

IŠ POPIERIAUS IR KARTONO ATLIEKŲ PAGAMINTO ADSORBENTO PANAUDOJIMAS KONGO RAUDONAJAM DAŽIKLIUI ŠALINTI IŠ VANDENS

Monika LIUGĖ*, Dainius PALIULIS

Vilniaus Gedimino technikos universitetas, Aplinkos inžinerijos fakultetas,

Aplinkos apsaugos ir vandens inžinerijos katedra, Vilnius, Lietuva

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

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

Santrauka. Tekstilės pramonė – viena iš svarbiausių lengvosios pramonės šakų visoje Europos Sąjungoje. Pagrindinės tekstilės pramonės aplinkosauginės problemos – didelis vandens suvartojimas ir jo užteršimas, naudojamų cheminių medžiagų įvairovė bei didelis energijos poreikis. Svarbu atkreipti dėmesį, jog dažiklių kiekis tekstilės pramonės nuotekose vis dar nėra reglamentuojamas. Pastaruoju metu dideliu savituoju paviršiaus plotu ir nedideliu svoriu pasižymintys adsorbentai, aerogeliai, sulaukė didelio susidomėjimo kaip perspektyvios dažiklius iš užteršto vandens šalinančios medžiagos. Celiuliozės aerogeliai yra nebrangūs, netoksiški. Šio tyrimo metu buvo nustatytas tekstilės pramonėje naudojamo kongo raudonojo dažiklio adsorbicijos efektyvumas naudojant iš popieriaus ir kartono atliekų susintetintą adsorbentą. Bendroji organinės anglies koncentracija buvo pasirinkta kaip kongo raudonojo dažiklio koncentracijos tirpale indikatorius. Tirtos skirtingos sudėties aerogelio kapsulės, celiuliozės kiekis jose skyrėsi nuo 3 % iki 5 %. Aerogelio kapsulėms, kurių sudėtyje buvo 3 % celiuliozės nuo bendros masės, esant 0,1 mg/l dažiklio koncentracijai, pasiektas 74,55 % bendrosios organinės anglies koncentracijos sumažėjimas, esant 1,0 mg/l – 73,68 %, esant 2,0 mg/l – 67,45 %, o esant 5,0 mg/l – 57,98 %. Aerogelio kapsulėms, kurių sudėtyje buvo 5 % celiuliozės nuo bendros masės, esant 0,1 mg/l, pasiektas 80,00 %, esant 1,0 mg/l – 76,04 %, esant 2,0 mg/l – 71,08 %, o esant 5,0 mg/l – 68,02 %.

Reikšminiai žodžiai: adsorbicija, aerogelis, celiuliozė, dažikliai, tekstilė.

1. Įvadas

Plečiantis pramonės sektoriams, kasmet susidaro dideli nuotekų kiekiai (Rahman et al., 2021). Į gamtinę aplinką išleidžiamos neišvalytos nuotekos gali padaryti didelę žalą žmonėms, gyvūnams, augalams ir mikroorganizmams (Kishor et al., 2021). Dažikliai yra organiniai teršalai, turintys sudėtingą cheminę struktūrą, kuri pasižymi dideliu stabilumu (Ardila-Leal et al., 2021).

Kongo raudonasis yra azodažiklių grupei priskiriamas dažiklis, kurio molekulinė formulė yra $C_{32}H_{22}N_6Na_2O_6S_2$. Tai tirpi vandenyje cheminė medžiaga, ištirpus dažikliui susidaro raudonas koloidinis tirpalas (Fan et al., 2022). Dėl spalvos pasikeitimo iš mėlynos į raudoną, esant pH 3,0–5,2, kongo raudonasis dažiklis gali būti naudojamas kaip pH indikatorius.

Tarp dažniausiai mokslinėje literatūroje minimų nuotekų valymo būdų adsorbicija yra laikoma efektyviu nuotekų valymo pasirinkimu (Sočo et al., 2021).

Adsorbicijos efektyvumas priklauso nuo adsorbento tipo. Šiuo metu dažniausiai naudojami adsorbentai, pagaminti iš anglies. Aktyvuotoji anglis pasižymi dideliu savituoju paviršiaus plotu, nedidele kaina bei dideliu poringumu (Muhammad et al., 2023). Tačiau ši medžiaga pasižymi prastomis regeneracinėmis savybėmis ir pakartotiniu panaudojimu.

