

Characteristics of adsorbents used to remove spills of petroleum derivatives into the soil environment

Charakterystyka adsorbentów stosowanych do usuwania wycieków substancji ropopochodnych do środowiska glebowego



DOI: 10.15199/62.2024.11.6

Three adsorbents (peat moss, polycellulose acetate and diatomite) were used in the studies of adsorption of diesel oil at temp. of 293.15, 303.15 and 323.15 K. The Langmuir isotherm model was used to describe the adsorption kinetics. The anal. of the external structure of individual adsorbents was carried out using SEM, and the elemental anal. using SEM-EDS.

Keywords: adsorption, peat moss, polycellulose acetate, diatomite, diesel oil

W badaniach właściwości adsorpcyjnych stosowano trzy adsorbenty (mech torfowy, polioctan celulozy i diatomit), dla których wyznaczono wielkość adsorpcji oleju napędowego. Do celów opisu kinetyki adsorpcji wykorzystano model izotermi Langmuira. Przeanalizowano strukturę zewnętrzną poszczególnych adsorbentów metodą mikroskopii skaningowej SEM i analizę pierwiastkową SEM-EDS. Adsorbenty charakteryzowały się znaczną zawartością węgla, tlenu i krzemu. Zauważalne były również śladowe ilości innych pierwiastków.

Słowa kluczowe: adsorpcja, mech torfowy, polioctan celulozy, diatomit, olej napędowy

Do częstych zdarzeń niekontrolowanych wycieków substancji ropopochodnych dochodzi podczas komunikacji w transporcie drogowym, przy czym najgroźniejszą z substancji jest olej napędowy. Wyciek substancji ropopochodnych ma negatywne oddziaływanie zarówno na środowisko wodne, jak i gruntowe. Niekontrolowane wycieki o dużej skali oddziaływania na człowieka i środowisko niosą ze sobą wieloletnie negatywne skutki dla całego ekosystemu. Do usuwania wycieków substancji ropopochodnych najczęściej stosuje się adsorbenty.

Adsorbenty to materiały stałe o strukturze porowatej lub nieporowatej mające za zadanie wyselekcjonowanie

substancji z mieszanin gazowych lub ciekłych i zatrzymanie ich na zewnętrznej części adsorbentu w wyniku oddziaływania fizycznego lub przemiany chemicznej międzycząsteczkowej^{1, 2)}. Procesy adsorpcyjne dotyczą usuwania takich substancji, jak kwasy, zasady, materiały biologiczne (np. krew z powierzchni bitumicznych utwardzanych) oraz płyny po wypadkach w komunikacji lądowej, takie jak olej napędowy, olej silnikowy, płyny chłodnicze i oleje hydrauliczne. Adsorbenty stosowane są również do usuwania substancji ropopochodnych podczas rozlewów olejowych na wodach stojących, przepływowych lub morskich w formie np. zapór sorpcyjnych. Adsorpcja jest jedną z najtańszych



Prof. dr hab. inż. Wilhelm J. TIC (ORCID: 0000-0002-9071-5565) ukończył studia na Wydziale Chemicznym Politechniki Śląskiej w Gliwicach. Pracuje na stanowisku profesora w Katedrze Inżynierii Procesowej i Środowiska Politechniki Opolskiej. Specjalność – inżynieria środowiska, górnictwo i energetyka.



Dr hab. inż. Joanna GUZIAŁOWSKA-TIC, prof. PO (ORCID: 0000-0003-2598-2672) ukończyła studia z zakresu inżynierii środowiska na Politechnice Opolskiej. Obecnie pracuje jako profesor uczelni w Katedrze Inżynierii Procesowej i Środowiska tej samej uczelni. Specjalność – REACH, metody QSAR, katalizatory w procesach ochrony środowiska, zarządzanie chemikaliami, ochrona środowiska.

***Adres do korespondencji:**

Katedra Inżynierii Procesowej i Środowiska, Wydział Mechaniczny, Politechnika Opolska, ul. Mikołajczyka 5, 45-271 Opole, tel.: (77) 449-81-11, e-mail: j.guzialowska-tic@po.edu.pl

i najskuteczniejszych metod oczyszczania gruntów i wód z zanieczyszczeń substancjami ropopochodnymi³⁾.

Na rozprzestrzenianie się substancji ropopochodnych w gruncie mają wpływ różne czynniki, a jednym z nich jest rodzaj gleby. Najmniej przepuszczalne dla substancji ropopochodnych są gleby o dużej gęstości, takie jak gliny i ropy. Najbardziej przepuszczalne są gleby o mniejszej gęstości, takie jak torf, lekkie gleby ilaste oraz ziemie piaszczyste⁴⁾. Prędkość penetracji oleju napędowego w glebie może dochodzić w przybliżeniu do 221 m/dobę, natomiast etyliny 164 m/dobę.

