

**Kazimierz GARBULEWSKI, Joanna FRONCZYK,
Małgorzata LESZCZYŃSKA**

Katedra Geoinżynierii SGGW w Warszawie
Department of Geotechnical Engineering WULS – SGGW

Powierzchnia właściwa – podstawowy parametr charakterystyki materiałów reaktywnych Specific surface area – basic parameter of reactive material's characteristics

Słowa kluczowe: powierzchnia właściwa, metoda adsorpcji błękitu metylenowego, zeolit, mieszanki zeolitowo-piaskowe

Key words: specific surface area, method of methylene blue adsorption, zeolite, zeolite-sand mixtures

Wprowadzenie

Powierzchnia właściwa to suma powierzchni wewnętrznych i zewnętrznych cząstek i ziaren w 1 g suchej masy gruntu (Myślińska 2003). Przez wielu badaczy (np. Jumikis 1984, Carter i in. 1986) uznawana jest za parametr decydujący o właściwościach i zachowaniu się gruntów, jak również o przebiegu procesów zachodzących w strefie styku cząstek i ziaren z wodą lub roztworem wypełniającym pory gruntowe. Jest to jedna z podstawowych miar właściwości sorpcyjnych adsorbentów. Takie procesy, jak adsorpcja, absorpcja i wymiana jonowa, które prowadzą do samooczyszczania

środowiska gruntowo-wodnego, zachodzą tym intensywniej, im większa jest powierzchnia kontaktu pomiędzy fazami stałą i płynną ośrodka gruntowego, czyli im większa jest powierzchnia właściwa gruntu. Wielkość porów wewnętrznych determinuje dostępność wewnętrznej powierzchni właściwej dla molekuł substancji zanieczyszczających. Powierzchnia wewnętrzna niektórych minerałów jest wielokrotnie większa od powierzchni zewnętrznej, np. w przypadku smektytów powierzchnie te wynoszą odpowiednio 700–850 i 50–120 m²·g⁻¹ (Yukselen i in. 2006). Według Yonga i in. (1996), takie parametry jak zdolność wymiany kationów (CEC), zdolność sorpcyjna i powierzchnia właściwa, powinny być wzięte pod uwagę w wyborze materiałów ilastych do wykonania uszczelnień składowisk odpadów. Podobną opinię wyraził Brandl (1992), który zaleca stosowanie do uszczelnień składowisk odpadów inżynierskiej ba-

riery wielowarstwowej, tzn. złożonej z materiałów ilastych o różnej zdolności wymiany jonowej w stosunku do odcieków; w dolnej warstwie zawierającej bentonit sodowy, powyżej wapniowy, illit lub kaolinit i najwyżej organolubny bentonit.

Z tego krótkiego przeglądu wynika, że powierzchnia właściwa, wpływająca na tak wiele procesów, powinna być włączona do podstawowych parametrów charakterystyki gruntów.

W niniejszym artykule, po przeglądzie metod określania powierzchni właściwej, podano opis metodyki badań i zastosowanie metody adsorpcji błękitu metylenowego (PN-88/B-04481) do określenia powierzchni właściwej zeolitu i mieszanek zeolitowo-piaskowych, proponowanych do zastosowania w przepuszczalnych barierach reaktywnych. Wyniki badań metodą normową porównano z wynikami badań metodą niskotemperaturowej adsorpcji azotu, którą uznaje się powszechnie za tzw. metodę standardową.

Praca naukowa finansowana ze środków na naukę w latach 2005–2008 nr 2P04G 088 29

Metody badań powierzchni właściwej

Metody badania powierzchni właściwej stosowane najczęściej w praktyce to metody adsorpcyjno-desorpcyjne, wykorzystujące zjawiska występujące na granicach faz: ciało stałe – ciecz, ciało stałe – gaz. W metodach tych stosowane są: azot, para wodna, gazy szlachetne, pary benzenu, cykloheksanu i inne, oraz glikol etylenowy, gliceryna i ich pary, barwniki

i jony w roztworze np. błękit metylenowy. Ilość gazu zaadsorbowanego na powierzchni badanego materiału jest miarą jego powierzchni właściwej. Langmuir (1918, za Yukselen i in. 2006) (do opisu adsorpcji gazowej) zaproponował następujące równanie, którego postać liniowa jest następująca:

$$P/V = 1/k_2 \cdot V_m + P/V_m \quad (1)$$

gdzie:

P – ciśnienie gazu,

V – objętość gazu (w warunkach standardowych ciśnienia i temperatury) adsorbowana przez gram gruntu (adsorbent),

k_2 – stała materiałowa,

V_m – objętość gazu (w warunkach standardowych ciśnienia i temperatury) na gram gruntu w chwili powstania ciągłej pojedynczej warstwy molekuł na powierzchni cząstek gruntu.

