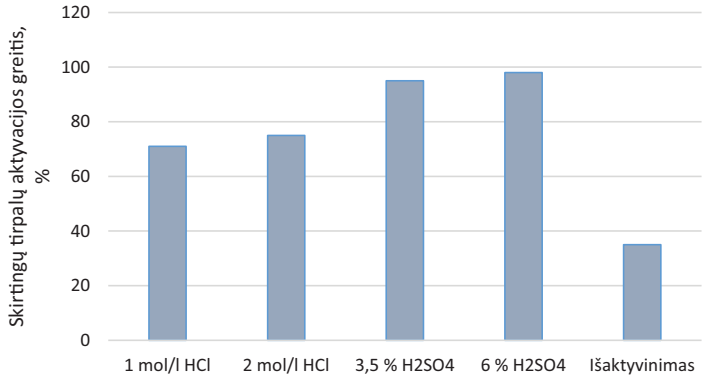
Po fosforo desorbcijos kolonėlę reikia vėl suaktyvinti, kad būtų atkurtas geležies drožlių adsorbcijos efektyvumas. Skirtingų tirpalų aktyvacijos greitis parodytas 3 paveiksle.

Cheng et al. (2022) tyrime geležies kempinės adsorbcijos aktyvumas prieš adsorbciją be pakartotinio aktyvavimo buvo 33,8 %, o fosforo adsorbcijos geba buvo žymiai mažesnė, nei geležies kempinės. Palyginti su druskos rūgštimi, sieros rūgštis turėjo geresnį aktyvinimo efektą.

Kai geležies kempinė buvo modifikuota 6 % H_2SO_4, pakartotinio naudojimo efektyvumas buvo 98,2 %, buvo aiškiai atkurta kempinės geležies adsorbcijos geba sulaikyti fosforą. Pagrindinis geležies kempinės privalumas yra nulinis valentingumas, todėl šios medžiagos turi panašų fosforo pašalinimo mechanizmą (Cheng et al., 2022).



2 paveikslas. Šarmo ir rūgščių koncentracijos įtaka fosforo desorbcijos greičiui (adaptuota pagal Cheng et al., 2022)



3 paveikslas. Rūgščių koncentracijos įtaka kolonėlės aktyvacijos greičiui (adaptuota pagal Cheng et al., 2022)

Atsižvelgiant į (Cheng et al., 2022) tyrimus, šiame darbe darbe numatyta tokia kolonėlės užpildo regeneravimo tvarka:

1. Desorbcija su 18,18 mol/L natrio hidroksido.
2. Reaktyvacija su 6 % (masės %) sieros rūgštimi.

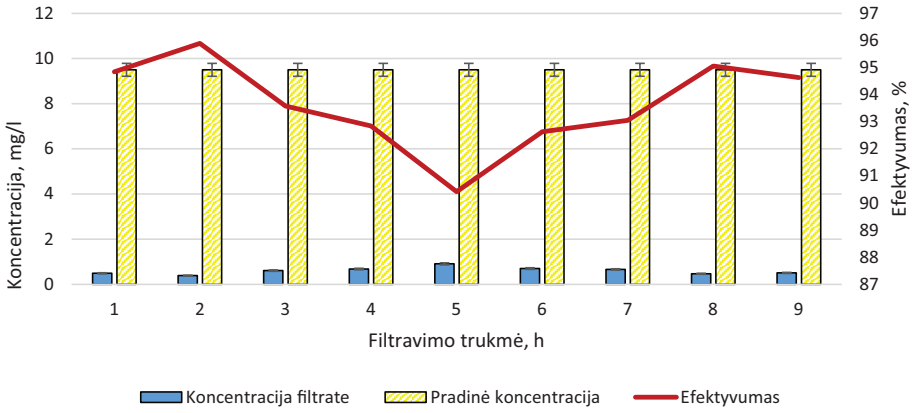
Buvo pasiruošta po 3 litrus kiekvieno tirpalo ir jais iš eilės buvo praplauta kolonėlė filtruojant tirpalus iš viršaus į apačią.

