



Alkali activation of metakaolin and its mixtures with fly ash

Michał ŁACH¹, Janusz MIKUŁA², Agnieszka GRELA³

¹ Politechnika Krakowska, Wydział Mechaniczny, Al. Jana Pawła II 37, 31-864 Kraków, tel. 12 628 34 54, michallach85@o2.pl

² Politechnika Krakowska, Wydział Mechaniczny, Al. Jana Pawła II 37, 31-864 Kraków, tel. 12 628 34 13, jamikula@pk.edu.pl,

³ Politechnika Krakowska, Wydział Inżynierii Środowiska, ul. Warszawska 24, 31-155 Kraków, tel. 12 628 31 33, agrela@pk.edu.pl

Abstract

The article presents the results of experimental low-temperature alkaline activation of metakaolin and alkaline hydrothermal activation mixtures of metakaolin and fly ash from one of the national power plants. The way of modification of metakaolin and fly ashes, which allows for a significant expansion to increase the surface area and microporosity is described. The analysis of SEM / EDS of tested materials and the results of porosimetric test by BET, Langmuir, BJH and t-method is presented.

Keywords: alkali activation, metakaolin, fly ash, zeolite

Streszczenie

Alkaliczna aktywacja metakaolinu oraz jego mieszanin z popiołem lotnym

W artykule przedstawiono wyniki badań doświadczalnych niskotemperaturowej alkalicznej aktywacji metakaolinu oraz hydrotermalnej alkalicznej aktywacji mieszanin metakaolinu z popiołem lotnym z jednej z elektrociepłowni krajowych. Opisano sposób modyfikacji metakaolinu i popiołów lotnych, który pozwala na znaczne rozwinięcie powierzchni właściwej i zwiększenie mikroporowatości. Przedstawiono analizę SEM/EDS otrzymanych materiałów a także wyniki badań porozymetrycznych metodą BET, Langmuir'a, BJH oraz metodą t.

Słowa kluczowe: alkaliczna aktywacja, metakaolin, popiół lotny, zeolity

1. Wstęp

Zeolity to mikroporowate krystaliczne glinokrzemiany, zbudowane z tetraedrów TO_4 ($T = Si, Al$), które połączone są atomami tlenu [1]. Dzięki swojej strukturze szkieletowej, która zawiera wolne przestrzenie wypełnione dużymi jonami i cząsteczkami wody, zeolity charakteryzują się dużą pojemnością sorpcyjną, aktywnością katalityczną oraz selektywnością jonowymienną. Znajdujące się w strukturze cząsteczki wody, mają dużą swobodę ruchu i umożliwiają wymianę jonów i odwracalną dehydratację. Połączenie tetraedrów w sieć przestrzenną sprawia, że zeolity mają dużą ilość wolnej przestrzeni w postaci różnorodnych kanałów i komór.

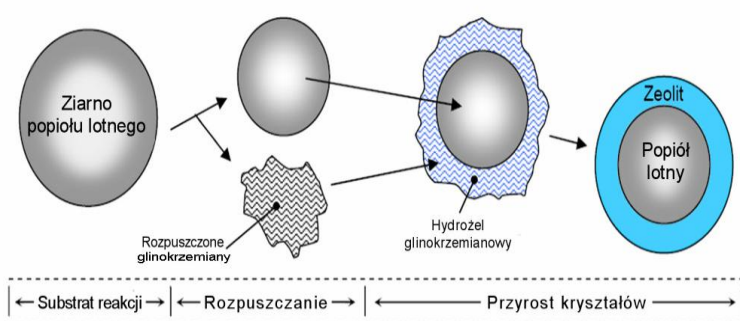
Zeolity naturalne jak również syntetyczne mają bardzo wiele obszarów zastosowań w różnych dziedzinach. Wykorzystywane są między innymi do: adsorpcji pozostałości środków ochrony roślin [2], do oczyszczania ścieków komunalnych [3], do adsorpcji jonów toksycznych metali [4].

W przyrodzie odkryto około 40 różnych typów zeolitów naturalnych. Obecnie uzyskać można natomiast aż około 130 typów zeolitów syntetycznych i są podstawy teoretyczne do tego, aby twierdzić, że można uzyskać ich o wiele więcej [5]. Praktyczne znaczenie ma jednak tylko kilkanaście typów syntetycznych zeolitów, gdyż o ich przydatności decyduje średnica wlotowa kanałów. Jeżeli jest ona zbyt mała to czyni je nieprzydatnymi do celów

jonowymiennych. Główną metodą wytwarzania syntetycznych zeolitów jest metoda hydrotermalna (hydrotermiczna). Intensywny rozwój tej metody nastąpił już w latach 40 XX wieku [6].