Równanie Langmuira jest ważne, gdy na powierzchni cząstki badanego materiału, np. gruntu, adsorbowana jest tylko jedna warstwa molekuł oraz pod warunkiem, że podczas adsorpcji ciepło jest jednorodnie rozłożone (Carter i in. 1986). Warunki te nie zawsze odpowiadają rzeczywistemu przebiegowi sorpcji w badanym materiale, w związku z tym wyniki mogą być niepewne.

Brunauer, Emmet i Teller (1938) zaproponowali równanie, nazywane powszechnie równaniem BET, które na podstawie teorii adsorpcji wielocząsteczkowej pozwala obliczyć liczbę cząsteczek adsorbentu w warstwie korzystając z jego liniowej postaci:

$$P/V(P_o - P) = (1/V_m \cdot C) + [(C - 1)P/V_m \cdot C \cdot P_o] \quad (2)$$

gdzie:

V – objętość gazu (w warunkach standardowych ciśnienia i temperatury) zaadsorbowanego przy ciśnieniu równowagowym P ,

V_m – objętość gazu (w warunkach standardowych ciśnienia i temperatury) potrzebna do utworzenia pojedynczej warstwy molekuł,

P_o – ciśnienie pary nasyconej w temperaturze eksperymentu,

$C = \exp [E_1 - E_2]RT$ (E_1 i E_2 – odpowiednio, ciepło adsorpcji pierwszej warstwy adsorbentu i ciepło skraplania gazu, R i T – stała gazowa i temperatura absolutna).

Równanie BET jest odpowiednie do określania powierzchni właściwej przy wartości P/P_o w zakresie 0,05 – 0,45 (Carter i in. 1986); inni autorzy podają dużo mniejsze wartości, nawet do 0,2. Powierzchnia właściwa obliczana jest jako iloczyn V_m i powierzchni przekroju (zajmowanej w monowarstwie) molekuły ze wzoru:

$$A_s = \frac{V_m}{V_{molecule}} A_{molecule} \quad (3)$$

gdzie:

$V_{molecule}$ – objętość adsorbowanej cząsteczki,

$A_{molecule}$ – pole przekroju poprzecznego adsorbowanej cząsteczki.

Zaletą metody wykorzystującej błękit metylenowy, wprowadzonej przez Pharma i Brindleya (1970), jest w pełni hydratyzowany system w czasie adsorpcji. Błękit metylenowy jest barwnikiem o wzorze chemicznym $C_{16}H_{18}ClN_3S$ i masie molowej $319,87 \text{ g}\cdot\text{mol}^{-1}$. W roztworach wodnych ma on formę kationu $C_{16}H_{18}N_3S^+$, który łączy się z ujemnie

naładowaną powierzchnią badanego materiału, np. iłu. Prostokątne cząsteczki błękitu metylenowego o wymiarach w przybliżeniu równych: $17\text{Å} \times 7,6\text{Å} \times 3,25\text{Å}$, mogą przyłączać się do minerałów na różne sposoby. W metodzie przyjmuje się, że cząsteczki błękitu przylegają do powierzchni minerału płasko, ścianą o największych wymiarach. Wówczas powierzchnia pokryta przez pojedynczą cząsteczkę barwnika wynosi około 130Å^2 . Powierzchnię właściwą S_s określa się na podstawie ilości zaadsorbowanego błękitu metylenowego, ocenianej metodą miareczkową lub plamkową, według wzoru:

$$S_s = \frac{1}{319,87} \frac{1}{200} (0,5N) A_V A_{MB} \frac{1}{10} \quad (4)$$

gdzie:

N - liczba dodanych kropli błękitu,

A_V – liczba Avogadro ($6,02 \cdot 10^{23} \cdot \text{mol}^{-1}$),

A_{MB} – powierzchnia pokryta przez jedną cząsteczkę błękitu 130Å .

