

PIROLIZUOTO NUOTEKŲ VALYKLOS DUMBLO GEBOS ŠALINTI IŠ NUOTEKŲ FOSFATUS TYRIMAI

Aistė VILČIAUSKAITĖ*, Julita ŠARKO, Aušra MAŽEIKIENĖ

Vilniaus Gedimino technikos universitetas, Aplinkos inžinerijos fakultetas,

Aplinkos apsaugos ir vandens inžinerijos katedra, Vilnius, Lietuva

**El. paštas aiste.vilciauskaite@stud.vilniustech.lt*

Gauta 2023 m. kovo 6 d.; priimta 2023 m. balandžio 3 d.

Santrauka. Vienas svarbiausių nuotekų valymo ir paviršinio vandens tvarkymo tikslų – sumažinti fosforo koncentracijos lygį vandenyje ir taip išvengti eutrofikacijos. Darbe sprendžiami fosforo šalinimo iš nuotekų klausimai. Fosforas buvo šalinamas iš nuotekų filtruojant per 400 °C, 500 °C, 600 °C temperatūroje pirolizuotą nuotekų valyklos dumblą. Tyrimai vyko laboratorinėmis sąlygomis, naudojant eksperimentinį standą su trimis filtravimo kolonėlėmis. Efektyviausiai fosfatų fosforą sulaikė trečia kolonėlė, kuri buvo užpildyta nuotekų dumbliu, pirolizuotu 600 °C temperatūroje. Filtravimo pradžioje jos fosforo šalinimo efektyvumas siekė 87 %. Kitos kolonėlės eksperimento pradžioje buvo mažiau efektyvios: jų efektyvumas šalinti fosforą iš nuotekų sudarė 31–45 %.

Reikšminiai žodžiai: nuotekos, dumblas, pirolizė, filtravimas, fosforas, šalinimas, efektyvumas.

Įvadas

Nuotekų dumblas yra nuotekų valyklose susidaranti atliekos. Augant miestams, daugėjant gyventojų, nuotekų valyklose susidaro vis daugiau dumblo ir jo tvarkymo kaštai nuolat didėja (Agani et al., 2017). Didėjantys dumblo kiekiai ir jo pakartotinis naudojimas yra svarbi problema, su kuria susiduriama visame pasaulyje (Filer et al., 2019; Latif et al., 2017). Dėl šios priežasties nuotekų dumblą privalo tvarkyti efektyviai ir ekonomiškai. Vienas iš efektyviausių nuotekų dumblo tvarkymo metodų šiandien – jo anaerobinis pūdymas (Ignace et al., 2016; Kim et al., 2003; Vongvichiankul et al., 2017). Tokiu būdu atliekas (dumblą) galima paversti energija ir skatinti energijos tvarumą. Šiomis technologijomis siekiama sumažinti dumblo sausųjų medžiagų kiekį ir išgauti kuo daugiau biodujų, kuriose būtų kuo didesnis metano kiekis, plačiai naudojamas kaip kuras (Dauknyš et al., 2020). Vis dėlto po pūdymo dalis dumblo sausųjų medžiagų išlieka ir jas taip pat reikia tvarkyti. Išpūdyto dumblo (likusio po anaerobinio pūdymo) utilizavimas yra problema (Tyagi & Lo, 2011). Valyklose susidaręs nuotekų dumblas gali būti panaudotas žemės ūkio, statybos ir energetikos pramonės šakose (Liew et al., 2021; Metcalf & Eddy Inc. et al., 2013). Tačiau neapdorotas dumblas, tiesiogiai patekęs į dirvožemį, gali sukelti