Nuotekų temperatūra įvertinta matuokliu *Seven-Go 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. Fosfatų fosforo koncentracijai nustatyti buvo naudoti MERCK *Spectroquant*® testai. Testų ribos 0,50–30,0 mg/l PO4–P. Į švarius ir sausus mėgintuvėlius pipete įlašinta po 5 ml tiriamojo mėginio ir po 1,2 ml reagento PO4–1. Mėgintuvėliai buvo uždengiami kamšteliais ir sumaišomi. Tiriamojo tirpalo absorbcijos matavimai atlikti tiriamuosius mėginius pilant į 10 mm kiuvetes (*Hellma*) ir esant reikiamam bangos ilgiui (410 nm) matuojant *Genesys* 10 UV–Vis spektrofotometru (*Thermo Fisher Scientific*, JAV). Kontrolinis mėginys buvo ruošiamas analogiškai, tik vietoje tiriamojo mėginio imant distiliuotą vandenį. PO4–P koncentracija buvo nustatyta išmatuotą tiriamojo mėginio absorbciją dauginant iš fosfatų fosforo nustatymo teste nurodyto faktoriaus: PO4–P nustatymui faktorius yra 18,0.

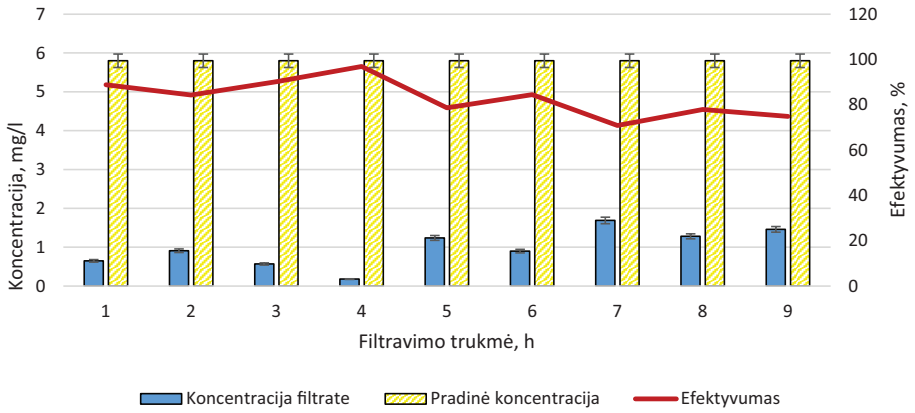
3. Rezultatai

Pagal atliktus matavimus spalio 8–9 dienomis bei spalio 23–24 dienomis galima matyti, kad pradiniame tyrimų etape fosforo šalinimo efektyvumas siekė net 96 % (4 paveikslas). Tai rodo, kad geležies drožlių užpildas yra labai veiksmingas fosforo adsorbcijai iš biologiniu būdu išvalytų nuotekų. Tačiau laikui bėgant šalinimo efektyvumas mažėjo – po 18 valandų jis sumažėjo iki 71 % (5 paveikslas). Tai leidžia daryti išvadą, kad, ilgainiui prisotinant užpildą fosforu, jo adsorbcinės savybės silpnėja.

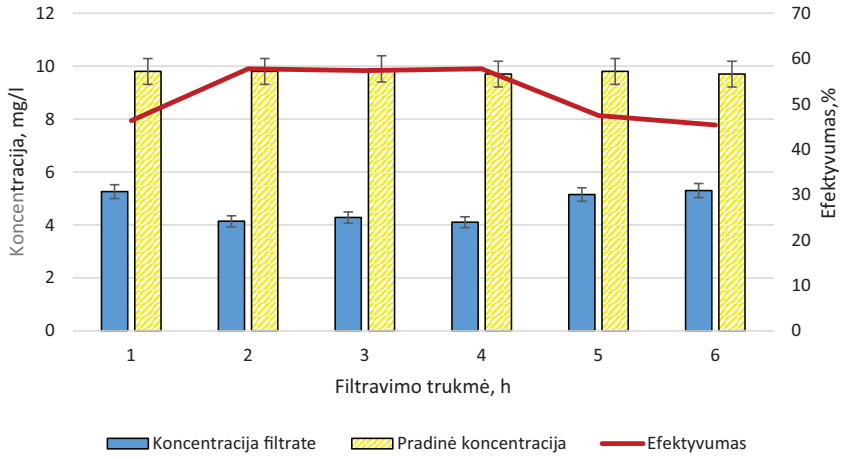
Eksperimento metu (6 paveikslas) buvo stebima fosforo koncentracija nuotekose prieš filtravimą ir po jo. Pradinė PO4-P koncentracija siekė 9,8 mg/l, tačiau po filtravimo ji sumažėjo iki 5,3 mg/l. Tai patvirtina, kad PO_4-P efektyvumas mažėja priklausomai nuo filtravimo trukmės ir pratekėjusio nuotekų kiekio.