Jak wynika z badań gruntów drobnoziarnistych, których wyniki zestawiono w tabeli 1 (Yukselen i in. 2006), wartości powierzchni właściwej zależą od metody badań, a różnice mogą sięgać 100 i więcej procent. Poza gruntami mineralnymi, w których składzie mineralnym dominował kaolinit (próbki 1–4) i montmorylonit (próbki 11–16), badania wykonano również dla gruntów o zawartości frakcji ilastej 32,0–35,5% z dominującym udziałem zeolitów (próbki 6 i 7). Dla próbki 6 o aktywności 0,32 określono wartości powierzchni właściwej wynoszące $122,1$ i $136,8 \text{ m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$, odpowiednio przy stosowaniu metody miareczkowej błękitu metylenowego i plamkowania tej samej substancji oraz

TABELA 1. Powierzchnie właściwe (S_s) w $m^2 \cdot g^{-1}$ materiałów drobnoziarnistych określone metodą sorpcyjną błękitu metylenowego przez miareczkowanie (SBMM) i plamkowanie (SBMP) oraz zastosowanie azotu (N_2) i eteru etylenowo glikolowo monoetylowego (EGME), Yukselen i in. (2006)

TABLE 1. Specific surface areas (S_s in $m^2 \cdot g^{-1}$) of fine-grained soils obtained using MB-titration (SBMM), MB-Spot test (SBMP), N_2 adsorption and EGME methods, acc. to Yukselen et al. (2006)

| Nr próbki No of soil sample | Fracja ilasta (%)/ aktywność (-) Clay fraction (%) / activity | Metody sorpcji błękitu metylenowego (S_s całkowita) MB adsorption (total S_s) | | Adsorpcja N_2 (S_s zewnętrzna) N_2 adsorption (external S_s) | EGME (S_s całkowita) EGME metod (total S_s) |
|-----------------------------------|---|---|-------|---|--|
| | | SBMM | SBMP | | |
| 1 | 32,5/0,43 | 48,9 | 57,6 | 56,4 | 105,7 |
| 2 | 44/- | 6,1 | 14,4 | 6,9 | 29,8 |
| 3 | 38/0,26 | 12,2 | 26,4 | 20,8 | 37,1 |
| 4 | 42/0,53 | 12,2 | 21,6 | 10,1 | 25,5 |
| 5 | 28/0,83 | 61,0 | 79,2 | 93,5 | 135,1 |
| 6 | 35,5/0,32 | 122,1 | 136,8 | 34,3 | 149,0 |
| 7 | 32/0,19 | 47,1 | 54,0 | 32,0 | 69,8 |
| 8 | 21/0,31 | 18,3 | 26,4 | 5,3 | 34,9 |
| 9 | 77/0,49 | 84,9 | 106,8 | 25,3 | 94,8 |
| 10 | 46/0,94 | 73,4 | 100,8 | 15,5 | 62,4 |
| 11 | 82/0,65 | 244,1 | 364,8 | 56,7 | 299,1 |
| 12 | 75/0,54 | 158,3 | 168,0 | 36,4 | 104,3 |
| 13 | 90/4,63 | 850,9 | 720,0 | 51,9 | 578,1 |
| 14 | 56,8/1,23 | 704,6 | 753,6 | 11,2 | 393,4 |
| 15 | 80/3,51 | 777,5 | 768,0 | 28,7 | 442,0 |
| 16 | 90/3,82 | 948,8 | 912,0 | 21,5 | 582,3 |

149,0 $m^2 \cdot g^{-1}$ z metody EGME (eter etylenowo glikolowo monoetylowy). Dla próbki 7 o aktywności 0,19 wartości powierzchni właściwej są znacznie mniejsze i wynoszą: 47,1; 54,0 i 69,8 $m^2 \cdot g^{-1}$ odpowiednio przy stosowaniu trzech wymienionych metod badań.