antrinę taršą ir pakenkti aplinkai, nes jame yra daug patogenų ir mikroorganizmų, o dehidratacija vyksta lėtai (Duan et al., 2020). Po pūdymo likęs dumblas tik ribotai gali būti naudojamas žemės ūkyje, nes jame būna sunkiųjų metalų. Kai vieni tradiciniai dumblo šalinimo būdai patiria spaudimą (naudojimas žemės ūkio paskirties žemėje), o kitų (kaupėtų sąvartynuose) palaiapsnui atsiskoma, būtina ieškoti ekonomiškų ir inovatyvių nuotekų dumblo šalinimo problemos sprendimų (Zhou et al., 2017). Nuotekų dumblo terminis apdorojimas laikomas tinkamu būdu mažinant dumblo tūrį, o kartu iš jo gaunami daugkartinio naudojimo šalutiniai produktai (Rio et al., 2005). Naujas tokio dumblo naudojimas būdas – dumblas gali būti pirolizuojamas 400–600 °C temperatūroje ir iš jo gali būti gaunami sorbentai (Ahmed et al., 2016; Chen et al., 2014; Enaime et al., 2020). Ieškant ekonomiškų ir prieinamų nuotekų valymo medžiagų, nuotekų dumblas buvo pripažintas potencialiai tinkamu aktyvintosios anglies gamybai (Rio et al., 2005). Atlikta keletas adsorbentų paruošimo, karbonizuojant nuotekų dumblą, tyrimų (Khanmohammadi et al., 2015; Zhu et al., 2022; Zielińska & Oleszczuk, 2015). Sorbentai, gauti iš biologinio dumblo, turėjo santykinai didelį savitąjį paviršiaus plotą (100–200 m²/g) ir pasižymėjo mikroporingumu. Pirolizuotas nuotekų dumblas buvo

tinkamas iš tirpalų variui, rūgštiniais ir baziniais dažikliams, fenoliui, fenantrenui, pireniui, bisfenoliui A šalinti (Rio et al., 2005; Wang et al., 2022; Xu et al., 2018; Zielińska & Oleszczuk, 2015).

Fosforą, esantį miestų buitinėse nuotekose, nuotekų valymo įrenginiai iki galo nepašalina. Net nedidelės jo koncentracijos (1–5 mg/l), patekusios į gamtinius vandens telkinius, yra kenksmingos, nes sukelia eutrofikaciją (Poikane et al., 2019). Vandens telkinių eutrofikacija yra rimta ir plačiai paplitusi aplinkos problema (Duan et al., 2020). Vienas iš svarbiausių nuotekų inžinerijos ir paviršinio vandens tvarkymo tikslų – pasiekti žemą fosfatų koncentracijos lygį, kad būtų išvengta eutrofikacijos. Reikalingi reagentai arba papildomas nuotekų valymas, kurio metu fosforo koncentracija būtų sumažinta. Kaip papildomas nuotekų valymas gali būti taikomas filtravimas per sorbuojančiųjų medžiagų sluoksnius. Išbandomos įvairios sorbuojančiosios medžiagos: gamtinės ir sintetinės, įvairios atliekos (Jiang et al., 2019; Younas et al., 2021). Aktyvintoji anglis yra efektyvus sorbentas, tačiau tai brangi medžiaga, kurią galėtų pakeisti pigesnės medžiagos. Plačiai tiriamos įvairios bioanglies savybės (Ahmed et al., 2016; Hossain et al., 2011). Iškelta hipotezė, kad ir pirolizuotas nuotekų dumblas galėtų sorbuoti iš nuotekų fosforą. Pirolizuoto nuotekų dumblo naudojimas fosforui iš nuotekų pašalinti turi keletą privalumų. Pirma, tai ekonomišką sprendimą, palyginti su kitais fosforo šalinimo būdais, tokiais kaip cheminis nusodinimas ar biologinis apdorojimas. Antra, pirolizuotas nuotekų dumblas yra tvarus sprendimas, nes leidžia pakartotinai naudoti atliekas, kurios kitu atveju būtų išmetamos. Galiausiai, pirolizuoto nuotekų dumblo naudojimas gali padėti sumažinti fosforo pertekliaus nuotekose poveikį aplinkai, pvz., eutrofikaciją ir vandens biotos žūtį. Šiame darbe atlikti fosfatų fosforo koncentracijos nuotekose mažinimo, naudojant pirolizuotą nuotekų dumblą, tyrimai.

Darbo tikslas – ištirti 400 °C, 500 °C ir 600 °C temperatūroje pirolizuoto nuotekų dumblo gebą sorbuoti iš nuotekų fosfatų fosforą.

