

Adsorption of haloperidol onto MCM-41 mesoporous silica

Adsorpcja haloperydolu na mezoporowatej krzemionce MCM-41



DOI: 10.15199/62.2026.6.7

Haloperidol was adsorbed from its solns. in MeCN on MCM-41 mesoporous silica. The adsorption process was described using Freundlich, Sips, and Dubinin-Astakhov models. Nonlinear fitting anal. was used to estimate the parameters of adsorption isotherms. MCM-41 silica was characterized by max. adsorption capacity of 121.5 mg/g (Dubinin-Astakhov model). The calculated adsorption energy indicated the phys. nature of haloperidol adsorption onto MCM-41 mesoporous silica.

Keywords: mesoporous substances, silica, drug adsorption, adsorption modeling

Przedstawiono wyniki badań dotyczących adsorpcji modelowego leku (haloperydolu) na mezoporowatym sicie molekularnym MCM-41 w środowisku aprotycznego rozpuszczalnika (acetonitrylu). Przeprowadzono modelowanie procesu adsorpcji za pomocą trzech modelowych izoterm adsorpcji: Freundlicha, Sipsa oraz Dubinina i Astachowa. Parametry izoterm adsorpcji wyznaczono metodą optymalizacji nieliniowej. Pojemność adsorpcyjna krzemionki MCM-41 wobec leku wyniosła 121,5 mg/g (równanie Dubinina i Astachowa). Obliczona wartość energii adsorpcji wskazuje na fizyczny charakter oddziaływań leku z powierzchnią adsorbentu.

Słowa kluczowe: substancje mezoporowate, krzemionka, adsorpcja leków, modelowanie adsorpcji

Krzemionka MCM-41 (*mobile composition of matter*) została otrzymana i scharakteryzowana prawie 35 lat temu przez zespół Kresgego i współpracowników¹⁾. Odkrycie to, znaczące z punktu widzenia chemii materiałowej i katalizy, zapoczątkowało dynamiczny rozwój chemii mezoporowatych sit molekularnych. Wkrótce otrzymano wiele porowatych struktur, takich jak: MSU-1 (1995 r.), SBA-15 (1998 r.), MCF (1999 r.), PHTS (2002 r.), COF (2005 r.) oraz innych substancji stanowiących klasę materiałów mezoporowatych²⁻³⁾. Te ostatnie to struktury sklasyfikowane przez IUPAC jako substancje porowate o średnicy porów w zakresie 2–50 nm⁴⁾. Krzemionka MCM-41 odznacza się unikatowymi właściwościami fizykochemicznymi, takimi

jak znaczna powierzchnia właściwa rzędu 1000 m²/g, heksagonalne uporządkowanie cylindrycznych porów o nanometrycznej średnicy (struktura plastra miodu) oraz możliwość modyfikacji powierzchni różnymi czynnikami^{2, 5)}. Adsorbent MCM-41 był także historycznie pierwszym⁶⁾ (2001 r.) mezoporowatym nośnikiem leku, zastosowanym w układzie dostarczania substancji czynnych (*drug delivery system*). Jego właściwości adsorpcyjne oraz sitowe sprawiły, że znalazł on także zastosowanie jako nośnik takich substancji biologicznie czynnych, jak kwas syringowy⁷⁾, tikagrelor⁸⁾, tiwozanib⁹⁾ i fenofibrat¹⁰⁾.

Celem pracy było określenie właściwości adsorpcyjnych mezoporowatego sita MCM-41 wobec halopery-



Mgr Karolina KAMASA ukończyła studia farmaceutyczne na Wydziale Farmaceutycznym Uniwersytetu Medycznego im. K. Marcinkowskiego w Poznaniu. Obecnie jest doktorantką Szkoły Doktorskiej Pomorskiego Uniwersytetu Medycznego w Szczecinie. Pracę doktorską realizuje w Zakładzie Chemii Farmaceutycznej PUM w Szczecinie.