Wycieki substancji ropopochodnych na podłoża glebowe nie występują w dużej skali tak jak np. na platformach wiertniczych⁴⁾. Głównym źródłem wycieków mogą być pobliska stacji benzynowych, obiekty liniowe (drogi, linie kolejowe), pobliska zakładów chemicznych oraz warsztaty samochodowe^{6, 7)}. Systematyczność oraz długotrwałość wycieków powodują, że są one równie niebezpieczne jak awarie na platformach i w rafineriach. Ciecze ropopochodne już w niewielkich ilościach powodują zmianę smaku wody, czyniąc ją niezdatną do spożycia.

Ogólna charakterystyka adsorbentów stosowanych do usuwania wycieków substancji ropopochodnych ogranicza się najczęściej do badań związanych z określeniem wielkości adsorpcji⁸⁾, zwanej pojemnością adsorpcyjną lub chłonnością^{9, 10)}. Dodatkowe badania, które wykonuje się w celu analizy materiału to porowatość¹¹⁾, kinetyka adsorpcji, wyznaczenie powierzchni właściwej, analiza struktury powierzchniowej, morfologia i hydrofobowość/hydrofilowość^{12, 13)}. Opisane w literaturze badania dotyczą najczęściej usuwania substancji ropopochodnych z wód^{14, 15)}. Niewiele jest informacji w zakresie procesów adsorpcji adsorbentów wykorzystywanych do usuwania substancji ropopochodnych z podłoża utwardzalnych, nieprzepuszczalnych i trudno przepuszczalnych, takich jak drogi bitumiczne, rowy melioracyjne i podłoża gruntowe.

W procesach adsorpcji substancji ropopochodnych występuje głównie adsorpcja fizyczna związana z oddziaływaniami międzycząsteczkowymi typu Van der Waalsa i typu Londona^{2, 16–18)}. Siły Van der Waalsa występują w niepolarnych cząsteczkach lub atomach. Są one dużo słabsze niż oddziaływania chemiczne, jednakże odgrywają znaczącą rolę w naturze. Na powierzchni stykających się faz występują niezerównoważone siły adhezji. Wzajemne oddziaływanie cząsteczek wynika z czasowej fluktuacji

ładunków powodujących indukcję przejściowych dipoli. W cząsteczce tworzą się co jakiś czas dipole, co z kolei powoduje redystrybucję elektronów najbliższych cząsteczek pod wpływem oddziaływania pola indukcyjnego. W wyniku powstania dipoli dochodzi do wzajemnego przyciągania dwóch cząsteczek na skutek oddziaływania siły¹⁹⁾.

Ważnym elementem opisującym statykę procesu adsorpcji są izotermy adsorpcji. Są one elementem pozwalającym na charakteryzowanie procesów adsorpcyjnych, w szczególności procesów prowadzonych na skalę przemysłową. Izotermy określają charakter przebiegu procesu adsorpcji oraz strukturę wewnętrzną adsorbentów porowatych⁸⁾.

Część doświadczalna

Materiały

Stosowano polioctan celulozy (CA), ciało stałe barwy białej, bez zapachu, o masie cząsteczkowej 37 000 g/mol, o gęstości nasypowej 130 g/dm³, nieszkodliwy dla środowiska (Tobacco Trading International Poland sp. z o.o.); mech torfowy (CB18), ciało stałe o gęstości nasypowej 210 g/dm³, adsorbent sklasyfikowany został pod względem palności jako palny (Happy End sp. z o.o.); diatomit (DAM), ciało stałe o gęstości nasypowej 509 g/dm³, granulacji 0,5–1,0 mm, pH 5,5, produkt nie jest sklasyfikowany jako niebezpieczny, jest niepalny i nie wykazuje właściwości wybuchowych, jest obojętny chemicznie i nie reaguje z kwasami i zasadami, z wyjątkiem kwasu fluorowodorowego (PHU Strefa 998 Kamil Halarewicz).

W celu oznaczenia wielkości adsorpcji oraz kinetyki adsorpcji stosowano olej napędowy gat. B, zgodnie z normą²⁰⁾.

Metodyka badań

W celu poznania właściwości adsorpcyjnych adsorbentów wykorzystywanych do usuwania substancji ropopochodnych przeprowadzono badania, wykorzystując aparaturę do badania wielkości adsorpcji oddolnej, za pomocą której scharakteryzowano dwa podstawowe parametry adsorbentu stałego, wielkość i kinetykę adsorpcji. Schemat i opis aparatury badawczej przedstawiono w pracy²¹⁾.

W badaniach wielkości adsorpcji oleju napędowego jako adsorbent stosowano mech torfowy (CB18), octan celulozy (CA) i diatomit (DAM) o objętości 0,10 dm³. Wielkość adsorpcji oleju napędowego wyznaczono w temp. 293,15 K, 303,15 K i 323,15 K, korzystając ze wzoru (1):

$$a = \frac{m_a}{V_w} \quad (1)$$

w którym a oznacza wielkość adsorpcji, g/dm³, m_a masę zaadsorbowanej substancji, g, a V_w objętość adsorbentu, dm³.