1. Tyrimų metodika

Džiovinto nuotekų dumblo granulės buvo gautos iš Vilniaus nuotekų valyklos, kurioje veikia moderni nuotekų dumblo apdorojimo technologija. Valykloje pirminis ir antrinis nuotekų dumblas sumaišomi, tirštinami, veikiami termohidrolizės, pūdomi, sausinami ir džiovinami. Kasdien nuotekų valykloje susidaro apie 30 tonų džiovinto nuotekų dumblo. Džiovinto nuotekų dumblo granulės buvo atvežtos į VILNIUS TECH Aplinkos apsaugos institutą. Džiovinto nuotekų dumblo granulės (apie 300 g masės) buvo suvyniotos į dvigubą aliuminio folijos sluoksnį. Džiovinto nuotekų dumblo granulių pirolizė buvo atlikta mufelinėje krosnyje

(E5CK-T), ribojant deguonies kiekį ir nenaudojant azoto dujų. Pirolizė truko 2 valandas, nustačius tris skirtingas temperatūras (400±5 °C, 500±5 °C ir 600±5 °C), pagal mokslininkų (Januševičius et al., 2022) metodiką. Kaitinimo greitis buvo 12–13 °C min⁻¹. Po pirolizės dumblas buvo atšaldomas iki kambario temperatūros ir buvo apskaičiuota jo išeiga. Pirolizuotas dumblas buvo susmulkintas grūstuvėliu, persijotas per sietus ir buvo gauta 1,0–1,6 mm dydžio grūdelių frakcija (1 pav.).



1 paveikslas. Pirolizuoto dumblo grūdelių (1,00–1,60 mm frakcijos) paruošimas

VILNIUS TECH Aplinkos apsaugos ir vandens inžinerijos katedros laboratorijoje buvo įrengtas trijų kolonėlių stendas (2 pav.). Stendas sudarytas iš plastikinės 150 l talpyklos (į kurią supilamos valomos nuotekos); siurblio, kuris pakelia nuotekas į paskirstymo filtravimo kolonėlėms vamzdį; paskirstymo ir nuotekų persipylimo vamzdžių; trijų skaidraus stiklo kolonėlių, kurių apačioje yra ventiliai ir filtrato išleidimo žarnelės.



2 paveikslas. Eksperimentinis trijų kolonėlių stendas

Kolonėlių užpildui buvo naudojamos 400 °C, 500 °C ir 600 °C pirolizuoto dumblo granulės, kurių frakcija yra 1,00–1,60 mm. Užpildų parametrai pateikti 1 lentelėje.

1 lentelė. Filtrų užpildų parametrai

Kolonėlės Nr.	Pirolizavimo temperatūra, °C	Frakcija, mm	Tūris, ml	Masė, g
1	400	1,00–1,60	400	208
2	500	1,00–1,60	400	211
3	600	1,00–1,60	400	209

Kiekvienoje kolonėlėje susidarė apie 26 cm aukščio užpildo sluoksnis, kuris, prispaudus tinkleliu, sumažėjo iki 25 cm.

Iš veikiančio individualaus nuotekų valymo įrenginio buvo atsivežta 100±10 litrų nuotekų, jos buvo supiltos į talpyklą (2 pav.). Šios nuotekos jau buvo išvalytos naudojant veiklųjį dumblą. Nuotekų (po biologinio valymo) pagrindiniai užterštumo rodikliai pateikti 2 lentelėje.

Fosfatų fosforo (PO₄-P) koncentracija individualiais nuotekų valymo įrenginiais išvalytose nuotekose labai svyruoja, todėl ji eksperimento tikslais buvo didinama iki didžiausios, kuri pasitaiko realybėje (25–30 mg/l). Fosforo koncentracija tirpale buvo didinama pridant K₂HPO₄ druskos. Ši druska buvo gerai išmaišoma ir ištirpinama: iš pradžių nedideliame nuotekų kiekyje, pasikui visoje nuotekų talpykloje.

Eksperimentas pradėtas įjungus siurblij. Filtravimo per kolonėles greitis buvo nustatomas tūriniu metodu. Pasirinkta, kad nuotekos bus filtruojamos 0,00108 m³/h debitu. Visos kolonėlės buvo vienodo skersmens – 0,045 m. Apskaičiuotas kolonėlių skerspjūvio plotas – 0,0016 m². Pagal 1 formulę buvo apskaičiuotas filtravimo greitis:

$$v = \frac{Q}{A}, \text{ m/h} \quad (1)$$

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

Pagal 2 formulę buvo apskaičiuota fosfatų fosforo (PO₄-P) sulaikymo geba:

$$q_e = \frac{(C_0 - C_i) \times V}{m}, \text{ mg/g} \quad (2)$$

čia C_0 – pradinė PO₄-P koncentracija, mg/l; C_i – kiekvienos kolonėlės filtrato PO₄-P koncentracija, mg/l; V – filtruotų nuotekų tūris, l; m – užpildo masė, g.

