

Environmental engineering Aplinkos inžinerija

SKIRTINGŲ ADSORBENTŲ, CELIULIOZĖS AEROGELIO, DEVULKANIZUOTOS GUMOS GRANULIŲ IR PIROLIZUOTŲ NUOTEKŲ DUMBLO GRANULIŲ NAUDOJIMO DAŽIKLIAMS ŠALINTI IŠ UŽTERŠTO VANDENS Palyginimas

Monika LIUGĖ *, Dainius PALIULIS 

Vilniaus Gedimino technikos universitetas, Vilnius, Lietuva

Gauta 2023 m. birželio 21 d.; priimta 2023 m. liepos 3 d.

Santrauka. Tekstilės pramonėje naudojamų dažiklių pateikimas į gamtinę aplinką kelia nepageidaujamą neigiamą poveikį dėl dažiklių kancerogeninių, mutageninių ar net teratogeninių savybių. Remiantis chemine sudėtimi dažikliai yra skirstomi į anijoninius, katijoninius ir nejoninius dažiklius. Šiame darbe buvo tirtas fizikinis gamybinių nuotekų valymo būdas – adsorbicija. Tai metodas, kurio metu yra naudojamos įvairios prigimties medžiagos, vadinamos sorbentais. Adsorbicijos procese naudojamos medžiagos turėtų būti netoksiškos, draugiškos aplinkai, pigios, jų naudojimas neturėtų sukelti antrinės taršos. Eksperimentiniuose tyrimuose naudojamų iš atliekų pagamintų sorbentų, kuriuos adsorbicijos procese galima panaudoti net kelis kartus, idėja skatina tvarų išteklių naudojimą. Tyrime palyginti skirtingi sorbentai: iš popieriaus susintetintas aerogelis, devulkanizuotos gumos granulės ir nuotekų dumblo granulės. Nustatyta, jog aukščiausiomis adsorbicijos efektyvumo vertėmis pasižymėjo nuotekų dumblo granulės, kurios buvo pirolizuotos 500 °C temperatūroje. Naudojant 500 °C pirolizės nuotekų dumblo granulės adsorbicijos efektyvumas siekė 28,14–53,73 %. Žemiausiomis adsorbicijos efektyvumo vertėmis pasižymėjo iš devulkanizuotos automobilių padangų gumos pagamintos granulės: adsorbicijos efektyvumo vertė siekė 12,92 %. Iš popieriaus atliekų susintetinto aerogelio adsorbicijos efektyvumo vertės svyravo 28,21–38,07 % intervale.

Reikšminiai žodžiai: adsorbicija, aerogelis, dažikliai, devulkanizuotos gumos granulės, nuotekų dumblas, tekstilės.

Įvadas

Vandens tarša yra viena rimčiausių problemų visame pasaulyje, kuri trikdo ne tik vandens tiekimą, bet taip pat kelia pavojų visuomenės sveikatai (Kishor et al., 2021). Tarp teršalų, kurie gali būti aptinkami vandenyje, randami sunkieji metalai, naftos produktai, dažikliai bei kiti cheminiai junginiai (Wei et al., 2020).

Dažiklių išsiskyrimas į natūralius vandens telkinius sudaro tik nedidelę vandens taršos dalį, tačiau jų buvimas vandenyje, net ir esant labai mažoms jų koncentracijoms, yra matomas ir nepageidaujamas reiškinys (Ardila-Leal et al., 2021). Dažikliai yra plačiai naudojami įvairiose pramonės šakose: tekstilės, odos apdirbimo, popieriaus spausdinimo, kosmetikos, farmacijos ir maisto (Azanaw et al., 2022). Apskaičiuota, kad daugiau nei 700 tūkst. tonų apie 10 000 įvairių rūšių dažiklių yra pagaminami kasmet visame pasaulyje (Chandanshive et al., 2020). Dauguma jų yra sintetinės kilmės ir gali sukelti neigiamą poveikį

(teratogeninį, mutageninį ir kancerogeninį) tiek vandens organizmams, tiek žmonėms (Islam et al., 2018). Dažikliai daugiausia yra naudojami tekstilės pramonėje, paprastai jie skirstomi į anijoninius (rūgštinius), katijoninius (bazinius) ir nejoninius (dispersinius) dažiklius (Ardila-Leal et al., 2021). Dažant audinius dažnai būna sunku užfiksuoti dažiklius audinyje (dėl jų gero tirpumo vandenyje), dėl to susidaro didelis kiekis nuotekų, kuriose susikaupia dideli kiekiai šios klasės organinių junginių (Wei et al., 2020).