Kinetykę adsorpcji scharakteryzowano na podstawie równania zmodyfikowanej izotermy Langmuira. Zmodyfikowane równanie Langmuira oparte jest na założeniu, że wielkość adsorpcji zależna jest od czasu kon-



Dr inż. Piotr M. PIJAROWSKI jest specjalistą ds. ochrony przeciwpożarowej w firmie Ekspert-poz sp. z o.o. w Dzierżoniowie. Specjalność – inżynieria środowiska, górnictwo i geomatyka.

taktu adsorbentu z adsorbentem, temperatury oraz rodzaju adsorbentu. Zmodyfikowane równanie izotermy Langmuira wprowadzono na potrzeby uzyskania równania kinetyki adsorpcji i zapisano w postaci (2):

$$a = a_m \frac{K\tau}{1 + K\tau} \quad (2)$$

w którym a oznacza wielkość adsorpcji w danym czasie, g/dm^3 , τ czas adsorpcji w danej chwili, s , K stałą zależną od układu adsorpcyjnego, a a_m pojemność monowarstwy, g/dm^3 .

W celu wyznaczenia zmodyfikowanego równania izotermy Langmuira dla układu olej napędowy-adsorbent stały, równanie poddano zlogarytmowaniu, aby uzyskać równanie zależności wartości $1/a$ od $1/\tau$ (3):

$$\frac{1}{a} = \frac{1}{a_m K \tau} + \frac{1}{a_m} \quad (3)$$

Następnie wykreślono zależność $1/a$ od $1/\tau$ i wyznaczono linię trendu równania liniowego (4)²²:

$$a = a' \cdot x + b \quad (4)$$

Stałą K równania Langmuira wyznaczono z zależności (5):

$$K = \frac{1}{a' \cdot a_m} \quad (5)$$

w którym K oznacza stałą równowagi adsorpcji, a' współczynnik równania liniowego (4) i a_m pojemność monowarstwy.

Pojemność monowarstwy a_m wyznaczono z równania (6):

$$a_m = \frac{1}{b} \quad (6)$$

w którym b oznacza wartość otrzymaną z równania liniowego (4).

Badanie SEM wykonano skaningowym mikroskopem elektronowym Quanta 3D FEG. Badanie SEM-EDX wykonano energodispersyjnym spektrometrem rentgenowskim Quantax 200 produkcji Bruker-AXS Microanalysis GmbH, Berlin, Niemcy, z detektorem EDX XFlash 4010.

Wyniki badań

W badaniach właściwości adsorpcyjnych stosowano trzy adsorbenty klasyfikowane w różnych grupach, czyli mech torfowy (CB18) jako przedstawiciel adsorbentów organicznych naturalnych, polioctan celulozy (CA), adsorbent organiczny przetworzony, oraz diatomit (DAM), czyli ziemia okrzemkowa, adsorbent nieorganiczny przetworzony.

Najbardziej wydajny okazał się adsorbent CB18, dla którego wielkość adsorpcji w temp. 293,15 K wynosiła $790,13 \text{ g/dm}^3$. W przypadku DAM wyznaczona wielkość adsorpcji w temp. 293,15 K stanowiła $545,91 \text{ g/dm}^3$. Najniższą wielkość adsorpcji wyznaczono dla CA, dla którego wielkość adsorpcji w temp. 293,15 K wynosiła $424,92 \text{ g/dm}^3$ (tabela 1).

Adsorbenty poddano badaniom kinetyki adsorpcji w trzech wybranych temperaturach. Wyniki tych badań przedstawiono na rys. 1–3. W przypadku CA oraz DAM w temp. 293,15 K i 303,15 K nie występowały duże różnice

Table 1. Adsorption capacity of the tested adsorbents at different temperatures

Tabela 1. Wielkość adsorpcji badanych adsorbentów w różnych temperaturach

Nazwa adsorbentu	Wielkość adsorpcji w temperaturze, g/dm^3		
	293,15 K	303,15 K	323,15 K
CA	424,92	423,96	392,73
CB18	790,13	748,23	723,52
DAM	545,91	560,71	514,85