Dr hab. n. farm. Małgorzata GESZKE-MORITZ (ORCID: 0000-0001-5643-0040) w roku 2008 ukończyła studia farmaceutyczne na Wydziale Farmaceutycznym Uniwersytetu Medycznego im. K. Marcinkowskiego w Poznaniu. W 2011 r. uzyskała stopień doktora nauk farmaceutycznych, a w 2019 r. stopień doktora habilitowanego nauk farmaceutycznych na tym samym wydziale. Obecnie jest kierownikiem Zakładu Farmakognozji i Naturalnych Środków Leczniczych na Wydziale Farmacji, Biotechnologii Medycznej i Medycyny Laboratoryjnej Pomorskiego Uniwersytetu Medycznego w Szczecinie. Specjalność – synteza i właściwości kropek kwantowych, biomedyczne zastosowania nanomateriałów, zastosowania materiałów mezoporowatych w systemach dostarczania substancji leczniczych, adsorpcja związków biologicznie czynnych pochodzenia roślinnego.

*** Adres do korespondencji:**

Zakład Farmakognozji Naturalnych Środków Leczniczych, Wydział Farmacji, Biotechnologii Medycznej i Medycyny Laboratoryjnej, Pomorski Uniwersytet Medyczny w Szczecinie, pl. Polskiego Czerwonego Krzyża 1, 71-251 Szczecin, tel.: (91) 815-10-12, e-mail: malgorzata.geszke.moritz@pum.edu.pl

dolu jako modelowej substancji leczniczej. Haloperydol, 4-[4-(*p*-chlorofenylo)-4-hydroksypiperydino]-4'-fluorobutyrofenon (rys. 1A), jest lekiem przeciwpsychotycznym stosowanym w leczeniu schizofrenii¹¹⁾ oraz majaczeń¹²⁾. Poza wskazaniami psychiatrycznymi badana jest także jego skuteczność w leczeniu chorób nowotworowych¹¹⁾.

W pracy przeprowadzono modelowanie procesu adsorpcji haloperydolu z zastosowaniem równania Freundlicha oraz izoterm trójparametrowych wg Sipsa oraz Dubinina i Astachowa. Przeprowadzone badania miały na celu określenie charakteru oddziaływania cząsteczek haloperydolu z powierzchnią mezoporowatego sita MCM-41 oraz oszacowanie jego pojemności adsorpcyjnej wobec substancji czynnej. Badania te są istotne podczas opracowania nowych układów dostarczania substancji leczniczych, w których krzemionka pełni funkcję substancji pomocniczej (nośnik leku).

Część doświadczalna

Materiały

Stosowano haloperydol ($\geq 98\%$) oraz krzemionkę MCM-41 zakupione w firmie Merck. Podczas badań jako środowisko adsorpcji stosowano acetonitryl (cz.d.a.) marki Avantor Performance Materials Poland.

Metodyka badań

Proces adsorpcji haloperydolu prowadzono w temp. 25°C, stosując proporcję 0,0500 g krzemionki na 0,005 dm³ roztworu leku rozpuszczonego w acetonitrylu (rozpuszczalnik aprotynowy). Zastosowanie takiego środowiska promuje adsorpcję substancji o charakterze słabych zasad organicznych na powierzchni krzemionek, czego dowiedziano podczas wcześniejszych badań^{13,14)}. Podczas procesu adsorpcji początkowe stężenia leku mieściły się w granicach 135–2200 mg/dm³. Ilość zaadsorbowanej substancji leczniczej (Q_e , mg/g) w stanie równowagi adsorpcyjnej oraz wydajność procesu adsorpcji (W , %) obliczono z równań odpowiednio (1) i (2):