Celiuliozė yra atsinaujinanti ir natūraliai skaidoma biomasės medžiaga. Aerogeliai, gauti ne iš naftos, o, pavyzdžiui, iš celiuliozės, chitozono, lignino, pektino ar kitų medžiagų, pasižymi aukštomis adsorbicinėmis savybėmis šalinant organinius teršalus iš nuotekų (Luo et al., 2021). Tai lemia didelis aerogelių poringumas, didelis savitasis paviršiaus plotas bei mažas tankis (Wang et al., 2023).

Celiuliozės pagrindu pagamintos aerogelio medžiagos gaminamos iš regeneruotos celiuliozės arba nanoceliuliozės, kuriai reikia specialių tirpiklių, augalinių pluoštų apdorojimo rūgštimis ir bazėmis arba

formaldehidu, glutaraldehidu, epichlorhidrinu (El-Zawahry et al., 2021).

Tyrime naudotos dviejų rūšių aerogelio kapsulės, kuriose celiuliozė sudarė 3 % ir 5 % atitinkamai. Siekta nustatyti, ar iš popieriaus ir kartono atliekų pagamintą adsorbentą yra tikslinga naudoti tekstilės pramonėje naudojamam kongo raudonajam dažikliui šalinti iš vandeninių tirpalų bei kurios sudėties aerogelio kapsulės pasižymi aukštesnėmis adsorbcinės gebos vertėmis.

Tyrimo tikslas – iš popieriaus ir kartono atliekų susintetinto aerogelio taikymo kongo raudonajam dažikliui šalinti iš vandeninių tirpalų galimybių įvertinimas.

2. Metodika

Eksperimentiniams tyrimams pasirinktas tekstilės pramonėje naudojamas kongo raudonasis dažiklis buvo miltelių pavidalo. Vandeninių tirpalų pH reikšmės išmatuotos prieš kiekvieną adsorbcijos tyrimą ir po jo. Prieš eksperimentinius tyrimus atliktas pH matuoklio *Mettler Toledo Multi seven* kalibravimas. Tyrimai atlikti kambario temperatūroje: 20–23 °C temperatūrų intervale.

Eksperimentiniam tyrimui naudota toliau išvardinta laboratorinė įranga bei cheminiai reagentai:

- cheminiai reagentai – chemiškai švarus kongo raudonasis dažiklis; distiliuotas vanduo, kuris atitinka standarto ISO 3696:1987 reikalavimus, 0,1 M H_2SO_4 ir 0,1 M NaOH vandeniniai tirpalai, kalio vandenilio ftalatas;
- laboratorinė įranga – *Radwag* analitinės svarstyklės, stiklo pluošto filtrinis popierius *REF A0478855*, filtrinis popierius *Qualitative Filter Paper Grade 202*, pH matuoklis *Mettler Toledo Multi seven*; 50, 100 ir 500 ml matavimo kolbos, 1, 2, 10, 25 ml graduotos pipetės, *Shimadzu TOC* bendrosios anglies analizatorius, sintetinio oro balionas, vakuuminis siurblys, magnetinė maišyklė *Heidolph MR 1000*.

Tyrimams naudoti stikliniai 50, 100, 500 ml matavimo indai. Prieš naudojimą indai buvo išplauti su distiliuotu vandeniu ir išdžiovinti.

Kongo raudonojo dažiklio adsorbcijos taikant iš popieriaus ir kartono atliekų susintetintą adsorbentą, aerogelį, tyrimai vykdyti iki 24 valandų nuolat maišant magnetine maišykle paruošto dažiklio vandeninius tirpalus. Remiantis mokslinės literatūros šaltiniais pasirinkti šie laiko intervalai: 5 min., 10 min., 30 min., 60 min., 120 min., 240 min., 480 min. ir 1440 min.

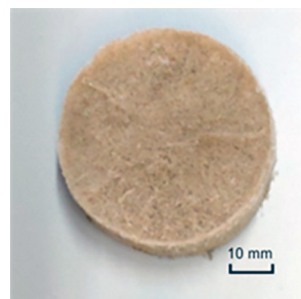
Adsorbcijos tyrimui paruošti 0,1 mg/l, 1,0 mg/l, 2,0 mg/l ir 5,0 mg/l koncentracijos kongo raudonojo dažiklio vandeniniai tirpalai.