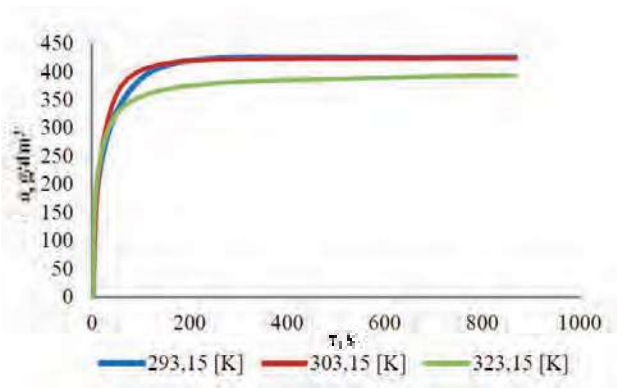


Fig. 1. Adsorption kinetics diagram for the adsorbent CA

Rys. 1. Wykres kinetyki adsorpcji dla adsorbentu CA

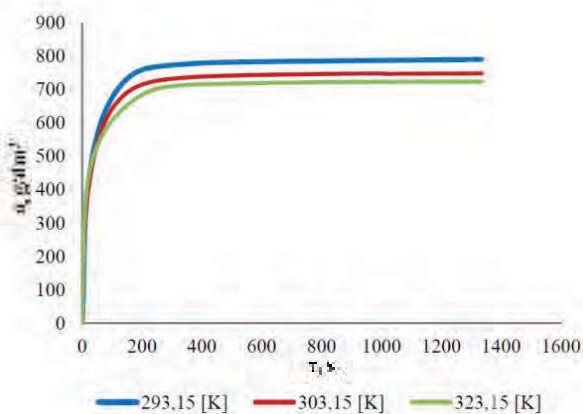


Fig. 2. Adsorption kinetics diagram for the adsorbent CB18

Rys. 2. Wykres kinetyki adsorpcji dla adsorbentu CB18

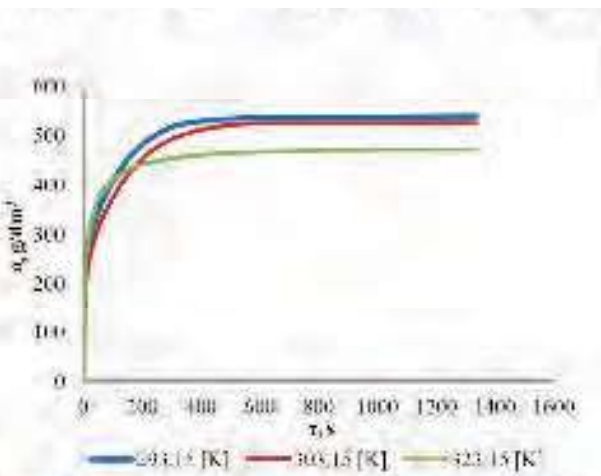


Fig. 3. Adsorption kinetics diagram for the adsorbent DAM

Rys. 3. Wykres kinetyki adsorpcji dla adsorbentu DAM

w wielkości adsorpcji, natomiast dla CB18 różnice w wielkości adsorpcji były większe. W przypadku CB18 i DAM wraz ze wzrostem temperatury wielkość adsorpcji malała. Dla CA w temp. 293,15 K i 303,15 K wielkość adsorpcji była na podobnym poziomie, ale przyjmowała mniejszą wartość w temp. 323,15 K.

Badania potwierdziły, że wraz ze wzrostem temperatury wielkość adsorpcji a malała. Izotermy adsorpcji CA i DAM nie wskazywały zbyt dużych różnic pomiędzy wielkościami adsorpcji a w temp. 293,15 i 323,15 K, które wynosiły odpowiednio 32,175 g/dm³ i 31,06 g/dm³. Najbardziej widoczną różnicę wielkości adsorpcji obserwowano w przypadku CB18 dla temp. 293,15 K i 323,15 K, która wynosiła 66,61 g/dm³ (tabela 1).

W celu opisu kinetyki adsorpcji wykorzystano model izotermy Langmuira. Wyznaczenie stałych K przeprowadzono po zlogarytmowaniu równania izotermy Langmuira, uzyskując wykres zależności $1/a$ od $1/\tau$ (rys. 4–6).

Na podstawie uzyskanych wartości stałych K można jednoznacznie wskazać zależność stałych K od rodzaju adsorbentu i temperatury (tabela 2). Dla trzech badanych adsorbentów najmniejsze wartości stałej K uzyskano w temp. 293,15 K, przy czym wartość stałej K była najmniejsza dla adsorbentu wykazującego najwyższą wartość adsorpcji (CB18). W przypadku CA, wykazującego najniższą wielkość adsorpcji, wartość stałej K była największa. Wraz ze wzrostem temperatury procesu adsorpcji dla adsorbentów CB18 i DAM wartość stałej K rosła. Zależności tej nie obserwowano w przypadku adsorbentu CA. W tym przypadku najmniejszą wartość stałej K wyznaczono w temp. 303,13 K. Możliwe jest, że na tą zależność mogła mieć wpływ struktura materiału lub właściwości fizyczno-chemiczne polioctanu celulozy, w tym struktura porowata.

Analiza SEM

Przeanalizowano strukturę zewnętrzną poszczególnych adsorbentów metodą mikroskopii skaningowej SEM. Wyniki badań wskazują, że adsorbenty CB18 oraz DAM są adsorbentami porowatymi. Adsorbent CB18 charakteryzował się kształtem kulistym i nieuporządkowaną strukturą powierzchni zawierającą makropory (rys. 7). Kształt makroporów można przyrównać do plastrów miodu. Średnice makroporów w powiększeniu 1000× zawierały się w zakresie 5–25 μm, niekiedy 3,33 μm. Szerokość ścianek komórkowych w największym punkcie wynosiła 1,66 μm. Biorąc pod uwagę opisywany kształt adsorbentu, można stwierdzić, że adsorpcja może zachodzić wewnątrz komórek makroporów w kształcie nieregularnych otwartych przestrzeni.