Badania zeolitów i mieszanek zeolitowo-piaskowych

Charakterystyka badanych materiałów

W badaniach powierzchni właściwej wykorzystano zeolity słowacki i ukraiński – wykazujące duże zdolności sorpcyjne, oraz piasek wiślaný stonowiący składnik mieszanek zeolitowo-

piaskowych. Krzywa uziarnienia piasku wiślanego pozwala sklasyfikować go jako piasek drobny (według PN-86/B-02480). Wskaźniki nierównomierności uziarnienia (C_u) i krzywizny uziarnienia (C_c) wynoszą odpowiednio 2,1 i 1,0 (grunt jest równoziarnisty). Określone metodą widelkową gęstości: minimalna i maksymalna, wynoszą odpowiednio $\rho_{dmin} = 1,58 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ ($e_{maks} = 0,69$), $\rho_{dmaks} = 1,86 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ ($e_{min} = 0,36$), gdzie e_{maks} i e_{min} oznaczają maksymalny i minimalny wskaźnik porowatości. Piasek charakteryzuje się dobrą przepuszczalnością hydrauliczną; współczynnik filtracji piasku waha się w granicach $10^{-3} - 10^{-4} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$. Zeolit ukraiński (ZU) składa się z klinoptylolitu (75%), montmorylonitu (15%), kwarcu i miki (2–10%). Zeolit słowacki (ZS) jest w 84% naturalnym

TABELA 2. Typowy skład chemiczny zeolitu słowackiego (www.zeocem.sk)
 TABLE 2. Typical chemical composition of Slovak zeolite

| Składnik Component | Zawartość [%] Content | Składnik Component | Zawartość [%] Content |
|--------------------------------|--------------------------|-----------------------|--------------------------|
| SiO ₂ | 65,0–71,3 | MgO | 0,6–1,2 |
| Al ₂ O ₃ | 1,5–13,1 | Na ₂ O | 0,2–1,3 |
| CaO | 2,7–5,2 | TiO ₂ | 0,1–0,3 |
| K ₂ O | 2,2–3,4 | Si/Al | 4,8–5,4 |
| Fe ₂ O ₃ | 0,7–1,9 | – | – |

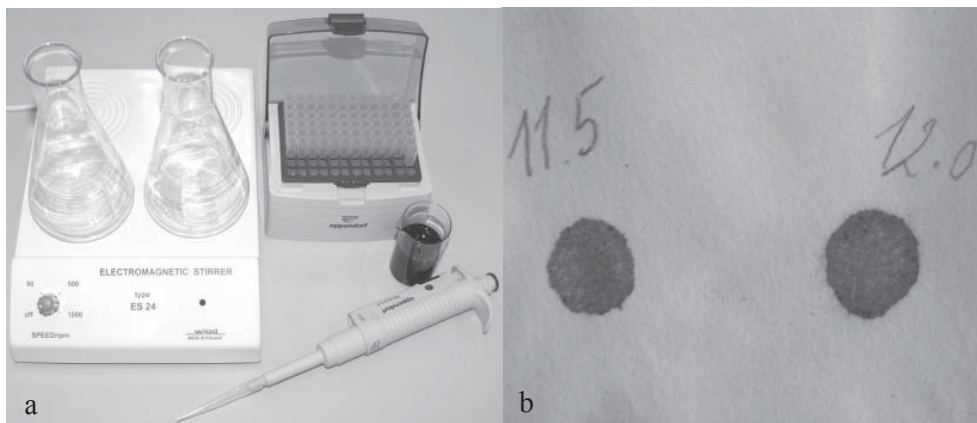
klinoptylolitem o składzie przedstawionym wzorem strukturalnym: (Ca; K₂; Na₂; Mg)₄ Al₈ Si₄₀ O₉₆ 24H₂O. Pozostałe domieszki to krystobalit (8%), illit (4%), skalenie (4%), minerały węglowe (< 0,5%) i kwarc w ilościach śladowych. Typowy skład chemiczny zeolitu słowackiego przedstawiono w tabeli 2.