Syntetyczne materiały zeolitowe można otrzymywać zarówno stosując odczynniki chemiczne (zawierające krzemiany sodu i gliniany sodu) a także surowce mineralne (np. materiały ilaste, kaoliny, tufy itp.), jak również wykorzystując odpady, które stanowią uboczne produkty spalania węgla UPS (popioły lotne lub żużle). Dane literaturowe mówią o tym, iż w zasadzie z każdego rodzaju popiołu, jeżeli stosuje się odpowiednią metodę, można otrzymać struktury zeolitowe [7].

Popioły lotne stanowią atrakcyjny materiał do zastosowania w procesach syntezy zeolitów ze względu na swój skład chemiczny, czyli wysokie zawartości Si i Al. To właśnie określone stosunki Si/Al warunkują utworzenie danego typu zeolitów. Duży wpływ na tworzenie się zeolitów mają również inne parametry, do których zaliczyć można: warunki prowadzenia procesu syntezy, zawartość Ca w popiołach, a także udział fazy krystalicznej [8]. Chemiczną syntezę zeolitów z popiołu lotnego można podzielić na trzy etapy: rozpuszczanie się szkła glinokrzemianowego, odkładanie się żelu glinokrzemianowego oraz krystalizację zeolitu z żelu [9]. Mechanizm hydrotermalnej konwersji zeolitu z popiołu lotnego przedstawiono na rysunku 1.1.



Rys.1.1. Mechanizm hydrotermalnej konwersji zeolitu z popiołu lotnego [9] za [10]

Zeolity ze względu na zawartość SiO_2 można podzielić na trzy rodzaje [6]:

- Rodzaj A – zeolity niskokrzemowe, $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3 \leq 2$;
- Rodzaj X – zeolity średniokrzemowe, $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3 = 2,2-3,3$;
- Rodzaj Y – zeolity wysokokrzemowe, $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3 = 3,1-6,0$.

Autorzy pracy [11] badali wpływ zawartości Si i Al w popiołach lotnych na tworzenie się frakcji zeolitowych typu Na-P1. Stosowano roztwór 3M wodorotlenku sodu, czas procesu wynosił 8h a temperatura aktywacji wynosiła 125°C . Stosunek zawartości SiO_2 do zawartości Al_2O_3 w badanych popiołach lotnych wynosił od 1,5 do 6,0. Podczas procesu alkalicznej aktywacji uzyskano wiele rodzajów faz zeolitowych. Głównym produktem syntezy dla każdego popiołu okazał się sodalit. W próbkach w których stosunek zawartości $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ wynosił 2,4; 2,1 oraz 1,9 otrzymano zeolit typu P [11].

Celem niniejszej pracy było określenie wpływu stosunków molowych $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ na efektywność tworzenia się struktur zeolitowych z metakaolinu oraz jego mieszanin z popiołem lotnym. Modyfikację stosunku $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ przeprowadzono poprzez mieszanie popiołu lotnego i metakaolinu w różnych proporcjach. Zaproponowane postępowanie polegające na wytwarzaniu zeolitów z surowców odpadowych jest korzystne z wielu powodów. Najważniejsze z nich to: ograniczenie ilości użytych surowców i/lub kosztów ich eksploatacji, spadek generowanych ilości odpadów i zmniejszenie ich oddziaływania na środowisko.

Mieszanki metakaolinu z popiołem lotnym są obiecującym materiałem do syntezy zeolitów. Dobierając proporcje tych składników można zmieniać w szerokim zakresie wartość stosunku $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$. Autorzy pracy [12] porównywali możliwości otrzymywania zeolitów Na-X z popiołów lotnych, sproszkowanej amorficznej krzemionki i metakaolinu oraz ich mieszanin. Stwierdzili oni, że stosunek $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ popiołu lotnego, który w ich przypadku wynosi 1,6, jest niewystarczający do syntezy zeolitu Na-X. Do wytwarzania tego typu zeolitu powinien być stosowany w mieszaninie również metakaolin. Wysoką skuteczność przekształcania mieszanin

w zeolit Na-X uzyskano dla stosunku $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3 = 3,25$, gdzie popiół lotny, amorficzna krzemionka i metakaolin występowały w proporcjach 1:3:6 [12].