Į 100 ml matavimo kolbą įberiamas reikiamas kiekis kongo raudonojo dažiklio miltelių ir iki 100 ml žymos į matavimo kolbą įpilama distiliuoto vandens. Mėginiai,

skirti adsorbcijos tyrimui statinėmis sąlygomis, perpilami į didesnės talpos (500 ml) stiklinius indus ir dedami į automatinę maišyklę bei maišomi 400 apsučių per minutę greičiu. Remiantis kitų mokslininkų atliktų tyrimų rezultatais nuspręsta naudoti ne didesnę nei 400 apsučių per minutę greitį siekiant nesuardyti pradinės aerogelio kapsulės struktūros. Naudojant didesnę nei 400 apsučių per minutę greitį automatinės maišyklės geležtės pradeda ardyti aerogelio kapsulės struktūrą atplėšiant aerogelį sudarančius pluoštus. Tyrimų metu aerogelio kapsulės buvo visiškai panaardintos paruoštuose vandeniniuose dažiklio tirpaluose.

Nesant galimybės susintetinti vienodo svorio aerogelio kapsulių, o jas karpant, pjaustant ar kitaip smulkinant, yra pakeičiama jų vidinė struktūra, adsorbcijos tyrime statinėmis sąlygomis nuspręsta naudoti po 1 aerogelio kapsulę. Pateikiant skaičiavimų rezultatus yra atsižvelgta į aerogelio kapsulių svorio kitimus.

Aerogelių kapsulės yra skritulio formos, 5 cm skersmens, 1 cm aukščio (1 pav.).



1 paveikslas. Aerogelio paviršiaus nuotrauka, vaizdas iš viršaus

Adsorbcijos tyrimai statinėmis sąlygomis po numatyto adsorbcijos laiko nutraukti atskyrus aerogelio kapsules nuo paruoštų tekstilės pramonėje naudojamo kongo raudonojo dažiklio vandeninių tirpalų filtruojant juos per stiklo pluošto filtrą. Atskirtos aerogelio kapsulės nebuvo pakartotinai panaudotos tolesniuose tyrimo etapuose.

Aerogelio kapsulės yra sudarytos iš mažų celiuliozės skaidulų, kurias galima įžiūrėti ir plika akimi. Tyrime naudotos dviejų rūšių aerogelio kapsulės, kuriose celiuliozė sudarė 3 % ir 5 % atitinkamai. Skirtingo tipo kapsulės vizualiai nesiskiria. Sintetinant skirtingos sudėties aerogelio kapsules apribojimų dėl celiuliozės kiekio jose nėra. Mažesnis nei 3 % ir didesnis nei 5 % celiuliozės kiekis nebuvo naudojamas, nes nurodytą celiuliozės kiekį turinčios aerogelio kapsulės pasižymi mažesnėmis adsorbcinės gebos vertėmis.

Adsorbcijos tyrimuose statinėmis sąlygomis naudotas adsorbentas buvo susintetintas Klaipėdos universitete, inžinerijos katedroje, jūros technologijų ir gamtos

mokslų fakultete. Aerogelio mišinys gaminamas keliais etapais. Vanduo sumaišomas su susmulkintu popieriumi (3 % arba 5 %). Pridėjus aplinkai nekenksmingo kryžminimo agento, krakmolo, 0,1 % nuo bendro kiekio, paruoštas mišinys 3 min. maišomas 20 000 suk./min. greičiu naudojant *UltraTurrax T25 digital IKA* (nerūdijančiojo plieno rotoriaus / statoriaus skersmuo 18 mm). Toliau mišinys homogenizuojamas ir išpilamas į indelius po 40 ml. Paskui mišinys yra užšaldomas; šaldymas trunka apie 3 valandas esant $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$. Liofilizavimo procesas atliekamas vakuume esant 0,015 hPa slėgiui ir $-105\text{ }^{\circ}\text{C}$ kondensatoriaus temperatūrai (ScanVac CoolSafe; LaboGene, Lillerodas, Danija). Šio proceso tikslas – išgarinti vandens kristalus. Tokiu būdu suformuojama poringa aerogelio 3D struktūra.

Paruošus pagrindinę aerogelio masę pradedamas jos modifikavimas: po džiovavimo šalčiu mėginiai sudedami į 3 l talpos stiklinę bei padengiami MTMS medžiaga (metiltrimetoksilanas) siekiant jiems suteikti hidrofobiškumą. Stiklinės viršus uždengiamas aliuminio folija ir dedamas į $70\text{ }^{\circ}\text{C}$ orkaitę 12 valandų.

Kartono ir popieriaus atliekų pagrindu pagamintų aerogelio mėginių kontaktinis kampas yra nuo 117 iki 125° (2 pav.). Jei kampas yra mažesnis nei 90° , aerogelis yra hidrofiliškas, o jei kampas didesnis nei 90° – hidrofobinis.