Pagal ventilio, esančio filtravimo kolonėlės apačioje, atsivėrimo laipsnį buvo galima reguliuoti filtravimo greitį. Visose kolonėlėse buvo palaikomas vienodas filtravimo greitis – 0,68 m/h. Filtrato mėginiai iš visų trijų kolonėlių buvo imami kas 30 minučių. Mėginiuose buvo matuojama fosfatų fosforo koncentracija. PO₄-P koncentracijai nustatyti buvo naudojamas MERCK Spectroquant® testas. Rezultatų patikimumui užtikrinti koncentracija buvo matuojama po tris kartus, iš jų buvo apskaičiuotos vidutinės vertės.

2. Rezultatai

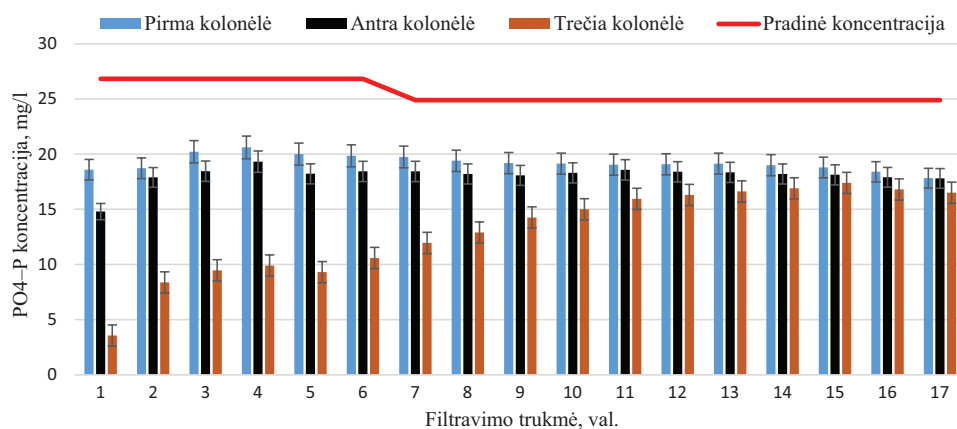
Pradiniai atsivežtų nuotekų užterštumo rodikliai pateikti 2 lentelėje.

2 lentelė. Vidutiniai, pradiniai atsivežtų nuotekų užterštumo rodikliai

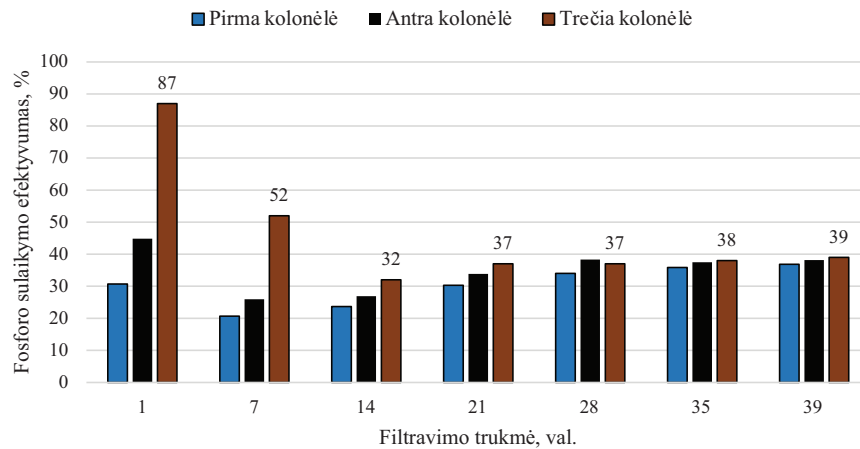
Rodiklis	BDS ₇	SM	NO ₃ -N	NH ₄ -N	PO ₄ -P
Vertė, mg/l	9,6	10,1	5,53	10,64	1,38

Iš 2 lentelėje pateiktų rezultatų matyti, kad biologiniu būdu valytose nuotekose yra nedidelės (~10 mg/l) BDS₇ ir SM koncentracijos, todėl tokias nuotekas galima papildomai valyti filtravimo būdu (Mažeikienė & Šarko, 2022). Taip pat nuotekose yra likutinės momentinės nitratų, amonio azoto ir fosfatų fosforo koncentracijos, iš to galima spręsti, kad azoto ir fosforo junginiai nėra iki galo pašalinti iš nuotekų (2 lentelė).