Minerał wykazuje bardzo małą twardość wynoszącą 1,5–2,5 w skali Mohsa, co powoduje jego kruszenie i rozcieranie podczas analizy sitowej. Ponadto, charakteryzuje się wysoką porowatością w granicach 24–32% i dużymi zdolnościami sorpcyjnymi o charakterze selektywnym. Szeregi selektywności materiału względem kationów wyglądają następująco: Cs⁺ > Pb²⁺ > NH₄⁺ > Cu²⁺ > Hg²⁺, Cd²⁺ > Ni²⁺ > Co²⁺ i NH₄⁺ > K⁺ > Mg²⁺ > Ca²⁺. Gęstość właściwa zeolitu słowackiego wynosi 2,20–2,44 g·cm⁻³, a gęstość objętościowa przyjmuje wartości w granicach 1,60–1,89 g·cm⁻³. Zbadano również powierzchnię właściwą mieszanek z zeolitu słowackiego o uziarnieniu 1,0–2,5 mm i piasku wiślanego z 20, 50 i 80% udziałem zeolitu. Badania przeprowadzono dla zeolitów nieregenerowanych i regenerowanych roztworem NaCl do formy sodowej.

Metodyka oznaczenia powierzchni właściwej

Badania powierzchni właściwej przeprowadzono metodą sorpcji błękitu metylenowego (PN-88/B-04481). Analizę wykonuje się wykorzystując mianowany roztwór chemicznie czystego błękitu metylenowego o stężeniu około 10 g·dm⁻³, określonym z dokładnością nie mniejszą niż 0,5%. Roztwór dodawany jest z biurety porcjami o objętości 0,5 lub 1,0 cm³ do odpowiednio przygotowanej próbki materiału umieszczonego w kolbie ustawionej na mieszadle magnetycznym (rys. 1). Po każdej zadanej kolejnej porcji błękitu, próbka mieszana jest przez trzy minuty, po czym pobierana jest kropla zawiesiny za pomocą pipety i umieszczana na bibule do sączenia. Punkt końcowy badania, oznaczający przekroczenie zdolności sorpcyjnych gruntu względem zastosowanej substancji adsorbowanej, określa się na podstawie wyglądu pobranej kropli zawiesiny na bibule filtracyjnej. W punkcie końcowym badania wokół plamy pojawia się „halo”, to znaczy otoczka plamy wykazuje zabarwienie błękitne.

Próbki materiału (zeolitu i mieszanek zeolitowo-piaskowych) przed roz-



RYSUNEK 1. Zestaw sprzętów (a) i wynik badania (b) powierzchni właściwej metodą sorpcji błękitu metylenowego

FIGURE 1. Laboratory test equipment (a) and test results (b) of specific surface area using methylene blue sorption method

poczęciem oznaczania przesiewane były przez sito w celu oddzielenia ziaren o średnicach większych niż 2,0 mm, następnie suszone i roztarte. Z tak przygotowanego materiału pobierano próbki do oznaczenia wilgotności i powierzchni właściwej. Wielkość próbek uzależniona jest od rodzaju badanego materiału. Naważki miesza się z 100 cm³ wody destylowanej i pozostawia na około 20 godzin, dopiero po tym czasie można rozpocząć właściwą analizę. Za wynik ostateczny przyjmuje się średnią arytmetyczną oznaczeń, jeżeli różnica wartości ekstremalnych nie przekracza 25% wartości średniej.

Wyniki badań i ich analiza

Wyniki badań powierzchni właściwej zeolitów i mieszanek zeolitowo-piaskowych (nieregenerowanych) zestawiono w tabeli 3, natomiast próbek regenerowanych do form sodowych w tabeli 4. Średnia arytmetyczna wartość powierzchni właściwej zeolitu słowackiego wynosi 33,4 m²·g⁻¹. Dotychczasowe badania ze-