2 paveikslas. Aerogelio kontaktinio kampo nustatymas

Susmulkintus adsorbentą iki granulių aerogelis vis dar išlieka aerogeliu, hidrofobiškumo nepraranda. Tačiau smulkinimas turėtų būti atliekamas tik gamybos metu, nes menkiausias neteisingas aerogelio smulkinimas pjaustant gali pažeisti jo 3D struktūrą. Aerogelio smulkinimas nėra tikslingas, aerogelio poringumas, mažas jo tankis bei didelis savitasis paviršiaus plotas lemia aukštesnes adsorbcinės gebos vertes.

Adsorbuotas anglies kiekis (mg/g) buvo apskaičiuotas remiantis toliau pateikta (1) formule:

$$Q_e = \frac{(C_i - C_e)V}{m}, \text{ mg/g}, \quad (1)$$

čia C_i ir C_e yra pradinė ir pusiausvyrinė anglies koncentracija (mg/l); V – dažiklio tirpalo tūris (l), o m – medžiagos masė (g).

Naudojant *Shimadzu TOC* bendrosios anglies analizatorių buvo nustatytas likutinis ištirpusios organinės anglies kiekis vandeniniuose tirpaluose po adsorbcijos tyrimo statinėmis sąlygomis. Tai greitas ir patikimas metodas, skirtas sekti organinių medžiagų, ištirpusių vandenyje, koncentraciją naudojant anglį kaip indikatorius. Galimi ir kiti dažiklio koncentracijos pokyčio nustatymo būdai, pavyzdžiui, ChDS (cheminis deguonies suvartojimas) matavimas mėginiuose prieš adsorbcijos tyrimą ir po jo. ChDS nustatymas užtrunka ilgiau ir yra daug brangesnis metodas. Siekiant sumažinti tyrimo kaštus, laiką bei remiantis užsienio mokslinėje literatūroje nurodoma praktika, pasirinktas bendrosios organinės anglies koncentracijos matavimas su *Shimadzu* analizatoriumi.

Shimadzu analizatoriaus sistema sudaro šie blokai: TOC-VCSN – analizatorius; SSM-5000A – kieto mėginio deginimo blokas bei ASI-V – automatinė skysto mėginio paėmimo sistema.

Skystojo mėginio bendrosios anglies tyrimo eiga apima kelis etapus:

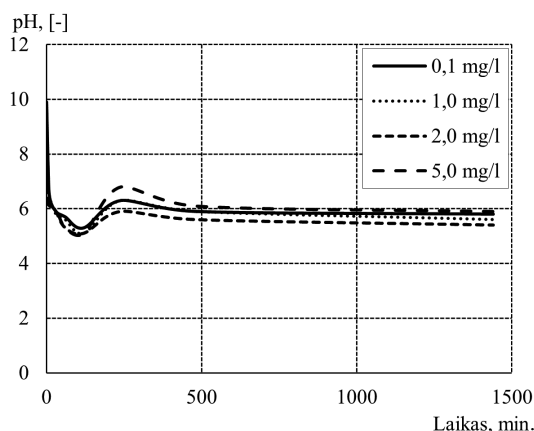
- 30 min. prieš pradedant tyrimą įjungiamas analizatorius ir paleidžiamos nešančiosios dujos;
 - specialūs 40 ml talpos mėgintuvėliai kruopščiai išplaunami. Į tuščią mėgintuvėlį pripilama ploviklio (pvz., į 1 % (tūrio) sieros rūgšties litrą pridedama 2,5 g jodo ir 12,5 g kalio jodido), purtant gerai suvilgomos buteliuko sienelės, 15 min. palaukiama, išpilamas tirpalas ir gerai perplaunama vandentiekio vandeniu, paskui – distiliuotu vandeniu ir išdžiovinama;
 - skystieji mėginiai filtruojami. Suspenduotos kietosios medžiagos pašalinamos naudojant stiklo pluošto filtrą ($1,2\text{ }\mu\text{m}$). Mėginiai pilami į 40 ml talpos specialius mėgintuvėlius taip, kad iki mėgintuvėlio viršaus liktų $\sim 1\text{ cm}$;
 - mėgintuvėliai su mėginiais sudedami į automatinės skystojo mėginio paėmimo sistemos būgną ir analizuojami. Mėginiai, kuriuose yra anglies junginių, kaitinami iki $680\text{ }^{\circ}\text{C}$ deguonies turinčioje aplinkoje anglies degimo vamzdeliuose, užpildytuose platinos katalizatoriumi. Oksidacijos metu susidaręs anglies dioksidas aptinkamas naudojant infraraudonųjų spindulių dujų analizatorių. Detektoriaus signalas sukuria smaile, kurios plotas proporcingas anglies koncentracijai mėginyje.
- Standartinių TC tirpalų paruošimas:
- pasveriamas 2,125 g gryno kalio vandenilio ftalato, prieš tai apie 1 valandą džiovinto $105\text{--}120\text{ }^{\circ}\text{C}$ temperatūroje ir aušinto džiovavimo spintoje;
 - atsvertas kiekis kalio vandenilio ftalato suberiamas į 1 l talpos matavimo kolbą ir ištirpinamas distiliuotame vandenyje;