Ziarno adsorbentu DAM miało nieregularny kształt kulisty (rys. 8). Przy powiększeniu 5000× i 10 000× widoczne były na powierzchni adsorbentu liczne pancerze obumarłych okrzemek. Wygląd pancerzy komórek okrzemkowych był zbliżony do plastrów miodu (zewnętrzne ścianki miały układ heksagonalny), krat oraz okrągłych komórek, w któ-

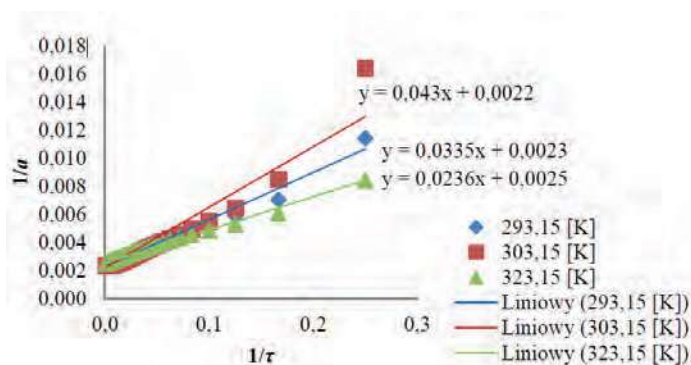


Fig. 4. Graph of the relationship of $1/a$ and $1/\tau$, adsorbent CA

Rys. 4. Wykres zależności $1/a$ i $1/\tau$, adsorbent CA

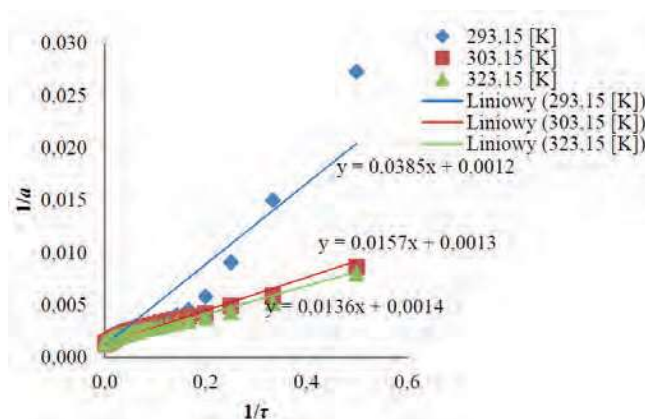


Fig. 5. Graph of the relationship of $1/a$ and $1/\tau$, adsorbent CB18

Rys. 5. Wykres zależności $1/a$ i $1/\tau$, adsorbent CB18

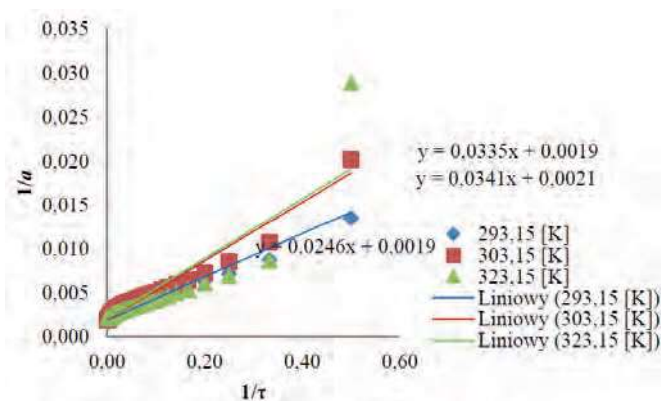


Fig. 6. Graph of the relationship $1/a$ and $1/\tau$, adsorbent DAM

Rys. 6. Wykres zależności $1/a$ i $1/\tau$, adsorbent (DAM)

Table 2. K constants for individual adsorbents according to the Langmuir equation

Tabela 2. Stałe K dla poszczególnych adsorbentów wg równania Langmuira

Nazwa adsorbentu	Stałe K zależne od temperatury, K		
	293,15	303,15	323,15
CA	0,0686	0,0512	0,1059
CB18	0,0310	0,0830	0,1030
DAM	0,0560	0,0570	0,0850

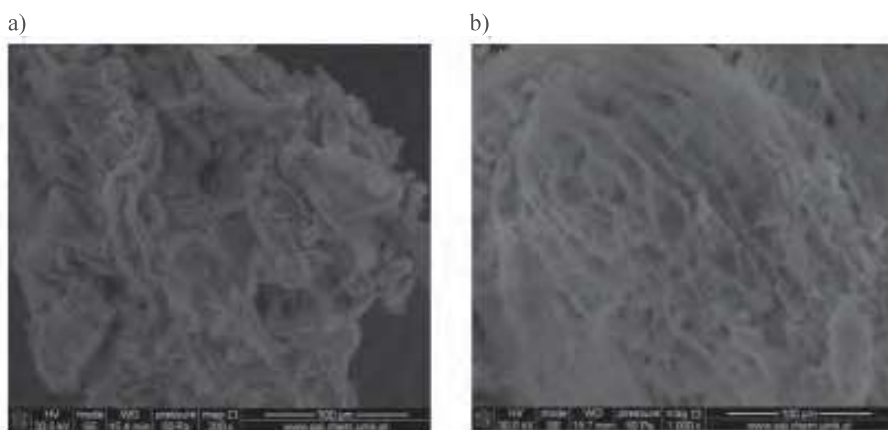


Fig. 7. SEM image of peat moss (CB18), magnification 200× (a), 1000× (b)