olitów o podobnym składzie wykazały ich powierzchnię właściwą około 34,5 m²·g⁻¹ (www.arem.com.pl/zeolity.htm). Modyfikacja zeolitu poprzez wysycenie jonami Na⁺ spowodowała uzyskanie większych wartości powierzchni właściwej – średnia wartość wyniosła 43,7 m²·g⁻¹. Potwierdza to fakt, że jony błękitu metylenowego łatwiej zastępują kationy sodowe niż inne, co powoduje otrzymywanie zawyżonych wyników w gruntach sodowych. Wyniki uzyskane dla mieszanek zeolitowo-piaskowych pokazują wyraźny wzrost powierzchni właściwej wraz ze wzrostem zawartości zeolitu w mieszance. Wartość powierzchni oznaczona dla mieszanki zawierającej 80% zeolitu słowackiego jest zbliżona do powierzchni określonej dla 100% zeolitu. Powierzchnia właściwa piasku wiślanego ma niewielki wpływ na otrzymywane wyniki. W badaniach została ona oznaczona jako równa 0,7 m²·g⁻¹. Powierzchnia właściwa zeolitu ukraińskiego wyniosła 37,0 m²·g⁻¹, a więc była podobna jak dla zeolitu słowackiego.

TABELA 3. Wyniki badania powierzchni właściwej metodą sorpcji błękitu metylenowego dla zeolitów i mieszanek zeolitowo-piaskowych

TABLE 3. Results of specific surface area tests for zeolites and zeolite-sand mixtures using methylene blue sorption method

| Rodzaj materiału Type of material | Powierzchnia właściwa Specific surface area [m ² ·g ⁻¹] | Powierzchnia właściwa (śr. arytm.) Specific surface area (average) [m ² ·g ⁻¹] |
|---|--|--|
| Zeolit ukraiński (ZU) Ukrainian zeolite (ZU) | 36,4 | 37,0 |
| | 37,5 | |
| Zeolit słowacki (ZS) Slovak zeolite (ZS) 0,2–0,5mm | 34,9 | 35,4 |
| | 35,9 | |
| Zeolit słowacki (ZS) Slovak zeolite (ZS) 0,5–1,0 mm | 31,4 | 31,4 |
| | 31,5 | |
| Zeolit słowacki (ZS) Slovak zeolite (ZS) 1,0–2,5 mm | 35,1 | 33,4 |
| | 31,7 | |
| Piasek wiślany (PW) Vistula Sand (PW) | 0,7 | 0,7 |
| | 0,7 | |
| 20% ZS + 80% PW | 7,9 | 7,9 |
| | 7,9 | |
| 50% ZS + 50% PW | 19,5 | 20,2 |
| | 20,9 | |
| 80% ZS + 20% PW | 32,2 | 31,5 |
| | 30,8 | |

TABELA 4. Wyniki badania powierzchni właściwej metodą sorpcji błękitu metylenowego dla form sodowych zeolitu słowackiego i ich mieszanek z piaskiem wiślanym

TABLE 4. Results of specific surface area tests for Na-form of zeolite and zeolite-sand mixtures using methylene blue sorption method

| Rodzaj materiału Type of material | Powierzchnia właściwa Specific surface area [m ² ·g ⁻¹] | Powierzchnia właściwa (śr. arytm.) Specific surface area (average) [m ² ·g ⁻¹] |
|--------------------------------------|---|---|
| ZS ^{Na} 0,2–0,5 | 44,0 | 44,8 |
| | 45,5 | |
| ZS ^{Na} 0,5–1,0 | 39,7 | 41,0 |
| | 42,4 | |
| ZS ^{Na} 1,0–2,5 | 46,3 | 45,2 |
| | 44,1 | |
| 20%ZS ^{Na} + 80% PW | 8,6 | 8,6 |
| | 8,6 | |
| 50%ZS ^{Na} + 50% PW | 20,2 | 20,2 |
| | 20,2 | |
| 80%ZS ^{Na} + 20% PW | 33,5 | 33,5 |
| | 33,5 | |

Określone w badaniach metodą sorpcji błękitu metylenowego wyniki są zbliżone do wartości uzyskanych innymi metodami (tab. 5).

TABELA 5. Wyniki analizy powierzchni właściwej metodą BET i Langmuira (Fronczyk 2006)
TABLE 5. Results of specific surface area estimation using BET and Langmuir methods (Fronczyk 2006)

| Rodzaj materiału Type of material | BET [m ² ·g ⁻¹] | Langmuir [m ² ·g ⁻¹] |
|--------------------------------------|---|--|
| ZU | 19,0 | 37,0 |
| ZS 0,2–0,5 | 27,7 | 38,1 |
| ZS 0,5–1,0 | 28,8 | 39,4 |
| ZS 1,0–2,5 | 29,0 | 40,0 |