- standartinis pradinis tirpalas atskiedžiamas distiliuotu vandeniu ruošiant standartinį pasirinktos koncentracijos pradinį tirpalą.

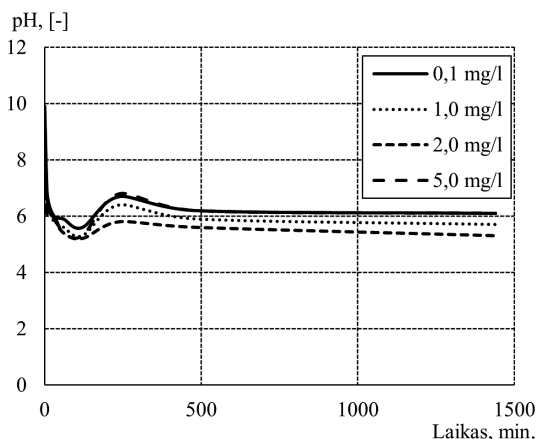
Remiantis anksčiau aprašyto tyrimo metodika atlikti eksperimentiniai tyrimai, kuriais bandyta įvertinti, ar tekstilės pramonėje naudojamas kongo raudonasis dažiklis gali būti pašalintas iš vandeninio tirpalo naudojant adsorbentą, pagamintą iš popieriaus ir kartono atliekų.

3. Rezultatai ir jų analizė

Po 24 valandas trukusio adsorbcijos tyrimo statinėmis sąlygomis pradinė visų mėginių pH vertė pakito (3 ir 4 pav.): pH vertės sumažėjo. Pastebėta, jog kongo raudonojo dažiklio pH vertės mažėjo iki 120 min., tačiau vėliau pH vertės nežymiai pradėjo kilti. Paruoštų kongo raudonojo tirpalų pH pokytį galėjo lemti į vandens ir dažiklio tirpalų tūrį išsiplovusios adsorbentą, aerogelį, sudarančios celiuliozės skaidulos.



3 paveikslas. Kongo raudonojo dažiklio pH priklausomybė nuo adsorbcijos statinėmis sąlygomis laiko, kai naudojamos 3 % celiuliozės turinčios aerogelio kapsulės



4 paveikslas. Kongo raudonojo dažiklio pH priklausomybė nuo adsorbcijos statinėmis sąlygomis laiko, kai naudojamos 5 % celiuliozės turinčios aerogelio kapsulės

Nė viename mėginyje nebuvo pašalintos kongo raudonojo dažiklio spalvos: spalvos intensyvumas sumažėjo, tačiau spalva neišnyko.

Adsorbcijos tyrimo statinėmis sąlygomis metu nustatyta, jog visais atvejais tyrime naudotų aerogelio mėginių svoris po tyrimo padidėjo. Aerogelio kapsulių svoris buvo nustatytas prieš adsorbcijos tyrimą ir po 1440 min. Pradinis 3 % ir 5 % celiuliozės savo masėje nuo bendros masės turinčių aerogelio kapsulių svoris visais atvejais siekė 0,80 g. Po adsorbcijos tyrimo fiksuotas 0,81–0,84 g aerogelio kapsulių svoris. Aerogelio kapsulių svorio padidėjimą lėmė ant aerogelio paviršiaus nusėdusių kongo raudonojo dažiklio dalelių svoris. Aerogelio kapsulės pasibaigus tyrimui buvo džiovinamos krosnyje apie valandą 105–110 °C temperatūroje.