Supylus nuotekas į talpyklą (2 pav.), fosfatų fosforo koncentracija jose buvo padidinta iki 26,8 mg/l (pridėjus dikalio hidrofosfato druskos). Kolonėlių stende filtravimas vyko 4 dienas (39 valandas), kol buvo išfiltruota 100±10 l nuotekų. Pirmųjų dviejų dienų (17 valandų) rezultatai pateikti 3 paveiksle.



3 paveikslas. Fosfatų fosforo koncentracija trijų kolonėlių filtratuose



4 paveikslas. Užpildų efektyvumas sulaiikyti fosfatų fosforą

Pirmąją dieną eksperimentas truko 6 valandas ir filtruojamų nuotekų pradinė PO_4-P koncentracija buvo 26,8 mg/l. Kitą dieną išmatuota pradinė PO_4-P koncentracija buvo mažesnė – 24,9 mg/l. Visų trijų kolonėlių filtratuose likdavo mažesnė už pradinę PO_4-P koncentracija: iš to galima spręsti, kad kolonėlių užpildai sulaiikydavo fosforą. Iš 3 paveikslo matyti, kad mažiausia fosfatų fosforo koncentracija likdavo trečiosios kolonėlės filtrate. Po valandos filtravimo trečiosios kolonėlės filtrate liko vidutinė 3,6 mg/l fosfatų fosforo koncentracija, kuri buvo 5 kartus mažesnė už koncentraciją pirmosios kolonėlės filtrate (18,6 mg/l) ir 4 kartus mažesnė už koncentraciją antrosios kolonėlės filtrate (14,8). Ilgėjant filtravimo trukmei, per pirmąsias 15 valandų PO_4-P koncentracija trečiosios kolonėlės filtrate didėjo ir 15 valandą pasiekė 17,4 mg/l. Fosforo šalinimo efektyvumas trečiojoje kolonėlėje sumažėjo nuo 87 % iki 32 % (4 pav.).

Iš 4 paveikslo matyti, kad efektyviausiai fosfatų fosforą sulaiikė trečia kolonėlė, kurioje buvo nuotekų dumblas, pirolizuotas 600 °C temperatūroje. Mažiausiai efektyvi buvo pirma kolonėlė, užpildyta 400 °C temperatūroje pirolizuotu nuotekų dumbliu. Iš 4 paveikslė pateiktų rezultatų matyti, kad kolonėlių efektyvumas mažėjo tik pirmą ir antrą dienomis (pirmas

17 filtravimo valandų), kitas dvi tyrimo dienas (17–39 valandos) efektyvumas kito nedaug (didėjo). Eksperimentui baigiantis, visų trijų kolonėlių efektyvumas tebebuvo ne mažesnis kaip 30 %.

Sulaiiktas fosforo kiekis, tenkantis 1 g kolonėlių užpildo, pateiktas 3 lentelėje.