Spalvos pašalinimas iš nuotekų yra vienas iš būtinų valymo procesų. Išskiriami keli fiziniai, cheminiai ir biologiniai nuotekų valymo būdai (Samsami et al., 2020). Tarp daugybės dažų pašalinimo iš nuotekų metodų adsorbicija ir biologinis apdorojimas yra plačiai taikomi metodai (Musa & Idrus, 2021).

Viena iš perspektyviausių adsorbicijoje naudojamų medžiagų – aerogeliai (Paulauskiene et al., 2021). Tai kietos agregatinės būsenos medžiaga, pasižyminti porėta struktūra ir itin mažu tankiu (Wu et al., 2008). Aerogeliai

*Autorius susirašinėti. El. paštas monika.liuge@vilniustech.lt

ruošiami skystą šlapio gelio fazę pakeičiant dujomis. Šiems sorbentams būdingas didelis savitasis paviršiaus plotas, geros mechaninės savybės, didelis cheminis stabilumas bei didelis elektros laidumas (Paulauskiene et al., 2021). Gausiausias atsinaujinantis išteklius Žemėje yra lignoceliuliozės biomasė (Yang et al., 2021). Didėjantis pasaulio gyventojų skaičius lėmė didėjantį šios medžiagos panaudojimo kiekį (Pacurariu et al., 2021). Lignoceliuliozės medžiagos, ypač celiuliozė, tradiciškai yra naudojamos tekstilės ir popieriaus gamyboje (Thai et al., 2020). Pastaruoju metu celiuliozės panaudojimo potencialas išaugo: celiuliozė yra naudojama kaip priedas ir klampumo modifikatorius maisto produktuose, kosmetikos bei farmacijos pramonėje (Irdemez et al., 2022).

Automobilių padangos dažniausiai yra šalinamos jas sudeginant arba kaupiant sąvartynuose (Ali et al., 2022). Atliekų prevencija ar pakartotinis atliekų panaudojimas galėtų padėti sumažinti išmetamą šiltnamio efektą sukeliančių dujų kiekį, skatintų patvarių bei pažangių žaliavų ar produktų gamybą (Liugė ir Paliulis, 2022).

Padangų atliekos pradėtos naudoti kaip priedas kelių, žaidimų aikštelių dangų, guminių stogų ar drenažo sistemų gamyboje. Maždaug 32 % padangų atliekų masės daugiausia sudaro suodžiai (Ali et al., 2022). Pastaruoju metu padangų gumą pradėta naudoti pavojingų medžiagų adsorbacijai iš nuotekų.

Nuotekų dumblas yra likutinė, pusiau kieta medžiaga, kuri susidaro kaip šalutinis produktas valant pramonines ar komunalines nuotekas. Paprastai tai yra organinių medžiagų, susidarančių iš žmonių atliekų, maisto atliekų dalelių, mikroorganizmų ir neorganinių kietųjų dalelių iš mūsų naudojamų produktų ir vaistų, vandens, surišto su šiomis medžiagomis, mišinys (Šarko et al., 2022).

Dauguma nuotekų dumblo apdorojama įvairiais pūdyimo būdais, kurių tikslas – sumažinti kietose medžiagose esančių organinių medžiagų ir ligas sukeliančių mikroorganizmų skaičių (Januševičius et al., 2022). Dažniausiai nuotekų dumblas yra apdorojamas taikant anaerobinį ir aerobinį skaidymus ir kompostavimą (Januševičius et al., 2022).

Vilniaus nuotekų valykloje susidaro apie 20–25 % viso Lietuvos nuotekų dumblo, iš kurio per metus išgaunama maždaug 30 tūkst. tonų sausinto dumblo (Januševičius et al., 2022). Džiovintas dumblas fasuojamas ir laikinai sandėliuojamas valyklos teritorijoje.