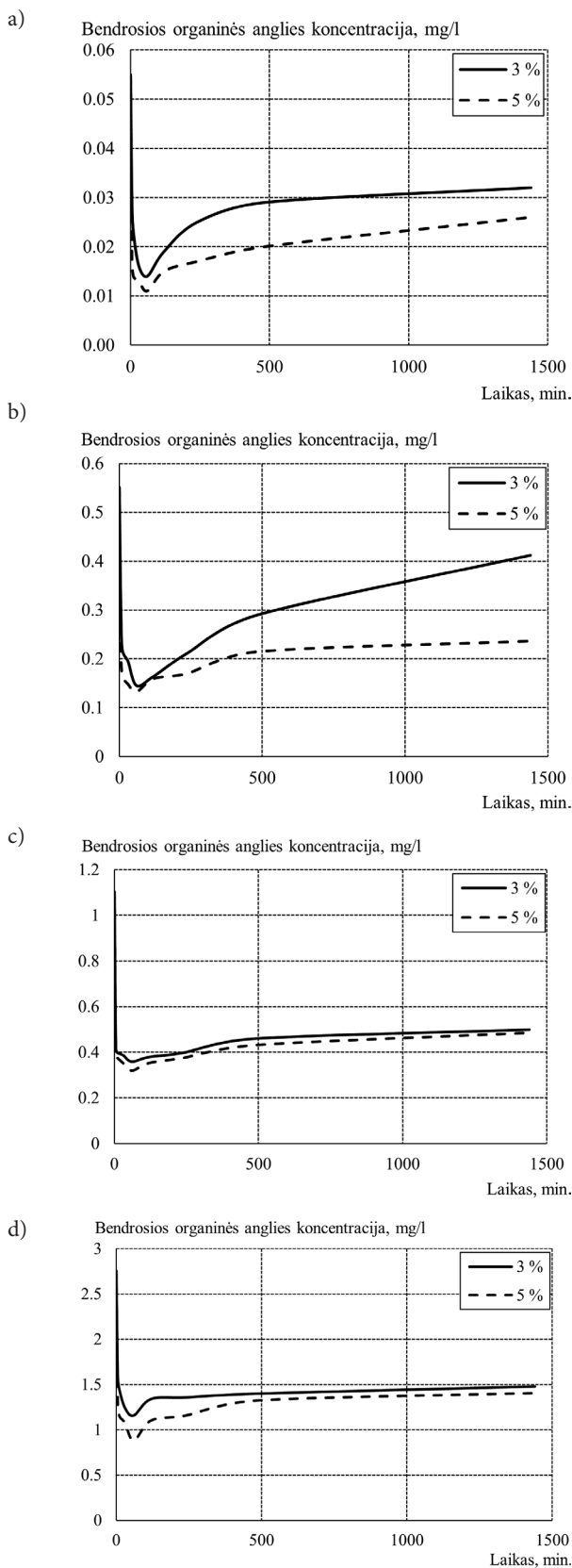
5 paveiksle pateikta bendrosios organinės anglies koncentracijos priklausomybė nuo laiko. Nustatyta, jog norint pašalinti tekstilės pramonėje naudojamą kongo raudonąjį dažiklį galima naudoti tiek 3 %, tiek 5 % celiuliozės turinčias aerogelio kapsules, tačiau verta rinktis aerogelius, kuriuose yra 5 % celiuliozės. Visais atvejais nustatyta, jog likutinė bendrosios organinės anglies koncentracija mėginiuose buvo mažesnė nei prieš adsorbcijos procesą.

Po 60 min. trukusio adsorbcijos tyrimo statinėmis sąlygomis buvo pasiekta adsorbcijos pusiausvyra, t. y. mažiausia likutinė bendrosios organinės anglies koncentracija. Naudojant 3 % celiuliozės turinčias aerogelio kapsules 0,1 mg/l koncentracijos dažiklio tirpale, pasiektas 74,55 % bendrosios organinės anglies koncentracijos sumažėjimas, 1,0 mg/l koncentracijos kongo raudonojo dažiklio tirpalo – 73,68 %, esant 2,0 mg/l – 67,45 %, o esant 5,0 mg/l – 57,98 %. Naudojant 5 % celiuliozės turinčias aerogelio kapsules 0,1 mg/l koncentracijos dažiklio tirpale, pasiektas 80,00 % bendrosios organinės anglies koncentracijos sumažėjimas, esant 1,0 mg/l – 76,04 %, esant 2,0 mg/l – 71,08 %, o esant 5,0 mg/l – 68,02 %.

Tikslios adsorbuotos anglies adsorbcinės gebos ir adsorbcijos efektyvumo vertės pateiktos 1 lentelėje.