$$Q_e = \frac{(C_0 - C_e) \cdot V}{m} \quad (1)$$

$$W = \left(\frac{C_0 - C_e}{C_0} \right) \cdot 100\% \quad (2)$$



Dr hab. n. farm. Michał MORITZ (ORCID: 0000-0003-1784-4325) w roku 2007 ukończył studia biotechnologiczne na Wydziale Biologii Uniwersytetu im. A. Mickiewicza w Poznaniu, a w 2008 r. studia farmaceutyczne na Wydziale Farmaceutycznym Uniwersytetu Medycznego im. K. Marcinkowskiego w Poznaniu. W 2011 r. uzyskał stopień doktora nauk chemicznych na Wydziale Chemii Uniwersytetu im. A. Mickiewicza w Poznaniu, a w 2018 r. stopień doktora habilitowanego nauk farmaceutycznych na Uniwersytecie Medycznym w Białymstoku. Obecnie jest kierownikiem Zakładu Chemii Farmaceutycznej na Wydziale Farmacji, Biotechnologii Medycznej i Medycyny Laboratoryjnej Pomorskiego Uniwersytetu Medycznego w Szczecinie.

Specjalność – synteza i właściwości materiałów mezoporowatych, modelowanie procesów adsorpcji, systemy dostarczania substancji leczniczych, biomedyczne zastosowania nanomateriałów, adsorpcja substancji biologicznie czynnych.

w których C_0 i C_e oznaczają stężenie odpowiednio początkowe oraz równowagowe adsorbentu, mg/dm³, V objętość roztworu, dm³, a m masę sorbentu, g.

Dane doświadczalne będące zależnością $Q_e = f(C_e)$ opisano za pomocą 3 modelowych równań adsorpcji: Freundlicha (3), Sipsa (4) oraz Dubinina i Astachowa (5)^{15–17)}:

$$Q_e = K_F \cdot C_e^{1/n_F} \quad (3)$$

$$Q_e = \frac{Q_{max(S)} \cdot K_S \cdot C_e^{1/n_S}}{1 + K_S \cdot C_e^{1/n_S}} \quad (4)$$

$$Q_e = Q_{max(DA)} \cdot \exp \left[- \left(\frac{R \cdot T \cdot \ln(C_S/C_e)}{\sqrt{2} \cdot E_{DA}} \right) \right]^{n_{DA}} \quad (5)$$

w których $Q_{max(S)}$, $Q_{max(DA)}$ oznaczają maksymalną pojemność adsorpcyjną adsorbentu, mg/g, wyznaczoną z równania odpowiednio izoterm Sipsa oraz Dubinina i Astachowa, K_F i K_S oznaczają stałe występujące w równaniu odpowiednio Freundlicha, mg^{1-1/n_F}dm^{3/n_F}/g, oraz Sipsa, (dm³/mg)^{1/n_S}, wykładniki $1/n_F$, $1/n_S$, n_{DA} występują w równaniach izotermi odpowiednio Freundlicha, Sipsa oraz Dubinina i Astachowa, E_{DA} oznacza średnią energię adsorpcji, J/mol, oszacowaną na podstawie modelu Dubinina i Astachowa, a C_S , R , T oznaczają odpowiednio rozpuszczalność adsorbentu, mg/dm³, stałą gazową, J/mol · K, i temperaturę, K.

Dopasowanie nieliniowych form równań adsorpcji (3)–(5) przeprowadzono metodą optymalizacji, stosując wartość średniego błędu względnego ARE (*average relative error*) jako kryterium dopasowania (funkcja błędu). Podczas wyznaczania wartości parametrów modeli adsorpcji dążono do minimalizacji wartości funkcji ARE, wyrażonej wzorem (6)¹⁵⁾:

$$ARE = \frac{100}{n} \sum_{i=1}^n \left| \frac{Q_{e,doś} - Q_{e,obl}}{Q_{e,doś}} \right|_i \quad (6)$$

w którym $Q_{e,obl}$ oraz $Q_{e,doś}$ oznaczają odpowiednio obliczoną oraz rzeczywistą (doświadczalną) ilość zaadsorbowanego haloperydolu, mg/g, a parametr n określa liczbę punktów pomiarowych izotermi.