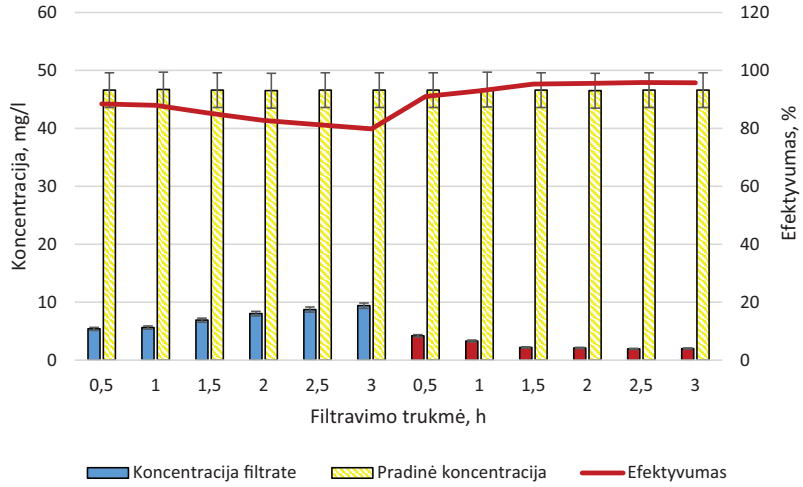
4 paveikslas. Išmatuota PO_4-P koncentracija spalio 8–9 dienomis



5 paveikslas. Išmatuota PO_4-P koncentracija spalio 23–24 dienomis



6 paveikslas. PO_4-P koncentracija prieš filtarvimą ir po jo



7 paveikslas. PO_4-P koncentracija po regeneracijos

Per kolonėlę prafiltravus apie 22,2 litrų nuotekų, fosforo sulaikymo kolonėlėje efektyvumas sumažėjo iki 79,8 %, o filtrate likdavo 9,4 mg/l PO_4-P koncentracija.Tuomet NaOH ir H_2SO_4 buvo naudojami fosforui (*in situ*) desorbuoti ir kolonėlei iš naujo suaktyvinti. Po regeneracijos per kolonėlę filtruojant nuotekas, buvo pasiektas 95,7 % fosforo šalinimo efektyvumas, o PO_4-P koncentracija filtrate sumažėjo daugiau nei 2 kartus (7 paveikslas).

Geležies drožlių kolonėlės PO4-P desorbcijos ir aktyvacijos reakcijos gali būti šios:

1. Geležies oksidas drožlių paviršiuje disocijuoja arba atsiskiria geležies jonas dėl pačios geležies korozijos ir cheminės reakcijos su fosfatu; pasigamina netirpi druska, tokia kaip $FePO_4$, $Fe_3(PO_4)_2$ ir kt. Susidarius netirpioms nuosėdoms, jos lengvai padengia geležies drožlių paviršių, o tai nėra palanku tolesniam fosforo pašalinimui tirpale (Park et al., 2021).

2. Geležies jonai hidrolizės būdu sukuria ilgus linijinius daugiabranduolinius hidroksilo kompleksus, vyksta polimerizacija ir koordinuojami mainai su fosfatais.