2. Materiał do badań

Materiałami użytymi w badaniach były: popiół lotny (pobrano bezpośrednio pod elektrofiltrem w jednej z elektrociepłowni krajowych) oraz metakaolin. Skład tlenkowy badanego popiołu i jego właściwości przedstawiono w tabelach 2.1. i 2.2. Miałkość popiołu lotnego wynosiła 16,7 [% masy], natomiast gęstość wynosiła $2,33 \text{ g/cm}^3$. Mikrostruktura (morfologia) cząstek popiołu lotnego została przedstawiona na rysunku 2.1. Cząstki popiołu lotnego miały gładki, sferyczny kształt a ich wielkość nie przekraczała $100 \mu\text{m}$ (przeważnie cząstki miały wielkość poniżej $50 \mu\text{m}$ – tabela 2.3.). Na przedstawionych fotografiach widoczne są kuliste formy szkliwa glinokrzemianowego oraz jego agregaty. Na powierzchni cząstek widoczne są niekiedy drobne ziarna tlenków żelaza - hematytu. Obserwuje się również ziarna nieregularne, bardzo porowate, często o ostrych krawędziach i chropowatej powierzchni. Największe występujące ziarna to okruchy niespalonego węgla i sadzy. Stwierdzono również występowanie ziaren kwarcu. Do badań użyto popiołu lotnego w stanie roboczym. Nie przeprowadzono procesów magnesowania i dopalania popiołów. Procesy te wiążą się ze zwiększeniem kosztów przeprowadzenia procesów zeolityzacji, chociaż uzyskuje się dzięki temu większą efektywność (zmniejszenie balastu w popiele lotnym, dzięki czemu wzrastają stężenia aktywnych składników SiO_2 i Al_2O_3) [6].

Skład tlenkowy metakaolinu użytego do badań przedstawiono w tabeli 2.4. Cząstki metakaolinu mają blaszkowaty kształt i tworzą aglomeraty. Wielkość pojedynczych cząstek z reguły nie przekracza $10 \mu\text{m}$, co potwierdzają również przedstawione w tabeli 2.5 wyniki analizy sitowej. Straty prażenia metakaolinu wynoszą około 1,5 % w temperaturze prażenia 1100°C .

Tabela 2.1. Skład tlenkowy popiołu lotnego

	Straty prażenia	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	MgO	Na_2O	K_2O	SO_3	TiO_2	P_2O_5	BaO
[% wag.]	2,44	55,89	23,49	5,92	2,72	2,61	0,59	3,55	0,16	1,09	0,82	0,20

Tabela 2.2. Właściwości chemiczne popiołu lotnego

	SiO_2 reaktywny	Rozpuszczalne fosforany jako P_2O_5	Chlorki (Cl)	CaO wolny	$\text{Na}_2\text{O}_{\text{eq}}$
[% wag.]	35,86	0,0008 (8 mg/kg)	0,034	0,02	4,76

Tabela 2.3. Rozkład wielkości cząstek popiołu lotnego

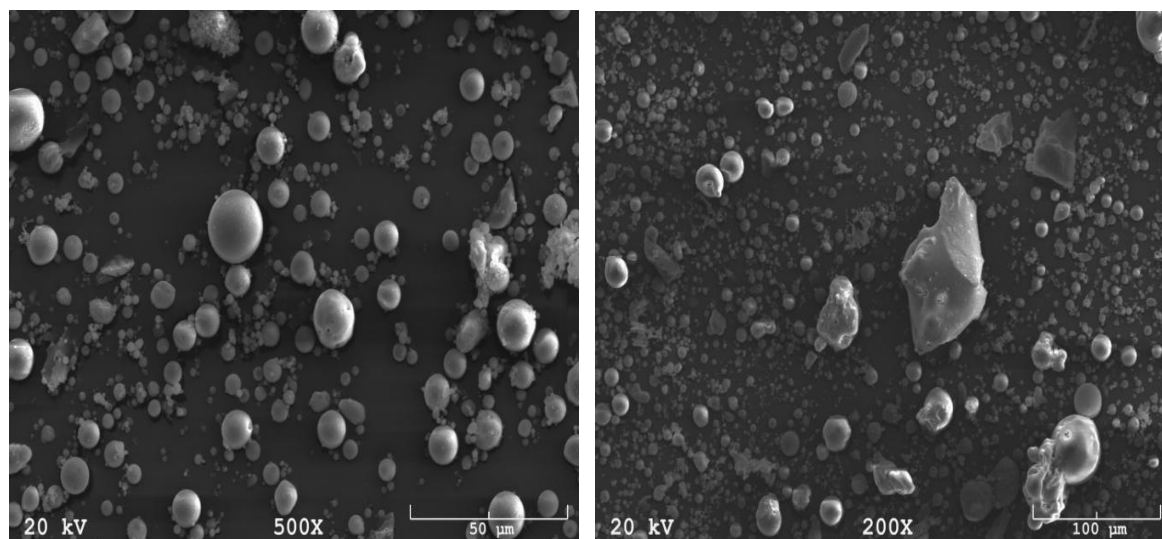
Wielkość frakcji	$>160 \mu\text{m}$	$100-160 \mu\text{m}$	$71-100 \mu\text{m}$	$63-71 \mu\text{m}$	$56-63 \mu\text{m}$	$<56 \mu\text{m}$
Zawartość	0,3 %	3,2 %	11,9 %	9,9 %	15,4 %	59,3 %