1. Tyrimo objektas

Naftolis žaliasis B (rūgštinis dažiklis) – tai vienas dažniausiai pasitaikančių dažiklių, naudojamų tekstilės pramonėje. Naftolis žaliasis B yra koordinacinis geležies kompleksas, naudojamas kaip dažiklis (Gunasundari et al., 2020).

Darbo tikslas – išanalizuoti skirtingų sorbentų: iš automobilių padangų gumos pagamintos devulkanizuotos gumos granulių, iš popieriaus atliekų susintetinto sorbento ir pirolizuotų nuotekų dumblo granulių panaudojimo galimybes valant vandeninius tirpalus nuo dažiklio naftolio žaliojo B.

2. Tyrimo eiga ir metodika

Šiame darbe palygintos anksčiau tyrimuose naudotų devulkanizuotų gumos granulių bei iš popieriaus atliekų susintetinto adsorbento, aerogelio, adsorbicinės gebos vertės su pirolizuotomis nuotekų dumblo granulėmis adsorbicinės gebos vertėmis šalinant naftolio žaliojo B dažiklį iš dirbtinai užteršto vandens.

2022 m. Liugės, Paliulio ir Šerevičienės eksperimentiniai tyrimai buvo atlikti naudojant iš popieriaus atliekų susintetintą adsorbentą – aerogelį. Dažiklio naftolio žaliojo B adsorbicijos eksperimentiniai tyrimai buvo atlikti 21–25 °C temperatūroje. Eksperimentinis adsorbicijos tyrimas buvo atliktas siaurame pH verčių diapazone nuo 6,0 iki 7,0. Dažiklio naftolio žaliojo B koncentracija vandeniniuose tirpaluose siekė 100 mg/l. Likutinė dažiklio koncentracija buvo nustatyta po 5 min., 10 min., 30 min., 60 min., 120 min., 180 min. ir 240 min. Tikslios tyrimo naudotų tirpalų savybės yra pateiktos 1 lentelėje.

1 lentelė. Tyrimo su iš popieriaus atliekų susintetinto adsorbento naudotų mėginių apibūdinimas
Table 1. Characteristics of samples with adsorbent synthesized from paper waste

Eil. Nr.	Aerogelio kiekis, g	Dažiklio koncentracija, mg/l
1.	0,4	100
2.	0,8	
3.	2,0	

Iš popieriaus atliekų susintetintas aerogelis priminė disko formos kempinę. Kiekvieno sorbento disko spindulys buvo vienodas, spindulys – 2,5 cm; aukštis – 1,0 cm. Naudojant Shimadzu TOC bendrosios anglies analizatorių buvo nustatytas likutinis ištirpusios anglies kiekis vandeniniuose tirpaluose po adsorbicijos proceso. Tai greitas ir patikimas metodas, skirtas sekti organinių medžiagų, ištirpusių vandenyje, koncentraciją naudojant anglį kaip indikatorius (Liugė ir Paliulis, 2022).

2022 m. Liugės ir Paliulio atliktame tyrimo su automobilių padangų devulkanizuotos gumos granulėmis buvo naudota 1–2 mm dydžio gumos granulių frakcija, kuri buvo atskirta naudojant metalinius sietus. Pasirinktos mažesnio dydžio gumos granulės, kadangi jos pasižymi didesniu savituoju paviršiaus plotu, kuris turėtų padidinti adsorbicijos efektyvumo vertes: kuo paviršiaus plotas yra didesnis, tuo adsorbicijos procesas gali vykti intensyviau (Liugė ir Paliulis, 2022). Devulkanizuotos gumos granulės prieš eksperimentinį tyrimą nebuvo plautos su dejonizuotu vandeniu taip priartinant gumos granulių paruošimo adsorbicijai procesą galimam jų panaudojimui pramoniniu mastu.

Dažiklio adsorbicijos procesas trimitas 60 min. nuolat maišant magnetine maišykle vandeninius dažiklio tirpalus su gumos granulių mėginiais.

Tyrimo naudotas devulkanizuotos gumos granulių kiekis svyravo nuo 5 g iki 100 g. Dažiklio naftolio žaliojo B

koncentracija vandeniniuose tirpaluose – 100 mg/l. Konkretus tyrimo naudotų tirpalų apibūdinimas yra pateiktas 2 lentelėje.