1 lentelė. Adsorbcinės gebos ir adsorbcijos efektyvumo vertės

3 % celiuliozės		
Dažiklio koncentracija, mg/l	Adsorbcinė geba, mg/g	Adsorbcijos efektyvumas, %
0,1	0,03	74,55
1,0	0,25	73,68
2,0	0,47	67,45
5,0	1,00	57,98
5 % celiuliozės		
0,1	0,03	80,00
1,0	0,26	76,04
2,0	0,49	71,08
5,0	1,17	68,02



5 paveikslas. Bendrosios organinės anglies koncentracijos priklausomybė nuo laiko: a – 0,1 mg/l dažiklio koncentracijos tirpalas; b – 1,0 mg/l dažiklio koncentracijos tirpalas; c – 2,0 mg/l dažiklio koncentracijos tirpalas; d – 5,0 mg/l dažiklio koncentracijos tirpalas

Ateityje planuojama tęsti pradėtus tyrimus su aerogelio kapsulėmis, kuriose celiuliozė sudaro 3 % ir 5 % atitinkamai. Tikimasi paruošti kongo raudonojo dažiklio vandeninius tirpalus, kurių koncentracija siektų nuo 5,0 mg/l iki 200,0 mg/l.

4. Išvados

Iš popieriaus ir kartono atliekų pagamintas adsorbentas, aerogelis, gali būti naudojamas tekstilės pramonėje naudojamam kongo raudonajam dažikliui šalinti iš vandeninių tirpalų. Naudojant aerogelio kapsules, kurių sudėtyje buvo 3 % celiuliozės nuo bendros masės, esant 0,1 mg/l dažiklio koncentracijai, pasiektas 74,55 % bendrosios organinės anglies koncentracijos sumažėjimas, esant 1,0 mg/l – 73,68 %, esant 2,0 mg/l – 67,45 %, o esant 5,0 mg/l – 57,98 %. Naudojant 5 % celiuliozės nuo bendros masės turinčias kapsules, esant 0,1 mg/l pasiektas 80,00 %, esant 1,0 mg/l – 76,04 %, esant 2,0 mg/l – 71,08 %, o esant 5,0 mg/l – 68,02 % adsorbcijos efektyvumas.

Po 1440 min. trukusio adsorbcijos tyrimo statinėmis sąlygomis pradinė visų mėginių pH vertė pakito: pH vertės sumažėjo. Naudojant aerogelio kapsules, kurių sudėtyje buvo 3 % celiuliozės nuo bendros masės, vandeninių tirpalų pH vertės sumažėjo nuo 8,0–9,9 iki 5,1–5,3, kai adsorbcija truko iki 120 min. Po 120 min. pH vertės pradėjo augti nuo 5,1–5,3 iki 5,9–6,8. Naudojant 5 % celiuliozės nuo bendros masės turinčias kapsules, vandeninių tirpalų pH vertės sumažėjo nuo 8,0–9,9 iki 5,2–5,6, kai adsorbcija truko iki 120 min. Po 120 min. pH vertės pradėjo augti nuo 5,2–5,6 iki 5,8–6,8.

Mėginiuose nebuvo pašalinta kongo raudonojo dažiklio spalva. Optinio tankio matavimai nebuvo atlikti, spalvos intensyvumo pokytis fiksuotas tik vizualiai.

Adsorbcijos tyrimo statinėmis sąlygomis metu pradinis aerogelio svoris siekė 0,80 g. Po 1440 min. trukusio tyrimo aerogelio kapsulių svoris visais atvejais padidėjo iki 0,81–0,84 g. Po adsorbcijos tyrimo statinėmis sąlygomis ant aerogelio paviršiaus nusėdo dažiklio dalelės, kurios lėmė padidėjusį aerogelio kapsulių svorį.

Tirti 0,1 mg/l, 1,0 mg/l, 2,0 mg/l ir 5,0 mg/l kongo raudonojo dažiklio vandeniniai tirpalai. Naudojant 3 % celiuliozės turinčias aerogelio kapsules pasiektos 0,03–1,00 mg/g adsorbcijos efektyvumo vertės; naudojant 5 % celiuliozės turinčias aerogelio kapsules pasiektos 0,03–1,17 mg/g adsorbcijos efektyvumo vertės.

Padėkos

Dėkoju už pagalbą Vilniaus Gedimino technikos universiteto Aplinkos inžinerijos fakulteto Aplinkos apsaugos ir vandens inžinerijos katedros darbuotojams ruošiantis tyrimui.