Rys. 7. Zdjęcie SEM mchu torfowego (CB18), powiększenie 200× (a), 1000× (b)

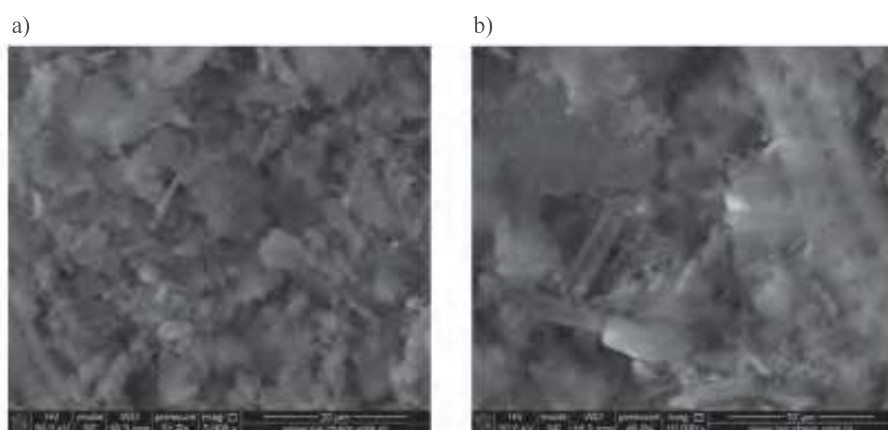


Fig. 8. SEM image of the adsorbent DAM, magnification 5000× (a), 10000× (b)

Rys. 8. Zdjęcie SEM adsorbentu DAM, powiększenie 5000× (a) i 10000× (b)

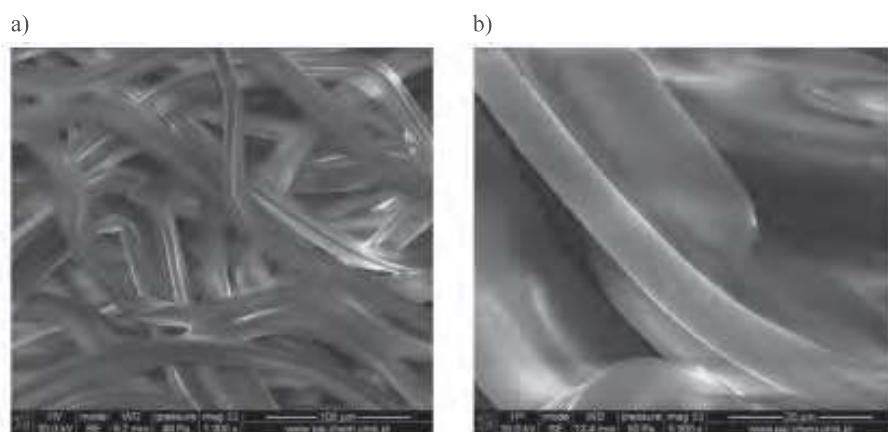


Fig. 9. Image SEM of the adsorbent CA, magnification a) 1000×, b) 5000×

Rys. 9. Zdjęcie SEM adsorbentu CA, powiększenie a) 1000× i b) 5000×

rych mógł zachodzić proces adsorpcji. Szerokość porów wynosiła ok. 0,66 μm.

Adsorbent CA nie wykazywał struktury porowatej (rys. 9). Powierzchnię zewnętrzną adsorbentu stanowiły upakowane włókna, widoczne w powiększeniu 1000×, których średnica zawierała się w przedziale 17,5–37,50 μm. Przekrój włókien polioctanu celulozy przypominał kształt płaski lub łódek. Włókna tworzyły przestrzenie

przelotowe ograniczone gęsto upakowaną włókniną. Brak było widocznych makroporów w postaci komórek otwartych. Komórki zastępowane były przez wolne przestrzenie utworzone na skutek nieregularnego upakowania włókniny, w niektórych przypadkach włókna były ze sobą połączone, prawdopodobnie w wyniku odparowania resztkowych ilości rozpuszczalnika podczas nano-przędzenia. Do adsorpcji adsorbentu zachodziło w przestrzeniach między-włóknowych.

Analiza SEM-EDX

Przeprowadzono badania analizy pierwiastkowej SEM-EDX. Badane adsorbenty charakteryzowały się znaczną zawartością węgla, tlenu oraz krzemu. Zauważalne były również śladowe ilości innych pierwiastków (rys. 10–12).