2 lentelė. Tyrimo su devulkanizuotomis gumos granulėmis naudotų mėginių apibūdinimas

Table 2. Characteristics for samples with devulcanized rubber granules

Eil. Nr.	Devulkanizuotos gumos kiekis, g	Dažiklio koncentracija, mg/l
1.	5	0
2.	0	
3.	5	100
4.	10	
5.	50	
6.	100	

Adsorbcijos procesas po 60 min. nutrauktas atskyrus devulkanizuotas gumos granules nuo paruošto naftolio žaliojo B dažiklio vandeninio tirpalo filtruojant jį pro popierinį „VWR Qualitative filter paper 413“ filtrą. Atskirtos gumos granulės nebuvo pakartotinai panaudotos tolesniuose tyrimo etapuose (Liugė ir Paliulis, 2022).

Ekperimentiniame tyrimo buvo panaudotos nuotekų dumblo granulės. Remiantis literatūros apžvalga, atliekomis laikomos granulės yra poringa medžiaga, kuri yra potencialus sorbentas. Adsorbcijos tyrimo buvo naudotos

3 lentelė. Tyrimo su pirolizuoto nuotekų dumblo granulėmis naudotų mėginių apibūdinimas

Table 3. Characteristics for samples with pyrolyzed sewage sludge granules

Eil. Nr.	Pirolizuoto nuotekų dumblo granulių kiekis, g	Pirolizuoto nuotekų dumblo granulių apdorojimo temperatūra, °C	Dažiklio koncentracija, mg/l
1.	5	300	0
2.	5		100
3.	10		
4.	50		
5.	10		
6.	5	400	0
7.	5		100
8.	10		
9.	50		
10.	10		
11.	5	500	0
12.	5		100
13.	10		
14.	50		
15.	10		

3 rūšių nuotekų dumblo granulės: granulės pirolizuotos 300 °C, 400 °C ir 500 °C temperatūroje. Ekperimentinis tyrimas vykdytas tokia pačia pH intervale kaip ir prieš tai aprašyti tyrimai: pH vertės svyravo 6,0–7,0 intervale. Tyrimo naudotas naftolio žaliojo B dažiklis. Dažiklio koncentracija dirbtinai užterštuose vandeniniuose tirpaluose siekė 100 mg/l. Pasirinktas 60 min. adsorbcijos laikas. Dažiklio adsorbcijos ekperimentiniai tyrimai buvo atlikti 21–25 °C temperatūroje. Tikslus tyrimo naudotų mėginių apibūdinimas yra pateiktas 3 lentelėje.

Pirolizuotos nuotekų dumblo granulės buvo gautos iš Vilniaus miesto nuotekų valyklos. Pirolizuoto nuotekų dumblo granulių drėgnis siekė 4,2±0,1 %.

Pirolizė buvo vykdoma mufelinėje krosnyje. 300 g pirolizuoto nuotekų dumblo granulių buvo suvyniota į dvigubą aliuminio folijos sluoksnį ir perkelta į mufelinę krosnį (E5CK-T). Pirolizė buvo atlikta ribotomis O₂ sąlygomis, nenaudojant azoto dujų. Pirolizė truko 2 valandas esant trimis skirtingoms temperatūroms (300±5 °C, 400±5 °C, 500±5 °C).

3. Rezultatai

Adsorbcijos proceso metu, naudojant pirolizuoto nuotekų dumblo granules, pastebėta, jog geriausiomis sorbcinėmis savybėmis pasižymėjo pirolizuoto nuotekų dumblo granulių mėginiai, kurie buvo pirolizuoti esant 500 °C. 4 lentelėje yra pateiktos tikslios likutinės anglies koncentracijos vertės po adsorbcijos proceso. Pradinė organinės anglies koncentracija tirtuose mėginiuose buvo 41 mg/l.