Iš 4 lentelės matyti, kad daugiausia fosforo sulaiikė 600 °C temperatūroje, o mažiausiai – 400 °C temperatūroje pirolizuotas nuotekų dumblas (atitinkamai 1,71 mg/g ir 1,15 mg/g). Lyginant su mokslininkų (Januševičius et al., 2022) gauta pirolizuoto 600 °C temperatūroje dumblo sorbcine geba (0,373 mg/g), šiame tyrime gautas geresnis rezultatas. Tačiau pastebėta, kad visų kolonėlių užpildai sorbavo fosforą tik pirmas dvi dienas, o vėliau ne sorbavo, o tik sulaiikė fosforą kolonėlėse, todėl jo šalinimo efektyvumas buvo panašus visose kolonėlėse, nemažėjo ir siekė >35 % tyrimo pabaigoje. Iš nuotekų dumblo pagaminta (600 °C temperatūroje) bioanglis labai efektyviai sorbavo iš tirpalų Cu(II), buvo pasiekta 146,7 mg/g sorbcijos geba (Xu et al., 2018). 500 °C pirolizuota bioanglis efektyviai šalino iš tirpalų nitratų ir bisfenolį (atitinkamai 99,0 % ir 74,1 % efektyvumu) (Wang et al., 2022). Šiame tyrime pasiektas rezultatas nėra toks aukštas, tačiau dauguma sorbcijos iš tirpalų tyrimų atlikta esant didelėms pradinėms teršalų koncentracijoms (šimtai ir tūkstančiai mg/l), dėl to gaunama didesnė geba. Pažymėtina, kad šiame straipsnyje aprašyti tyrimai atlikti esant nedidelėms pradinėms PO_4-P koncentracijoms (24–25 mg/l), kurios atitinka realias sąlygas, o filtravimas vyko 0,675 m/h greičiu. Pasak mokslininkų (Phoungthong et al., 2018; Zhou et al., 2017), sorbcijai panaudotas pirolizuotas nuotekų dumblas gali būti naudingas dirvožemiui gerinti. Patekęs į dirvą, jis gerina dirvožemio tekstūrą ir lėtina maistingų medžiagų išsiskyrimą iš dirvožemio.

3 lentelė. Užpildų geba šalinti iš nuotekų PO_4-P

Kolonėlės Nr.	Užpildai	PO_4-P		
		C_0 , mg/l	C_p , mg/l	q_e , mg/g
1	400 °C pirolizuotas dumblas	25	17,79	1,15
2	500 °C pirolizuotas dumblas	25	16,95	1,27
3	600 °C pirolizuotas dumblas	25	14,33	1,71

Išvados

1. Piroлізуoto 400 °C, 500 °C ir 600 °C temperatūroje nuotekų dumblo kolonėlių užpildai mažino PO₄-P koncentraciją valomose nuotekose, filtruojant jas 0,675 m/h greičiu.
2. Praėjus 1 valandai nuo filtravimo pradžios per 600 °C temperatūroje pirolizuoto nuotekų dumblo užpildą, filtrate liko vidutinė 3,6 mg/l PO₄-P koncentracija, o fosforo šalinimo iš nuotekų efektyvumas siekė 87 %.
3. Nuotekų dumblo geba sulaikyti PO₄-P priklausė nuo to, kokioje temperatūroje (400 °C, 500 °C ar 600 °C) jis buvo pirolizuotas: per tą patį filtravimo laiką (39 valandas) pirmosios kolonėlės užpildas (400 °C temperatūroje pirolizuotas nuotekų dumblas) sulaikė 1,15 mg/g PO₄-P, kai trečiosios kolonėlės užpildas (600 °C temperatūroje pirolizuotas nuotekų dumblas) sulaikė 1,71 mg/g PO₄-P.

Padėka

Autoriai dėkoja Lietuvos mokslų tarybai už finansinę paramą: straipsnis parašytas vykdant projektą „Tvarti nuotekų valymo technologija aplinkai nekenksmingais modifikuotais natūraliais sorbentais azotui, fosforui ir paviršinio aktyvumo medžiagoms pašalinti“ pagal finansavimo sutartį Nr. S-LU-22-1.

Literatūra

- Agani, I. C., Suanon, F., Dimon, B., Ifon, E. B., Yovo, F., Wotto, V. D., Abass, O. K., & Kumwimba, M. N. (2017). Enhancement of fecal sludge conversion into biogas using iron powder during anaerobic digestion process. *American Journal of Environmental Protection*, 5(6), 179–186. <https://doi.org/10.11648/j.ajep.20160506.15>
- 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>
- Chen, T., Zhang, Y., Wang, H., Lu, W., Zhou, Z., Zhang, Y., & Ren, L. (2014). Influence of pyrolysis temperature on characteristics and heavy metal adsorptive performance of biochar derived from municipal sewage sludge. *Bioresource Technology*, 164, 47–54. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2014.04.048>
- Dauknys, R., Mažeikienė, A., & Paliulis, D. (2020). Effect of ultrasound and high voltage disintegration on sludge digestion process. *Journal of Environmental Management*, 270, 110833. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.110833>
- Duan, X. Y., Cao, Y., Liu, T. Z., Li, L., Wang, B., & Wang, X. D. (2020). Nutrient stability and sorption of sewage sludge biochar prepared from co-pyrolysis of sewage sludge and stalks / mineral materials. *Environmental Pollutants and Bioavailability*, 32(1), 12–18. <https://doi.org/10.1080/26395940.2019.1710259>