Właściwości powierzchniowe mezoporowatej krzemionki MCM-41 wyznaczono metodą niskotemperaturowej adsorpcji azotu (analyzer Autosorb iQ Quantachrome Instruments). Powierzchnię właściwą adsorbentu wyznaczono z izotermi BET podczas adsorpcji azotu w zakresie ciśnienia względnego (p/p_0) $9,97 \cdot 10^{-2}$ – $2,99 \cdot 10^{-1}$. Objętość porów krzemionki, rozkład objętości porów, a także ich średnicę oszacowano metodą BJH, korzystając z izotermi desorpcji azotu. Ilościowe oznaczenia haloperydolu podczas badań adsorpcji przeprowadzono metodą spektrofotometryczną (spektrofotometr UV-Vis JASCO V-750) poprzez pomiar absorbancji roztworu leku ($\lambda = 221$ nm, kuweta kwarcowa, 1 cm). Pomiary spektrofotometryczne przeprowadzono po uprzednim wirowaniu zawiesiny krzemionki

Table 1. Parameters of various model isotherms for adsorption of haloperidol onto MCM-41 mesoporous silica

Tabela 1. Parametry modelowych izoterm oszacowane dla adsorpcji haloperydolu na krzemionce MCM-41

Izoterma adsorpcji	Parametr	Wartość
Freundlicha	K_F , $\text{mg}^{1-1/n}\text{dm}^{3/n}/\text{g}$	3,2498
	n_F	1,993
	ARE, %	5,63
Sipsa	$Q_{\text{max}(S)}$, mg/g	711,3
	K_{S^*} , $(\text{dm}^3/\text{mg})^{1/n_S}$	$3,783 \cdot 10^{-3}$
	n_S	1,815
	ARE, %	5,60
Dubinina i Astachowa	$Q_{\text{max}(DA)}$, mg/g	121,5
	E_{DA} , kJ/mol	5,0
	n_{DA}	1,391
	ARE, %	6,33

(wirówka MPW-260, 4200 g, 12 min) w celu sedymentacji cząstek adsorbentu oraz rozcieńczenia nadsącza.

Wyniki badań i ich omówienie

Wyniki badań niskotemperaturowej adsorpcji i desorpcji azotu na krzemionce MCM-41 w postaci stosownych izoterm przedstawiono na rys. 1B. Były to izotermy typu IV, charakterystyczne dla substancji mezoporowatych, bez wyraźnie zaznaczonej pętli histerezy, co wynikało z małej średnicy porów^{5, 18} adsorbentu MCM-41. Krzemionka MCM-41 charakteryzowała się powierzchnią właściwą wynoszącą 1064 m^2/g oraz całkowitą objętością porów 0,83 cm^3/g . Średnica porów wyniosła 3,9 nm (metoda BJH), co odzwierciedlało rozkład objętości porów przedstawiony na rys. 1B. Otrzymane wyniki badań teksturalnych były typowe dla struktury MCM-41⁵.

Na rys. 2A przedstawiono izotermę adsorpcji haloperydolu na badanym adsorbencie. Izotermę charakteryzowało łagodne nachylenie w całym zakresie stężeń równowagowych adsor-

batu, bez wyraźnie zaznaczonego odcinka *plateau* świadczącego o wysyceniu centrów adsorpcji. Kształt izotermy był charakterystyczny dla procesów o charakterze adsorpcji fizycznej, co znalazło potwierdzenie w dobrym dopasowaniu modelu adsorpcji wg Freundlicha (błąd ARE 5,63%). Spośród stosowanych modeli adsorpcji izoterma Sipsa charakteryzowała się najlepszym dopasowaniem (najmniejsza wartość funkcji błędu ARE, 5,60%). W przypadku tego modelu adsorpcji oszacowana wartość maksymalnej pojemności adsorpcyjnej krzemionki MCM-41 wobec leku była znaczna i wyniosła 711,3 mg/g , co również mogło potwierdzać fizyczny charakter adsorpcji (adsorpcja wielowarstwowa). Z kolei model adsorpcji wg Dubinina i Astachowa wskazywał na pojemność adsorpcyjną krzemionki wynoszącą 121,5 mg/g . Wartość ta była zbliżona do rzeczywistej ilości haloperydolu zaadsorbowanego na krzemionce MCM-41 w warunkach największych doświadczalnych stężeń równowagowych leku. Parametry izoterm adsorpcji (3)–(5) oszacowane z zastosowaniem funkcji błędu ARE zastawiono w tabeli 1, a ich przebieg zaprezentowano na rys. 2B. Warto zaznaczyć, że wszystkie zastosowane modele matematyczne charakteryzowały się dobrym dopasowaniem oraz podobną wartością funkcji błędu ARE. Wydajność adsorpcji haloperydolu odpowiadająca najmniejszemu ($C_0 = 135 \text{ mg}/\text{dm}^3$) oraz największemu ($C_0 = 2200 \text{ mg}/\text{dm}^3$) początkowemu stężeniu leku wyniosła odpowiednio 88,5 oraz 49,7%. Wydajność adsorpcji malała wraz ze wzrostem początkowego stężenia adsorbentu (rys. 1B).