Pastebėta, jog didėjant nuotekų dumblo granulių kiekiui tirpaluose likutinis organinės anglies kiekis mėginiuose taip

4 lentelė. Organinės anglies koncentracija mėginiuose po adsorbcijos proceso naudojant pirolizuoto nuotekų dumblo granules

Table 4. Concentration of organic carbon content in the samples after adsorption process with pyrolyzed sewage sludge granules

Eil. Nr.	C, mg/l
1.	9,14
2.	39,74
3.	38,35
4.	47,25
5.	55,59
6.	14,91
7.	38,74
8.	47,77
9.	96,11
10.	141,4
11.	2,70
12.	29,46
13.	25,65
14.	18,97
15.	24,26

pat didėjo: mėginiai buvo maišomi 1000 ml talpos induose; esant didesniai nuotekų dumblo granulių kiekiui, dažiklio naftolio žaliojo B tirpalas sunkiai tapo vienalytis. Mėginiuose Nr. 1, Nr. 6 ir Nr. 11 nuotekų dumblo granulių kiekis buvo vienodas – 5 g; dažiklio koncentracija buvo lygi 0 mg/l. Nors granulių kiekis buvo identiškas, tačiau skirtingose temperatūrose apdorotos nuotekų dumblo granulės vandeniniuose tirpaluose aptirpo nevienodai: didžiausias organinės anglies kiekis fiksuotas mėginyje Nr. 6 (400 °C pirolizė).

Naudojant 300 °C pirolizės nuotekų dumblo granules adsorbcijos efektyvumas siekė tik 3,07–6,46 %. Naftolio žaliojo B tirpalą maišant su 50 g ir 100 g nuotekų dumblo granulių likutinė organinės anglies koncentracijos vertė išaugo: ji viršijo pradinę 41,0 mg/l anglies koncentraciją. Galima daryti prielaidą, jog adsorbcijos procese siekiant naudoti didesnius nuotekų dumblo granulių kiekius reikėtų didinti maišymo indų talpas arba didinti maišymo trukmę. 400 °C pirolizės nuotekų dumblo granulių adsorbcijos efektyvumas buvo lygus 5,51 %, tačiau tik mėginyje Nr. 7.

Kita vertus, naudojant 500 °C pirolizės nuotekų dumblo granules, adsorbcijos efektyvumas siekė net 28,14–53,73 %.

Po adsorbcijos proceso visuose mėginiuose pasikeitė pradinė pH vertė: tirpaluose, kuriuose buvo naudotos 300 °C pirolizės nuotekų dumblo granulės, pH vertės pakilo iki 7,7–8,1. Esant 400 °C nuotekų dumblo granulių pH vertės išaugo iki 7,7–7,8, o esant 500 °C pH vertės pakito iki 7,8–8,1. Spėjama, jog išsiplovusios nuotekų dumblo granulės galėjo lemti pH verčių pasikeitimą – po adsorbcijos proceso dirbtinai užteršto vandens mėginiai pašarmėjo.

Dažiklio naftolio žaliojo B spalva nebuvo iki galo pašalinta nė viename mėginyje: didinant nuotekų dumblo granulių kiekį spalvos intensyvumas mažėjo, tačiau neišnyko.

5 lentelėje yra pateiktos likutinės anglies kiekio vertės atlikus tyrimą su devulkanizuotos gumos granulėmis. Pradinė organinės anglies koncentracija prieš adsorbcijos procesą siekė 4,1 mg/l.

Pastebėta, jog po 60 min. trukusio adsorbcijos proceso paskutiniuose mėginiuose anglies koncentracija smarkiai išaugo: padidėjusį anglies kiekį galėjo lemti anglies jungi-

5 lentelė. Organinės anglies koncentracija mėginiuose po adsorbcijos proceso naudojant devulkanizuotos gumos granules

Table 5. Concentration of organic carbon content in the samples after adsorption process with devulcanized rubber granules

Eil. Nr.	C, mg/l
1.	2,92
2.	1,16
3.	3,57
4.	4,96
5.	12,01
6.	34,58

nių išsiplovimas iš devulkanizuotos gumos granulių. Anglies koncentracijos padidėjimą taip pat galėjo lemti anglies koncentracijos nusėdusios pašalinės medžiagos. Mėginyje Nr. 3, kuriame gumos granulių kiekis buvo 5 g, adsorbcijos efektyvumo vertė siekė 12,92 %.

Dažiklio naftolio žaliojo B spalva nebuvo pašalinta ir adsorbcijos tyrime su devulkanizuotos gumos granulėmis. Pastebėtas tik neryškus spalvos intensyvumo sumažėjimas didinant adsorbento kiekį mėginiuose.