- Enaime, G., Baçaoui, A., Yaacoubi, A., & Lübken, M. (2020). Biochar for wastewater treatment—conversion technologies and applications. *Applied Sciences*, 10(10), 3492. <https://doi.org/10.3390/app10103492>
- Filer, J., Ding, H. H., & Chang, S. (2019). Biochemical methane potential (BMP) assay method for anaerobic digestion research. *Water*, 11(5), 921. <https://doi.org/10.3390/w11050921>
- Hossain, M. K., Strezov, V., Chan, K. Y., Ziolkowski, A., & Nelson, P. F. (2011). Influence of pyrolysis temperature on production and nutrient properties of wastewater sludge biochar. *Journal of Environmental Management*, 92(1), 223–228. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2010.09.008>
- Ignace, A. C., Fidèle, S., Dimon, B., Franck, Y., Lyde, T. A. S., Daouda, M., & Eni, A. C. (2016). Biogas recovery from sewage sludge during anaerobic digestion process: Effect of iron powder on methane yield. *International Research Journal of Environmental Sciences*, 5(1), 7–12.
- Younas, F., Mustafa, A., Farooqi, Z. U. R., Wang, X., Younas, S., Mohy-Ud-Din, W., Ashir Hameed, M., Mohsin Abrar, M., Maitlo, A. A., Noreen, S., & Hussain, M. M. (2021). Current and emerging adsorbent technologies for wastewater treatment: Trends, limitations, and environmental implications. *Water*, 13(2), 215. <https://doi.org/10.3390/w13020215>
- Januševičius, T., Mažeikienė, A., Danila, V., & Paliulis, D. (2022). The characteristics of sewage sludge pellet biochar prepared using two different pyrolysis methods. *Biomass Conversion and Biorefinery*. <https://doi.org/10.1007/s13399-021-02295-y>
- Jiang, Y. H., Li, A. Y., Deng, H., Ye, C. H., Wu, Y. Q., Linmu, Y. D., & Hang, H. L. (2019). Characteristics of nitrogen and phosphorus adsorption by Mg-loaded biochar from different feedstocks. *Bioresource Technology*, 276, 183–189. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2018.12.079>
- Khanmohammadi, Z., Afyuni, M., & Mosaddeghi, M. R. (2015). Effect of pyrolysis temperature on chemical and physical properties of sewage sludge biochar. *Waste Management & Research: The Journal for a Sustainable Circular Economy*, 33(3), 275–283. <https://doi.org/10.1177/0734242X14565210>
- Kim, J., Park, C., Kim, T.-H., Lee, M., Kim, S., Kim, S.-W., & Lee, J. (2003). Effects of various pretreatments for enhanced anaerobic digestion with waste activated sludge. *Journal of Bioscience and Bioengineering*, 95(3), 271–275. [https://doi.org/10.1016/S1389-1723\(03\)80028-2](https://doi.org/10.1016/S1389-1723(03)80028-2)
- Latif, M. A., Mehta, C. M., & Batstone, D. J. (2017). Influence of low pH on continuous anaerobic digestion of waste activated sludge. *Water Research*, 113, 42–49. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2017.02.002>
- Liew, C. S., Kiatkittipong, W., Lim, J. W., Lam, M. K., Ho, Y. C., Ho, C. D., Ntwampe, S. K. O., Mohamad, M., & Usman, A. (2021). Stabilization of heavy metals loaded sewage sludge: Reviewing conventional to state-of-the-art thermal treatments in achieving energy sustainability. *Chemosphere*, 277, 130310. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.130310>
- Mažeikienė, A., & Šarko, J. (2022). Removal of nitrogen and phosphorus from wastewater using layered filter media. *Sustainability*, 14(17), 10713. <https://doi.org/10.3390/su141710713>
- Metcalf & Eddy Inc., Tchobanoglous, G., Burton, F. L., Tsuchihashi, R., & Stensel, H. D. (2013). *Wastewater engineering: Treatment and resource recovery*. McGraw Hill.