Model adsorpcji wg Dubinina i Astachowa umożliwił także oszacowanie średniej energii adsorpcji haloperydolu na krzemionce MCM-41. Wartość tego parametru wyniosła 5,0 kJ/mol , co potwierdza fizyczny¹⁹ charakter oddziaływań cząsteczek leku z powierzchnią mezoporowatego sita molekularnego. Haloperydol jest słabą zasadą organiczną zawierającą III-rz. atom azotu w podstawionym pierścieniu piperydyny (rys. 1A). Powstanie oddziaływań pomiędzy krzemionką a słabymi zasadami organicznymi uwarunkowane jest obecnością kwasowych centrów adsorpcji w postaci wolnych grup silanolowych na powierzchni tego adsorbentu²⁰. W celach porównawczych w tabeli 2

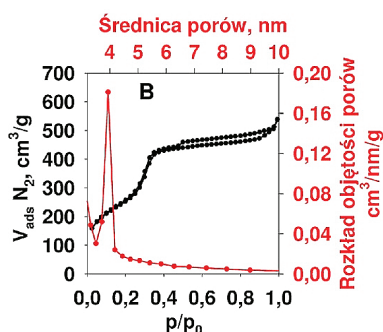
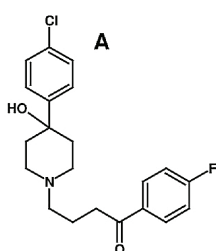


Fig. 1. (A) Chemical structure of haloperidol; (B) nitrogen adsorption-desorption isotherm and pore size distribution of MCM-41 silica

Rys. 1. (A) Wzór strukturalny cząsteczki haloperydolu; (B) izoterma adsorpcji-desorpcji azotu oraz rozkład objętości porów krzemionki MCM-41

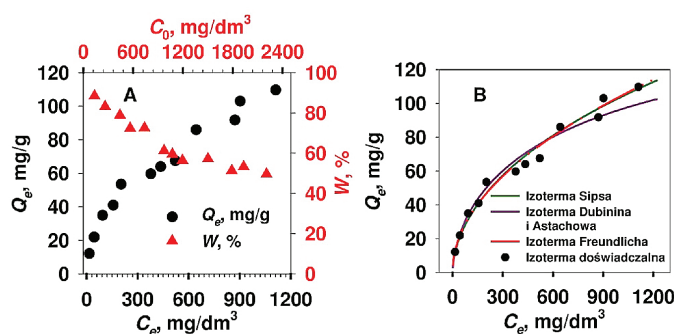


Fig. 2. (A) Adsorption isotherm and adsorption efficiency of haloperidol onto MCM-41 mesoporous silica; (B) comparison of experimental and predicted adsorption isotherms of haloperidol onto MCM-41 silica

Rys. 2. (A) Izoterma adsorpcji oraz wydajność adsorpcji haloperydolu na krzemionce MCM-41; (B) porównanie doświadczalnej izotermy adsorpcji haloperydolu na krzemionce MCM-41 z modelowymi izotermami

Table 2. Parameters of Dubinin-Astakhov isotherm for adsorption of various weak organic bases onto MCM-41 mesoporous silica in acetonitrile solution

Tabela 2. Parametry izotermy Dubinina i Astachowa oszacowane dla adsorpcji słabych zasad organicznych na krzemionce MCM-41 w środowisku acetonitrylu