6 lentelėje pateiktos likutinės organinės anglies koncentracijos vertės atlikus tyrimą su iš popieriaus atliekų susintetintu adsorbentu. Pradinė organinės anglies koncentracija prieš adsorbcijos procesą siekė 41,0 mg/l. Kadangi eksperimentiniai tyrimai su nuotekų dumblo ir devulkanizuotos gumos granulėmis buvo vykdyti tik 60 min., nuspręsta palyginti rezultatus tik su po valandos trukmės fiksuotomis organinės anglies koncentracijos vertėmis vykdant tyrimą su iš popieriaus atliekų susintetintu adsorbentu.

6 lentelė. Organinės anglies koncentracija mėginiuose po adsorbcijos proceso naudojant aerogelį

Table 6. Concentration of organic carbon content in the samples after adsorption process with aerogel

Eil. Nr.	C, mg/l
1.	29,43
2.	28,70
3.	25,39

Apskaičiuota, jog po 60 min. trukusio adsorbcijos proceso buvo pasiektos 28,21–38,07 % adsorbcijos efektyvumo vertės. Didėjant aerogelio kiekiui, didėjo ir dažiklio naftolio žaliojo B adsorbcijos efektyvumo vertė.

Viso tyrimo metu dažiklio naftolio žaliojo B spalva nebuvo pašalinta.

Visais minėtais atvejais eksperimentiniuose tyrimuose su pirolizuoto nuotekų dumblo granulėmis, devulkanizuotos gumos granulėmis bei iš popieriaus atliekų susintetintu aerogeliu adsorbcijos efektyvumo vertės nebuvo didelės: naudojant 500 °C pirolizės nuotekų dumblo granules adsorbcijos efektyvumas siekė 28,14–53,73 %; žemiausiomis adsorbcijos efektyvumo vertėmis pasižymėjo iš devulkanizuotos automobilių padangų gumos pagamintos granulės: adsorbcijos efektyvumo vertė siekė 12,92 %; iš popieriaus atliekų susintetintu aerogelio adsorbcijos efektyvumo vertės svyravo 28,21–38,07 % intervale.

Išvados

1. Iš popieriaus atliekų susintetintas aerogelis, iš devulkanizuotos automobilių padangų gumos pagamintos granulės bei nuotekų valyklose susidaręs nuotekų dumblas, vėliau jį pirolizavus, gali būti naudojami tekstilės pramonėje naudojamo dažiklio naftolio žaliojo B šalinimui iš dirbtinai užteršto vandens.
2. Atlikus eksperimentinį tyrimą su pirolizuoto nuotekų dumblo granulėmis nustatyta, jog aukščiausiomis

adsorbcijos efektyvumo vertėmis pasižymėjo nuotekų dumblo granulės, pirolizuotos esant 500 °C. Naudojant 500 °C pirolizės nuotekų dumblo granules adsorbcijos efektyvumas siekė net 28,14–53,73 %. Po adsorbcijos proceso visuose mėginiuose su nuotekų dumblo pasikeitė pradinė pH vertė: tirpaluose, kuriuose buvo panaudotos 300 °C pirolizės nuotekų dumblo granulės, pH vertės pakilo iki 7,7–8,1; esant 400 °C nuotekų dumblo granulių pH vertės išaugo iki 7,7–7,8, o esant 500 °C pH vertės pakito iki 7,8–8,1. Manoma, kad išsiplovusios nuotekų dumblo granulės galėjo lemti pH verčių pasikeitimą – po adsorbcijos proceso dirbtinai užteršto vandens mėginiai pašarmėjo.

3. Žemiausiomis adsorbcijos efektyvumo vertėmis pasižymėjo iš devulkanizuotos automobilių padangų gumos pagamintos granulės: mėginyje, kuriame granulių kiekis buvo 5 g, adsorbcijos efektyvumo vertė siekė 12,92 %. Dažiklio naftolio žaliojo B spalvos nepavyko pašalinti nei su devulkanizuotos gumos ar nuotekų dumblo granulėmis, nei su aerogeliu. Pastebėtas tik neryškus spalvos intensyvumo sumažėjimas didinant adsorbento kiekį mėginiuose. Iš popieriaus atliekų susintetinto aerogelio adsorbcijos efektyvumo vertės siekė 28,21–38,07 %.
4. Tikimasi, jog tyrimuose panaudotos antrinės žaliavos galėtų būti pakartotinai panaudotos adsorbcijos procese. Ateityje planuojama patikrinti šią hipotezę.