Analiza SEM-EDX wskazała, że adsorbent CA charakteryzował się znaczną zawartością takich pierwiastków, jak: tlen (71,31%) i węgiel (23,62%). Adsorbent CB18 zawierał znaczne ilości tlenu, średnio 75,63%, oraz 20,90% węgla. Adsorbent DAM zawierał w swojej strukturze 41,15% tlenu, 18,19% glinu, 17,30% krzemu i 16,82% żelaza. Wszystkie adsorbenty zawierały w swojej strukturze takie pierwiastki, jak węgiel, tlen oraz potas. W adsorbentach CA i CB18 duży udział takich pierwiastków, jak węgiel i tlen potwierdza ich charakter organiczny, przy czym CA był otrzymany syntetycznie, natomiast CB18 był pochodzenia naturalnego. Adsorbent DAM w większości składał się z tlenu, glinu i krzemu, co wskazuje na mineralne pochodzenie adsorbentu.

Podsumowanie

Oznaczono wielkość adsorpcji oleju napędowego przez trzy rodzaje adsorbentów: polioctan celulozy, mech torfowy i diatomit. Do opisu kinetyki adsorpcji wykorzystano model izotermy Langmuira, za pomocą którego scharakteryzowano właściwości adsorbentu na podstawie stałej K . Stała ta jest zależna od wielkości adsorpcji i temperatury. Najlepszymi adsorbentami były te, które wykazywały jak najmniejszą wartość stałej K w temp. 293,15 K, najczęściej stosowanej do usuwania wycieków substancji ropopochodnych. Przeanalizowano strukturę