Adsorbowana substancja czynna	pK_a	Masa molowa, g/mol	$Q_{max(DA)}$, mg/g	E_{DA} , kJ/mol	Funkcja błędu	Wartość funkcji błędu, %	Literatura
Terfenadyna	9,5	471,7	223,9	6,2	MPSD	5,39	22, 23
Lidokaina	7,9	234,3	238,1	5,7	ARE	4,14	24, 25
Cynaryzyna	7,4	368,5	212,2	2,7	ARE	4,41	26, 27
Boldyna	6,9	327,4	228,1	5,4	ARE	7,70	28, 29

MPSD (Marquardt's percent standard deviation) – odchylenie standardowe Marquardta

zestawiono wyniki modelowania (izoterma Dubinina i Astachowa) procesu adsorpcji różnych substancji leczniczych o charakterze słabych zasad organicznych na krzemionce MCM-41 w środowisku acetonitrylu. Podano również masę molową adsorbowanych substancji leczniczych oraz ich stałą dysocjacji wyrażoną jako pK_a . Haloperydol odznacza się masą molową oraz wartością pK_a odpowiednio 375,9 g/mol oraz 8,5⁽²¹⁾. Krzemionka MCM-41 charakteryzuje się 2-krotnie mniejszą pojemnością adsorpcyjną wobec haloperydolu aniżeli wobec wyszczególnionych substancji leczniczych. W tym przypadku pojemność adsorpcyjna krzemionki nie była związana z masą molową adsorbentu. Należy jednak zaznaczyć, że energia adsorpcji substancji była związana ze stałą dysocjacji zasad organicznych (im silniejsza zasada, tym na ogół większa wartość energii adsorpcji).

Podsumowanie

Podczas przeprowadzonego modelowania adsorpcji haloperydolu na krzemionce MCM-41 wykazano, że wszystkie stosowane modele matematyczne dobrze opisują ten proces. Sito molekularne MCM-41 charakteryzowało się pojemnością adsorpcyjną wobec haloperydolu wynoszącą 121,5 mg/g (model Dubinina i Astachowa). Wartość tego parametru była zdecydowanie mniejsza niż dla innych substancji leczniczych adsorbowanych na krzemionce MCM-41 w tych samych warunkach eksperymentalnych (lidokaina, cynaryzyna, boldyna; model Dubinina i Astachowa). Oszacowana wartość energii adsorpcji haloperydolu (5,0 kJ/mol, model Dubinina i Astachowa) wskazuje na fizyczną naturę oddziaływań cząsteczek leku z powierzchnią niemodyfikowanego adsorbentu MCM-41. Wobec otrzymanych wyników badań można stwierdzić, że adsorbent MCM-41 odznacza się umiarkowaną pojemnością adsorpcyjną wobec haloperydolu, co w przypadku zastosowania krzemionki jako nośnika wymagać będzie stosowania jej w większej ilości.

Badania sfinansowano ze środków MEiN (w 2026 r.) w ramach projektu nr WFB-405/S/2026 realizowanego na Wydziale Farmacji, Biotechnologii Medycznej i Medycyny Laboratoryjnej Pomorskiego Uniwersytetu Medycznego w Szczecinie.