Padėka

Straipsnio autoriai dėkoja universiteto kolegoms už bendradarbiavimą.

Literatūra

- Ali, U. F. M., Hussin, F., Gopinath, S. C. B., Aroua, M. K., Khamidun, M. H., Jusoh, N., Ibrahim, N., & Ahmad, S. F. K. (2022). Advancement in recycling waste tire activated carbon to potential adsorbents. *Journal of Environmental Engineering Research*, 27(6), 210452. <https://doi.org/10.4491/eer.2021.452>
- Ardila-Leal, L. D., Poutou-Piñales, R. A., Pedroza-Rodriguez, A. M., & Queve-do-Hidalgo, B. E. (2021). A brief history of colour, the environmental impact of synthetic dyes and removal by using laccases. *Journal of Molecules*, 26(13), 5–7. <https://doi.org/10.3390/molecules26133813>
- Azanaw, A., Birlie, B., Teshome, B., & Jemberie, M. (2022). Textile effluent treatment methods and eco-friendly resolution of textile wastewater. *Case Studies in Chemical and Environmental Engineering*, 6, 100230. <https://doi.org/10.1016/j.cscee.2022.100230>
- Chandanshive, V., Kadam, S., Rane, N., Jeon, B.-H., Jadhav, J., & Govindwar, C. (2020). In situ textile wastewater treatment in high rate transpiration system furrows planted with aquatic macrophytes and floating phytobeds. *Journal of Chemosphere*, 252, 126513. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.126513>
- Gunasundari, E., Senthil, K. P., Rajamohan, N., & Vellaichamy, P. (2020). Feasibility of naphthol green-B dye adsorption using microalgae: Thermodynamic and kinetic analysis. *Desalination and Water Treatment*, 192, 359. <https://doi.org/10.5004/dwt.2020.25777>
- Irdemez, S., Ozyay, G., Ekmekyapar, F., Kul, S., & Bingul, Z. (2022). Comparison of bomaplex blue CR-L removal by adsorption using raw and activated pumpkin seed shells. *Ecological Chemistry and Engineering*, 29(2), 199–200. <https://doi.org/10.2478/eces-2022-0015>
- Islam, M. T., Saenz-Arana, R., Hernandez, C., Guinto, T., Ahsan, M. A., Bragg, D. T., Wang, H., Alvarado-Tenorio, B., & Noveron, J. C. (2018). Conversion of waste tire rubber into a high-capacity adsorbent for the removal of methylene blue, methyl orange, and tetracycline from water. *Journal of Environmental Chemistry Engineering*, 6(2), 3070–3082. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2018.04.058>
- Yang, L., Zhan, Y., Gong, Y., Ren, E., Lan, J., Guo, R., Yan, B., Chen, S., & Lin, S. (2021). Development of eco-friendly CO₂-responsive cellulose nanofibril aerogels as “green” adsorbents for anionic dyes removal. *Journal of Hazardous Materials*, 405, 124194. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2020.124194>
- 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>
- Kishor, R., Purchase, D., Saratale, G. D., Saratale, R. G., Romanholo Ferreira, L. F., Bilal, M., Chandra, R., & Bharagava, R. N. (2021). Ecotoxicological and health concerns of persistent coloring pollutants of textile industry wastewater and treatment approaches for environmental safety. *Journal of Environmental Chemistry Engineering*, 9(2), 105012. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2020.105012>
- Liugė, M. ir Paliulis, D. (2022). Dažiklių šalinimo iš nuotekų eksperimentiniai tyrimai naudojant iš automobilių padangų atliekų pagamintas devulkanizuotos gumos granules. Iš 25-osios Lietuvos jaunųjų mokslininkų konferencijos „Mokslas – Lietuvos ateitis“ (p. 24–29), Vilnius, Lietuva. <https://doi.org/10.3846/aainz.2022.004>
- Liugė, M., Paliulis, D., & Šerevičienė, V. (2022). Experimental studies on the removal of textile dyes from artificially contaminated water using sorbent synthesized from paper waste. In *2022 International Conference and Utility Exhibition on Energy, Environment and Climate Change (ICUE)* (pp. 1–7), Pattaya, Thailand. <https://doi.org/10.1109/ICUE55325.2022.10113497>
- Musa, M. A., & Idrus, S. (2021). Physical and biological treatment technologies of slaughterhouse wastewater: A review. *Sustainability*, 13(9), 6–7. <https://doi.org/10.3390/su13094656>
- Pacurariu, R. L., Vatca, S. D., Lakatos, E. S., Bacali, L., & Vlad, M. (2021). A critical review of EU key indicators for the transition to the circular economy. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 18(16), 1–2. <https://doi.org/10.3390/ijerph18168840>
- Paulauskiene, T., Uebe, J., & Ziogas, M. (2021). Cellulose aerogel composites as oil sorbents and their regeneration. *PeerJ*, 9, e11795. <https://doi.org/10.7717/peerj.11795>
- Samsami, S., Mohamadi, M., Sarrafzadeh, M. H., Rene, E. R., & Firozabahr, M. (2020). Recent advances in the treatment of dye-containing wastewater from textile industries: Overview and perspectives. *Journal of Process Safety and Environmental Protection*, 143, 138–163. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2020.05.034>
- Šarko, J., Leonavičienė, T., & Mažeikienė, A. (2022). Research and modelling the ability of waste from water and wastewater treatment to remove phosphates from water. *Journal of Processes*, 10(412), 1–2. <https://doi.org/10.3390/pr10020412>
- Thai, Q. B., Le, D. K., Do, N. H. N., Le, P. K., Phan-Thien, N., Wee, C. Y., & Duong, H. M. (2020). Advanced aerogels from waste tire fibers for oil spill-cleaning applications.