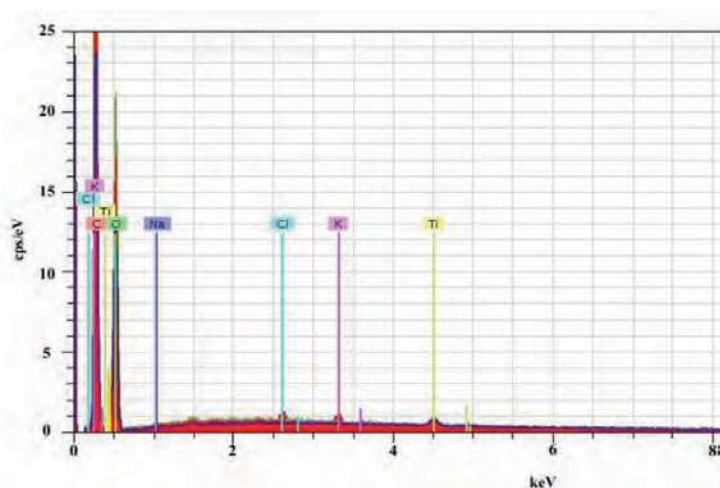


Fig. 10. SEM-EDX analysis result for CA adsorbent, magnification 70×

Rys. 10. Wynik analizy SEM-EDX dla adsorbentu CA, powiększenie 70×

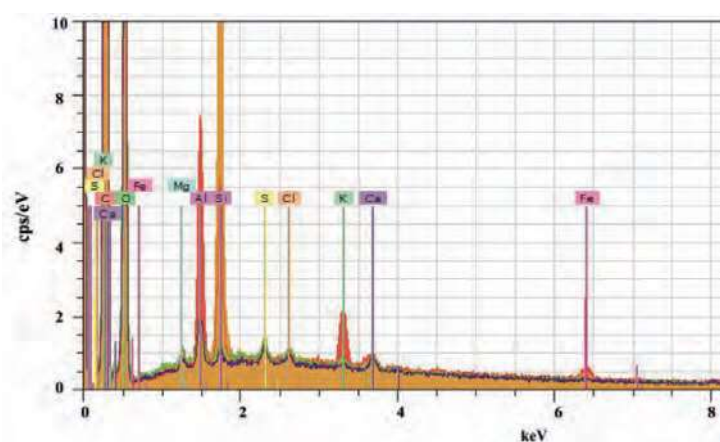


Fig. 11. SEM-EDX analysis result for CB18 adsorbent, magnification 70×

Rys. 11. Wynik analizy SEM-EDX dla adsorbentu CB18, powiększenie 70×

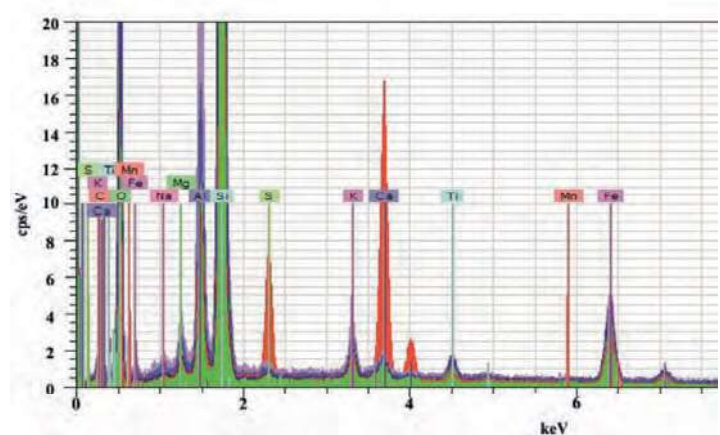


Fig. 12. SEM-EDX analysis result for DAM adsorbent, magnification 70×

Rys. 12. Wynik analizy SEM-EDX dla adsorbentu DAM, powiększenie 70×

zewnątrzną poszczególnych adsorbentów metodą mikroskopii skaningowej SEM, gdzie określono charakter porowatości adsorbentu. Wyniki badania analizy pierwiastków metodą SEM-EDX wskazują, że adsorbenty z polioctanu celulozy, mchu torfowego oraz diatomitowy charakteryzowały się znaczną zawartością węgla, tlenu oraz krzemu. Zauważalne były również śladowe ilości innych pierwiastków.

Zaproponowana metoda oceny właściwości adsorbentów może stać się skutecznym narzędziem do charakteryzowania adsorbentów wykorzystywanych do usuwania substancji ropopochodnych.

Otrzymano: 18-09-2024

Zrecenzowano: 20-09-2024

Zaakceptowano: 21-10-2024

Opublikowano: 20-11-2024

LITERATURA

- [1] R. Quintana, O. Persenaire, Y. Lemmouchi, J. Sampson, S. Martin, L. Bonnaud, P. Dubois, *Polym. Degrad. Stab.* 2013, **98**, 1556.
- [2] M. Mendrycka, K. Mucha, S. Stawarz, *Post. Mikrobiol.* 2013, **52**, nr 4, 397.
- [3] B. Rakowska, *Kosmos Probl. Nauk Biol.* 2003, **52**, nr 2–3, 259.
- [4] J. Chodorowski, Z. Salomonowicz, W. Jarosz, *Badanie skuteczności sorbentów*, Skrypt SGSP, Warszawa 2004.
- [5] V.T. Phuong, S. Verstice, P. Cinelli, I. Anguillesi, M.B. Coltelli, A. Lazzeri, *J. Renew. Mater.* 2014, **2**, nr 1, 35.
- [6] E. Gabruś, D. Downarowicz, *Inż. Ap. Chem.* 2014, **53**, nr 4, 239.
- [7] I.A. Mendelssohn, G.L. Andersen, D.M. Baltz, R.H. Caffey, K.R. Carman, J.W. Fleeger, L.P. Rozas, *BioScience* 2012, **62**, nr 6, 562.
- [8] M. Oszust, M. Barczak, A. Dąbrowski, *Adsorbenty i katalizatory. Wybrane technologie a środowisko* (red. J. Ryczkowski), Uniwersytet Rzeszowski, Rzeszów 2012.
- [9] K. Radwan, Z. Śłosarz, J. Rakowska, *Bezp. Tech. Pożarnicza* 2012, **3**, 107.
- [10] W.J. Tic, J. Guziałowska-Tic, M. Pijarowski, *Przem. Chem.* 2023, **102**, nr 9, 916.
- [11] S. Sabir, *Crit. Rev. Environ. Sci. Technol.* 2015, **45**, nr 17, 1916.
- [12] J.M. Shultz, L. Walsh, D.R. Garfin, F.E. Wilson, Y. Neria, *J. Behav. Health Serv. Res.* 2015, **42**, nr 1, 58.
- [13] M.L. Paderewski, *Procesy adsorpcyjne w inżynierii chemicznej*, WNT, Warszawa 1999.
- [14] E.Ch. Emenike, J. Adeleke, K.O. Iwuozor, S. Ogunniyi, C.A. Adeyanju, V.T. Amusa, H.K. Okoro, A.G. Adeniyi, *J. Water Proc. Eng.* 2022, **50**, 103330.
- [15] A. Vahabisani, Ch. An, *Environ. Syst. Res.* 2021, **10**, 25.
- [16] C.S. Chen, J. Su, J.F. Fu, B. Mi, T.S. Chung, *Membranes* 2013, **3**, 354.
- [17] D. Riegert i in., *Mater. Ceramiczne* 2016, **68**, nr 1, 22.
- [18] H. Ohshima, *Interface Sci. Technol.* 2024, **37**, 197.
- [19] B. Porycka, A. Koniuch, *Bezp. Tech. Pożarnicza* 2008, **1**, 113.
- [20] PN-EN 590+A1:2017-06, *Paliwa do pojazdów samochodowych. Oleje napędowe. Wymagania i metody badań*.
- [21] W.J. Tic, J. Guziałowska-Tic, *Przem. Chem.* 2022, **102**, nr 11, 1010.
- [22] P. Pijarowski, *Badania procesu adsorpcji substancji ropopochodnych przez adsorbenty używane w ratownictwie chemiczno-ekologicznym*, praca doktorska, Politechnika Świętokrzyska, Kielce 2020.