3. Esant rūgštinėms ir silpnai šarminėms sąlygoms, drožlių geležis susijungia su protonais (teigiamas krūvis); taigi, atsiranda neigiamai įkrautų fosfatų jonų elektrostatinė adsorbcija (Wang et al., 2015).

4. Išvados

1. Tyrimo rezultatai parodė, kad geležies drožlių užpildas yra efektyvus fosforo šalinimo būdas, pasiekiantis net 95,7 % šalinimo efektyvumą. Pradinėje filtravimo stadijoje fosforo koncentracija nuotekose sumažėjo daugiau nei du kartus, o tai įrodo didelį geležies drožlių adsorbcijos potencialą.

2. Siekiant atkurti geležies drožlių adsorbcines savybes, buvo atlikta regeneracija naudojant 18,18 mol/L natrio hidroksido (NaOH) tirpalą ir 6 % sieros rūgšties (H_2SO_4) tirpalą. Po regeneracijos fosforo šalinimo efektyvumas vėl pasiekė 95,7 %, o PO4-P koncentracija filtrate reikšmingai sumažėjo. Tai įrodo, kad šis metodas leidžia efektyviai atkurti adsorbcines savybes ir užtikrina ilgalaikį užpildo naudojimą.

3. Fosforo pašalinimo efektyvumas siejamas su geležies drožlių paviršiuje vykstančiais cheminiais procesais, tokiais kaip fosfatų sorbcija, ligandų mainai ir elektrostatinė adsorbcija. Susidarant $FePO_4$ ir $Fe_3(PO_4)_2$ netirpioms druskoms, adsorbcinis paviršius palaipsniui užsiteršia, tačiau tinkamai atlikta regeneracija leidžia jį išvalyti ir atkurti adsorbcijos gebą.

Literatūra

Afridi, M. N., Lee,W.-H., & Kim, J.-O. (2020). Application of synthesized bovine serum albumin-magnetic iron oxide for phosphate recovery. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, *86*, 113–122. https://doi.org/10.1016/j.jiec.2020.02.018

Blatter, M., Furrer, C., Cachelin, C. P., & Fischer, F. (2020). Phosphorus, chemical base and other renewables from wastewater with three 168-L microbial electrolysis cells and other unit operations. *Chemical Engineering Journal*, *390*, Article 124502. https://doi.org/10.1016/j.cej.2020.124502

Chen, Y., Lin, H., Yan, W., Huang, J., Wang, G., & Shen, N. (2019). Alkaline fermentation promotes organics and phosphorus recovery from polyaluminum chloride-enhanced primary sedimentation sludge. *Bioresource Technology*, *294*, Article 122160. https://doi.org/10.1016/j.biortech.2019.122160

Cheng, P., Wang, B., Wang, X., & Xiao, W. (2022). Effects of recycled sponge iron on phosphorus recovery from polluted water. *Minerals*, *12*(6), 730. https://doi.org/10.3390/min12060730

Cieslik B., & Konieczka, P. (2017). 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. *Journal of Cleaner Production*, *142*, 1728–1740. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.11.116

Han, C., Qin, Y., Zheng, B., Ma, Y., Yang, C., Liu, Z., Zhuang, D., & Zhao, Y. (2020). Geochemistry of phosphorus release along transect of sediments from a tributary backwater zone in the Three Gorges Reservoir. *Science of The Total Environment*, *722*, Article 136964. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.136964

Huang, X., Zhu, T., Duan,W., Liang, S., Li, G., Xiao, W. (2019). Comparative studies on catalytic mechanisms for natural chalcopyriteinduced Fenton oxidation: Effect of chalcopyrite type. *Journal of Hazardous Materials*, *381*, Article 120998. https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2019.120998

Yang, H., Liu, J., Hu, P., Zou, L., & Li, Y.-Y. (2019). Carbon source and phosphorus recovery from iron-enhanced primary sludge via anaerobic fermentation and sulfate reduction: Performance and future application. *Bioresource Technology*, *294*, Article 122174. https://doi.org/10.1016/j.biortech.2019.122174