- Phoungthong, K., Zhang, H., Shao, L. M., & He, P. J. (2018). Leaching characteristics and phytotoxic effects of sewage sludge biochar. *Journal of Material Cycles and Waste Management*, 20(4), 2089–2099. <https://doi.org/10.1007/s10163-018-0763-0>
- Poikane, S., Kelly, M. G., Salas Herrero, F., Pitt, J. A., Jarvie, H. P., Claussen, U., Leujak, W., Lyche Solheim, A., Teixeira, H., & Phillips, G. (2019). Nutrient criteria for surface waters under the European Water Framework Directive: Current state-of-the-art, challenges and future outlook. *Science of the Total Environment*, 695, 133888. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.133888>
- Rio, S., Faur-Brasquet, C., Le Coq, L., & Le Cloirec, P. (2005). Structure characterization and adsorption properties of pyrolyzed sewage sludge. *Environmental Science & Technology*, 39(11), 4249–4257. <https://doi.org/10.1021/es0497532>
- Tyagi, V. K., & Lo, S. L. (2011). Application of physico-chemical pretreatment methods to enhance the sludge disintegration and subsequent anaerobic digestion: An up to date review. *Reviews in Environmental Science and Bio/Technology*, 10(3), 215–242. <https://doi.org/10.1007/s11157-011-9244-9>
- Vongvichiankul, C., Deebao, J., & Khongnakorn, W. (2017). Relationship between pH, Oxidation reduction potential (ORP) and Biogas production in mesophilic screw anaerobic digester. *Energy Procedia*, 138, 877–882. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.10.113>
- Wang, L., Zhao, Y., Li, Y., Yao, B., Zhang, C., Zhang, W., Niu, L., & Zhang, H. (2022). Fe-loaded biochar facilitates simultaneous bisphenol A biodegradation and efficient nitrate reduction: Physicochemical properties and biological mechanism. *Journal of Cleaner Production*, 372, 133814. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.133814>
- Xu, Q., Tang, S., Wang, J., & Ko, J. H. (2018). Pyrolysis kinetics of sewage sludge and its biochar characteristics. *Process Safety and Environmental Protection*, 115, 49–56. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2017.10.014>
- Zhou, D., Liu, D., Gao, F., Li, M., & Luo, X. (2017). Effects of biochar-derived sewage sludge on heavy metal adsorption and immobilization in soils. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 14(7), 681. <https://doi.org/10.3390/ijerph14070681>
- Zhu, Y., Zhao, Q., Li, D., Li, J., & Guo, W. (2022). Performance comparison of phosphorus recovery from different sludges in sewage treatment plants through pyrolysis. *Journal of Cleaner Production*, 372, 133728. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.133728>
- Zielińska, A., & Oleszczuk, P. (2015). Evaluation of sewage sludge and slow pyrolyzed sewage sludge-derived biochar for adsorption of phenanthrene and pyrene. *Bioresource Technology*, 192, 618–626. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2015.06.032>

RESEARCH ON THE ABILITY OF PYROLYZED WASTEWATER TREATMENT SLUDGE TO REMOVE PHOSPHATES FROM WASTEWATER

A. VILČIAUSKAITĖ, J. ŠARKO,
A. MAŽEIKIENĖ

Abstract. One of the most important goals of wastewater treatment and surface water management is to reduce the level of phosphorus concentration in water and thus prevent eutrophication. The work deals with the issues of phosphorus removal from wastewater. Phosphorus was removed from the wastewater by filtering through sludge from the wastewater treatment plant pyrolyzed at temperatures of 400 °C, 500 °C, 600 °C. The research was conducted under laboratory conditions, using an experimental stand with three filtration columns. The third column, which was filled with sludge pyrolyzed at a temperature of 600 °C, retained the phosphate phosphorus most effectively. At the beginning of filtration, its phosphorus removal efficiency reached 87%. Other columns were less efficient at the beginning of the experiment: their efficiency in removing phosphorus from wastewater was 31–45%.

Keywords: wastewater, sludge, pyrolysis, filtration, phosphorus, removal, efficiency.