Literatūra

- Ardila-Leal, L. D., Poutou-Piñales, R. A., Pedroza-Rodríguez, A. M., & Quevedo-Hidalgo, B. E. (2021). A brief history of colour, the environmental impact of synthetic dyes and removal by using laccases. *Molecules*, 26(13), Article 3813. <https://doi.org/10.3390/molecules26133813>
- El-Zawahry, M. M., Hassabo, A. G., Abdelghaffar, F., Abdelghaffar, R. A., & Hakeim, O. A. (2021). Preparation and use of aqueous solutions magnetic chitosan / nanocellulose aerogels for the sorption of Reactive Black 5. *Biointerface Research in Applied Chemistry*, 11(4), 12380–12402. <https://doi.org/10.33263/BRIAC114.1238012402>
- Fan, K., Zhang, T., Xiao, S., He, H., Yang, J., & Qin, Z. (2022). Preparation and adsorption performance of functionalization cellulose-based composite aerogel. *International Journal of Biological Macromolecules*, 211, 1–14. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2022.05.042>
- Kishor, R., Purchase, D., Saratale, G. D., Saratale, R. G., Ferreira, L. F. R., 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 Chemical Engineering*, 9(2), Article 105012. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2020.105012>
- Luo, M., Wang, M., Pang, H., Zhang, R., Huang, J., Liang, K., Chen, P., Sun, P., & Kong, B. (2021). Super-assembled highly compressible and flexible cellulose aerogels for methylene blue removal from water. *Chinese Chemical Letters*, 32(6), 2091–2096. <https://doi.org/10.1016/j.ccl.2021.03.024>
- Muhammad, S., Yahya, E. B., Abdul Khalil, H. P. S., Marwan, M., & Albadn, Y. M. (2023). Recent advances in carbon and activated carbon nanostructured aerogels prepared from agricultural wastes for wastewater treatment applications. *Agriculture*, 13(1), Article 208. <https://doi.org/10.3390/agriculture13010208>
- Rahman, M. M., Alam, K., & Velayutham, E. (2021). Is industrial pollution detrimental to public health? Evidence from the world's most industrialised countries. *BMC Public Health*, 21(1), Article 1175. <https://doi.org/10.1186/s12889-021-11217-6>
- Sočo, E., Papciak, D., Michel, M. M., Pająk, D., Domoń, A., & Kupiec, B. (2021). Characterization of the physical, chemical, and adsorption properties of coal-fly-ash-hydroxyapatite composites. *Minerals*, 11(7), Article 744. <https://doi.org/10.3390/min11070774>
- Wang, Y., Zhang, S., Zhu, J., Li, N., & Yin, Y. (2023). Fabrication of wood-inspired nanocellulose-based aerogels for efficient adsorption and filtration removal of Congo red. *Industrial Crops and Products*, 205, Article 117482. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2023.117482>

USE OF ADSORBENT MADE FROM PAPER AND CARDBOARD WASTE FOR REMOVAL OF CONGO RED DYE FROM WATER

M. LIUGĖ, D. PALIULIS

Abstract. The textile industry is one of the most important light industries in the entire European Union. The main environmental problems of the textile industry are the high water consumption and its pollution, the variety of chemicals used and the high energy demand. It is important to note that the amount of dyes in textile industry wastewater is still not regulated. Recently, adsorbents with a large specific surface area and low weight, aerogels, have attracted great interest as promising materials for removing dyes from polluted water. Cellulose aerogels are inexpensive, non-toxic. During this study, the adsorption efficiency of Congo red, a dye used in the textile industry, was determined using an adsorbent synthesized from paper and cardboard waste. The total organic carbon concentration was chosen as an indicator of the concentration of the dye Congo red in the solution. Aerogel capsules of different compositions were tested, the cellulose content in them varied from 3% to 5%. For aerogel capsules containing 3% cellulose by total weight, at a dye concentration of 0.1 mg/l, a 74.55% reduction in total organic carbon was achieved, at 1.0 mg/l – 73.68%, at 2.0 mg/l – 67.45%, and at 5.0 mg/l – 57.98%. For aerogel capsules containing 5% cellulose by total weight, at 0.1 mg/l, 80.00% was achieved, at 1.0 mg/l – 76.04%, at 2.0 mg/l – 71.08%, and at 5.0 mg/l – 68.02%.

Keywords: adsorption, aerogel, cellulose, dyes, textiles.