Yogev, U., Vogler, M., Nir, O., Londong, J., & Gross, A. (2020). Phosphorous recovery from a novel recirculating aquaculture system followed by its sustainable reuse as a fertilizer. *Science of The Total Environment*, *722*, Article 137949. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.137949

Yuan, L., Qiu, Z., Yang, J., Li, Z., Farooq, U., Lu, Y., & Lyu, S. (2018). Adsorption performance and mechanism for phosphate removal by cerium hydroxide loaded on molecular sieve. *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*, *93*, 450–460. https://doi.org/10.1016/j.jtice.2018.08.017

Ren, J., Li, N., Wei, H., Li, A., Yang, H. (2020). Efficient removal of phosphorus from turbid water using chemical sedimentation by FeCl3 in conjunction with a starch-based flocculant, *Water Research*, *170*, Article 115361. https://doi.org/10.1016/j.watres.2019.115361.

Kabenge, I., Ouma, G., Aboagye, D., & Banadda, N. (2018). Performance of a constructed wetland as an upstream intervention for stormwater runoff quality management. *Environmental Science and Pollution Research*, *25*, 36765–36774. https://doi.org/10.1007/s11356-018-3580-z

Karami, M., Koohestani, H., & Gholami, H. (2022). Investigation of the effect of geometrical shape of sponge iron on the operating parameters of the induction furnace. *Canadian Metallurgical Quarterly*, 1–6. https://doi.org/10.1080/00084433.2022.2071091

Koh, K. Y., Zhang, S., & Chen, J. P. (2020). Improvement of ultrafiltration for treatment of phosphorus-containing water by a lanthanum-modified aminated polyacrylonitrile membrane. *ACS Omega*, *5*, 7170–7181. https://doi.org/10.1021/acsomega.9b03573

Koopmans, G.F., Hiemstra, T., Vaseur, C., Chardon, W.J., Voegelin, A., & Groenenberg, J. E. (2020). Use of iron oxide nanoparticles for immobilizing phosphorus in-situ: Increase in soil reactive surface area and effect on soluble phosphorus. *Science of The Total Environment*, *711*, Article 135220 https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.135220

Kress, N., Gertner, Y., & Shoham-Frider, E. (2019). Seawater quality at the brine discharge site from two mega size seawater reverse osmosis desalination plants in Israel (Eastern Mediterranean). *Water Research*, *171*, Article 115402. https://doi.org/10.1016/j.watres.2019.115402

Lietuvos standartizacijos departamentas. (2012). *Vandens kokybė. pH nustatymas* (LST EN ISO 10523:2012).

Lin, J., He, S., Wang, X., Zhang, H., & Zhan, Y. (2019). Removal of phosphate from aqueous solution by a novel Mg(OH)(2)/ZrO2 composite: Adsorption behavior and mechanism. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, *561*, 301–314. https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2018.11.001

Ma, J., Ren, S., Song, Y., Wang, D., Men, B., Zhao, H. (2019). Advances in the application of zero-valent iron technology in the field of wastewater treatment. *Chemistry*, *82*, 3–11.

Muisa, N., Nhapi, I., Ruziwa, W., Manyuchi, M. M. (2020). Utilization of alum sludge as adsorbent for phosphorus removal in municipal wastewater: A review. *Journal of Water Process Engineering*, *35*, Article 101187. https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2020.101187

Park, I., Higuchi, K., Tabelin, C. B., Jeon, S., Ito, M., & Hiroyoshi, N. (2021). Suppression of arsenopyrite oxidation by microencapsulation using ferric-catecholate complexes and phosphate. *Chemosphere*, *269*, Article 129413. https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.129413

Robles, Á., Ruano, M. V., Charfi, A., Lesage, G., Heran, M., Harmand, J., Seco, A., Steyer, J.P., Batstone, D.J., Kim, J., Ferrer, J. (2018). A review on anaerobic membrane bioreac-

tors (AnMBRs) focused on modelling and control aspects. *Bioresource Technology*, *270*, 612–626. https://doi.org/10.1016/j.biortech.2018.09.049

Schoumans, O. F., Bouraoui, F., Kabbe, C., Oenema, O., & van Dijk, K. C. (2015). Phosphorus management in Europe in a changing world. *Ambio*, *44*, 180–192. https://doi.org/ 10.1007/s13280-014-0613-9.