Otrzymano: 22-05-2026

Zrecenzowano: 25-05-2026

Zaakceptowano: 27-05-2026

Opublikowano: 18-06-2026

LITERATURA

- [1] C.T. Kresge, M.E. Leonowicz, W.J. Roth, J.C. Vartuli, J.S. Beck, *Nature* 1992, **359**, 710.
- [2] M. Moritz, M. Geszke-Moritz, *Mater. Sci. Eng. C* 2015, **49**, 114.
- [3] M. Moritz, *Przem. Chem.* 2013, **92**, nr 12, 2300.
- [4] K.S.W. Sing, D.H. Everett, R.A.W. Haul, L. Moscou, R.A. Pierotti, J. Rouqu erol, T. Siemieniowska, *Pure Appl. Chem.* 1985, **57**, 603.
- [5] V. Meynen, P. Cool, E.F. Vansant, *Micropor. Mesopor. Mater.* 2009, **125**, 170.
- [6] M. Vallet-Regi, A. Ramila, R.P. del Real, J. Perez-Pariente, *Chem. Mater.* 2001, **13**, 308.
- [7] M. Geszke-Moritz, M. Moritz, *Przem. Chem.* 2019, **98**, nr 4, 650.
- [8] M. Moritz, M. Geszke-Moritz, *Materials* 2020, **13**, 2913.
- [9] S. Siddheshwar, S. Jejurkar, A. Ghorpade, S. Mankar, *Next Nanotechnol.* 2026, **9**, 100402.
- [10] M. More, M. Vinjamur, M. Mukhopadhyay, *Chem. Eng. Process. Process Intensif.* 2025, **208**, 110128.
- [11] V. Consoli, V. Sorrenti, S. Saccone, C. Federico, F. Bruno, D.A. Cristaldi, V. Pittala, S. Intagliata, L. Vanella, *Sci. Rep.* 2025, **15**, 26948.
- [12] S.-L. Cheng, T.-W. Hsu, Y.-C. Kao, C.-L. Yu, T. Thompson, A.F. Carvalho, B. Stubbs, P.-T. Tseng, C.-W. Hsu, F.-C. Yang, Y.-K. Tu, C.-S. Liang, *Crit. Care* 2025, **29**, 126.
- [13]  . Kaszyński, M. Geszke-Moritz, M. Moritz, A. Dadej, A. Jelińska, *Przem. Chem.* 2018, **97**, nr 8, 1387.
- [14] M. Moritz, *Appl. Surf. Sci.* 2013, **283**, 537.
- [15] K.Y. Foo, B.H. Hameed, *Chem. Eng. J.* 2010, **156**, 2.
- [16] V.J. Inglezakis, *Micropor. Mesopor. Mater.* 2007, **103**, 72.
- [17] G. Mladin, M. Ciopec, A. Negrea, N. Duteanu, P. Negrea, P. Ianasi, C. Ianasi, *Materials* 2022, **15**, 5366.
- [18] C.G. Sonwane, P.J. Ludowice, *J. Mol. Catal. A: Chem.* 2005, **238**, 135.
- [19] A. Iriel, S.P. Bruneel, N. Schenone, A.F. Cirelli, *Ecotoxicol. Environ. Saf.* 2018, **149**, 166.
- [20] D. Liu, G. Ma, H.C. Allen, *Environ. Sci. Technol.* 2005, **39**, 2025.
- [21] M.M. Al Omari, M.B. Zughul, J.E.D. Davies, A.A. Radwan, *J. Solut. Chem.* 2009, **38**, 669.
- [22] M. Geszke-Moritz, M. Moritz, *Przem. Chem.* 2022, **101**, nr 7, 470.
- [23] M.M. Al Omari, M.B. Zughul, J.E.D. Davies, A.A. Radwan, *J. Incl. Phenom. Macrocycl. Chem.* 2007, **58**, 227.
- [24] M. Moritz, A. Szkołut, M. Geszke-Moritz, *Przem. Chem.* 2025, **104**, nr 9, 904.
- [25] F. Hasanpous, M. Budai-Sz ucs, A. M. Kov acs, R. Ambrus, O. J j art-Laczkovich, B. Szalai, B. Pali c, P. Simon, L. T rteli, S. Berk , *Pharmaceutics* 2025, **17**, 324.
- [26] M. Geszke-Moritz, K. Chmiel, M. Moritz, *Przem. Chem.* 2023, **102**, nr 8, 799.
- [27] M.B.M. Mohamed, G. Hameed, M.N. Sahib, Z. Kadoori, H.S. Mahmood, A.A. Khudhair, *Gels* 2026, **12**, 58.
- [28] M. Geszke-Moritz, A. Stoinska, M. Moritz, *Przem. Chem.* 2023, **102**, nr 7, 722.
- [29] C.I. C mara, C.A. Bornancini, J.L. Cabrera, M.G. Ortega, L.M. Yudi, *Talanta* 2010, **83**, 623.