Wnioski

Do najważniejszych wniosków wynikających z przeprowadzonych analiz można zaliczyć następujące:

- Oznaczona metodą sorpcji błękitu metylenowego powierzchnia właściwa zeolitu słowackiego wynosi 33,4 m²·g⁻¹, a zeolitu ukraińskiego 37,0 m²·g⁻¹.
- Mieszanki zeolitowo-piaskowe z 80% zawartością zeolitu charakteryzują się wartościami powierzchni właściwej 33,5 i 31,5 m²·g⁻¹, odpowiednio w przypadku zeolitu słowackiego i ukraińskiego.
- Metoda sorpcji błękitu metylenowego pozwala na uzyskiwanie równie wiarygodnych wyników jak inne specjalistyczne metody (np. metoda niskotemperaturowej adsorpcji azotu).
- Dla materiału zmodyfikowanego uzyskano większe wartości powierzchni właściwej o około 10 m²·g⁻¹. Wynika to z faktu, że jony błękitu metylenowego łatwiej ulegają wymianie z jonami Na⁺ niż z innymi.
- Powierzchnia właściwa jest wskaźnikiem możliwości reaktywnych materiału, jednak do całkowitej oceny jego zdolności sorpcyjnych wymagane są dodatkowe badania statyczne i dynamiczne z zastosowaniem zanieczyszczeń, do których usuwania ma być wykorzystany materiał reaktywny.

Literatura

- BRANDL H. 1992: Mineral liners for hazardous waste contaminant. *Geotechnique* 42 (1): 57–65.
- BRUNAUER S., EMMETT P.H., TELLER E. 1938: Adsorption of gases in multi-molecular layers. *Journal of the American Chemical Society* 60 (2): 309–319.
- CARTER D.L., MORTLAND M.M., KEMPER W.D. 1986: Specific surface. Chapter 16 in *Methods of Soil Analysis, Part 1. Physical and Mineralogical Methods – Agronomy Monograph 9*, American Society of Agronomy – Soil Science of America.
- FRONCZYK J. 2006: Przepuszczalne bariery sorpcyjne – właściwości materiału aktywnego. *Przegląd Naukowy WIKŚ XV*, 1(33): 85–94.
- JUMIKIS A.R. 1984: *Soil Mechanics*, Robert E. Krieger Publishing Company, Inc., Florida.
- MYŚLIŃSKA E. 2003: *Mała encyklopedia gruntoznawstwa*. BELStudio, Warszawa.
- PHAM T.H., BRINDLEY G.W. 1970: Methylene blue adsorption by clay minerals. Determination of surface areas and cation exchange capacities. *Clays and Clay Minerals* 18: 203–212.
- PN-88/B-04481 Grunty budowlane. Badania próbek gruntu.
- PN-86/B-02480 Grunty budowlane. Określenia, symbole, podział i opis gruntów.
- YONG R.M., MOHAMED A.M.O., WARKENTIN B.P. 1996: *Principles of contaminant transport in soils*. Elsevier, Amsterdam.
- YUKSELEN Y., KAYA A. 2006: Comparison of Methods for Determination Specific Surface Area of Soils. *Journal of Geotechnical and*

Geoenvironmental Engineering 132 (7):
931–936.
www.arem.com.pl/zeolity.htm
www.zeocem.sk

Summary

Specific surface area – basic parameter of reactive material's characteristics.

Recently a numerous methods were designed for the in-situ treatment of contaminated groundwater, among them a versatile technology – Permeable Reactive Barriers (PRB). This environmentally safe technology requires the application of reactive materials with high specific surface areas (zeolite, activated carbon, zero-valent iron particles,

etc.). This paper presents the review of laboratory methods commonly used for determination of specific surface area. More detailed description was included for the methylene blue sorption (MBS) method recommended for application in geotechnical practice. According to the test results obtained for zeolite and zeolite-sand mixtures it can be concluded that simple MBS method gives results comparable to more sophisticated methods.

Authors' address:

Kazimierz Garbulewski, Joanna Fronczyk
Szkoła Główna Gospodarstwa Wiejskiego
w Warszawie
Katedra Geoinżynierii
ul. Nowoursynowska 159, 02-776 Warszawa
Poland