Sorensen, B. L., Dall, O. L., & Habib, K. (2015). Environmental and resource implications of phosphorus recovery from waste activated sludge. *Waste Management*, *45*, 391–399. https://doi.org/10.1016/j.wasman.2015.02.012

Sun, H., Zhou, Q., Zhao, L., & Wu, W. (2021). Enhanced simultaneous removal of nitrate and phosphate using novel solid carbon source/zero-valent iron composite. *Journal of Cleaner Production*, *289*, Article 125757. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.125757

Tong, Y. R., McNamara, P. J., & Mayer, B. K. (2017). Fate and impacts of triclosan, sulfamethoxazole, and 17 beta-estradiol during nutrient recovery via ion exchange and struvite precipitation. *Environmental Science: Water & Research Technology*, *3*, 1109–1119. https://doi.org/10.1039/C7EW00280G

Wang, Y., Feng, Y., Jiang, J., & Yao, J. (2018). Designing of recyclable attapulgite for wastewater treatments: A review. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, *7*, 1855–1869. https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.8b05823

Wang, Y., Li, J., Zhai, S., Wei, Z., & Feng, J. (2015). Enhanced phosphorus removal by microbial-collaborating sponge iron. Water Science & Technology, *72*, 1257–1265. https://doi.org/10.2166/wst.2015.323

Xiao, W., Ke, S., Quan, N., Zhou, L., Wang, J., Zhang, L., Dong, Y., Qin, W., Qiu, G., & Hu, J. (2018). The Role of Nanobubbles in the Precipitation and Recovery of Organic-Phosphine-Containing BeneficiationWastewater. *Langmuir*, *34*, 6217–6224. https://doi.org/10.1021/acs.langmuir.8b01123

Xiao, W., Ren, Y.-X., Yang, J., Cao, P., Wang, J., Qin, W.-Q., & Qiu, G.-Z. (2019). Adsorption mechanism of sodium oleate and styryl phosphonic acid on rutile and amphibole surfaces. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, *29*, 1939–1947. https://doi.org/10.1016/S1003-6326(19)65101-0

Xiao, W., Zhao, Y., Yang, J., Ren, Y., Yang, W., Huang, X., & Zhang, L. (2019). Effect of sodium oleate on the adsorption morphology and mechanism of nanobubbles on the mica surface. *Langmuir*, *35*, 9239–9245. https://doi.org/10.1021/acs.langmuir.9b01384

Xu, R., Zhang, M., Mortimer, R. J. G., & Pan, G. (2017). Enhanced Phosphorus Locking by Novel Lanthanum/Aluminum–Hydroxide Composite: Implications for Eutrophication Control. *Environmental Science & Technology*, *51*, 3418–3425. https://doi.org/10.1021/acs.est.6b05623

Zhang, B., Ding, W., Xu, B., Wang, L., Li, Y., & Zhang, C. (2020). Spatial characteristics of total phosphorus loads from different sources in the Lancang River Basin. *Science of The Total Environment*, *722*, Article 137863. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.137863

RESEARCH ON ADDITIONAL DOMESTIC WASTEWATER TREATMENT USING AN IRON SHAVINGS FILLER

A. VARNAGIRIS, A. MAŽEIKIENĖ

Abstract. The article examines additional domestic wastewater treatment methods using an iron shavings filler for phosphorus removal. To reduce the impact of eutrophication, the effectiveness of iron processing waste in phosphorus adsorption was investigated. Experiments showed that the iron shavings filler could achieve up to 95.7% phosphorus removal efficiency, and its adsorption capacity could be restored through regeneration using sodium hydroxide and sulfuric acid. The study results indicate that this method can be an effective and sustainable solution for wastewater treatment, reducing the need for chemical precipitation and minimizing environmental pollution.

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