- Journal of Environmental Chemical Engineering*, 8(4), 104016.
<https://doi.org/10.1016/j.jece.2020.104016>
- Wei, F., Shahid, M. J., Alnusairi, G. S. H., Afzal, M., Khan, A., El-Esawi, M. A., Abbas, Z., Wei, K., Zaheer, I. E., Rizwan, M., & Ali, S. (2020). Implementation of floating treatment wetlands for textile wastewater management: A review. *Sustainability*, 12(14), 5801. <https://doi.org/10.3390/su12145801>
- Wu, X., Yang, X., Wu, D., & Fu, R. (2008). Feasibility study of using carbon aerogel as particle electrodes for decoloration of RBRX dye solution in a three-dimensional electrode reactor. *Chemical Engineering Journal*, 138(1–3), 47–54.
<https://doi.org/10.1016/j.cej.2007.05.027>

COMPARISON OF DIFFERENT ADSORBENTS, CELLULOSE AEROGEL, DEVULCANIZED RUBBER GRANULES AND PYROLYZED SEWAGE SLUDGE GRANULES, FOR DYE REMOVAL FROM CONTAMINATED WATER

M. Liugė, D. Paliulis

Abstract

The release of dyes used in the textile industry into the natural environment causes unwanted negative effects due to the carcinogenic, mutagenic or even teratogenic properties of the dyes. Based on their chemical composition, dyes are divided into anionic, cationic and non-ionic dyes. In this work, the physical method of wastewater treatment – adsorption – was studied. This is a method in which various natural substances called sorbents are used. Materials used in the adsorption process should be non-toxic, environmentally friendly, cheap, and their use should not cause secondary pollution. The idea of using sorbents made from waste in experimental studies, which can even be used several times in the adsorption process, promotes the sustainable use of resources. The study compared different sorbents: aerogel, devulcanized rubber granules and sewage sludge. It was found that the highest values of adsorption efficiency were characterized by sewage sludge granules that were pyrolyzed at 500 °C. Using 500 °C pyrolysis sewage sludge, the adsorption efficiency reached 28.14–53.73%. Granules made from devulcanized car tire rubber had the lowest adsorption efficiency values: the adsorption efficiency value reached 12.92%. The adsorption efficiency values of the aerogel synthesized from paper waste ranged from 28.21 to 38.07%.

Keywords: adsorption, aerogel, dyes, devulcanized rubber granules, sewage sludge, textile.