Tabela 2.4. Skład tlenkowy metakaolinu

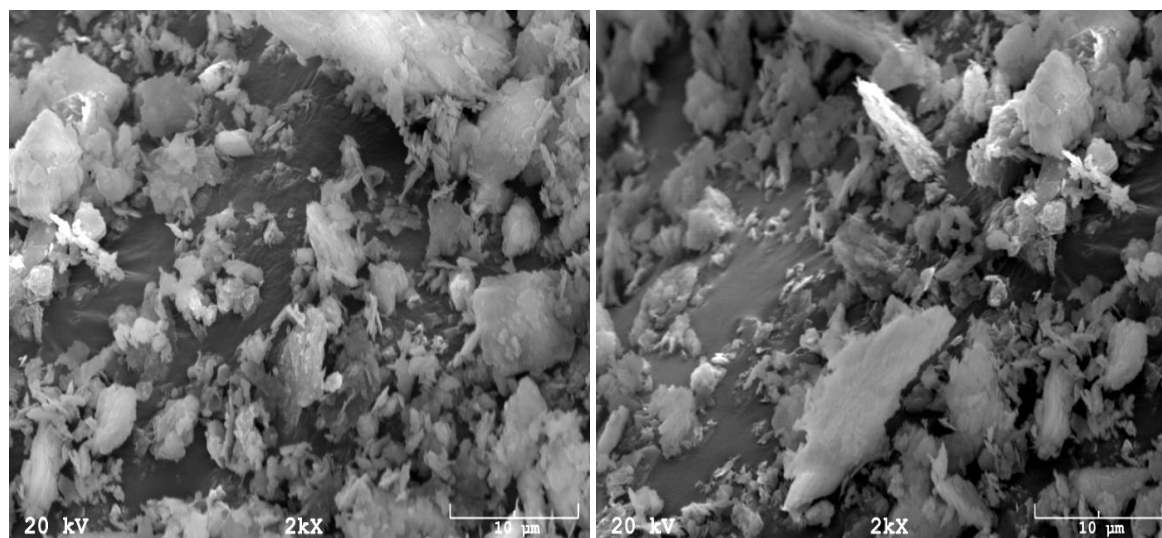
Skład	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	TiO_2	$\text{K}_2\text{O}+\text{Na}_2\text{O}$	CaO	MgO
Zawartość	51-53 %	40-42 %	1,2-1,4 %	0,7-0,75 %	1,35-1,45 %	0,25-0,30 %	0,35-0,40 %

Tabela 2.5. Rozkład wielkości cząstek metakaolinu

Wielkość frakcji	$20-40 \mu\text{m}$	$10-20 \mu\text{m}$	$5-10 \mu\text{m}$	$2-5 \mu\text{m}$	$1-2 \mu\text{m}$	$<1 \mu\text{m}$
Zawartość	2,5 %	9,6 %	27,4 %	15,5 %	18,1 %	26,9 %



Rys. 2.1. Morfologia ziaren popiołu lotnego użytego do badań (SEM)



Rys. 2.2. Morfologia metakaolinu użytego do badań (SEM)

Jako aktywator w każdym przypadku stosowano wodorotlenek sodu NaOH (techniczny o czystości > 98 %) w postaci płatków. Stosowana woda zarówno do przygotowania roztworów, filtrowania, a także przepłukiwania otrzymanych materiałów, była wodą destylowaną. Procesy filtracji oraz przepłukiwania prowadzono przy wykorzystaniu bibuły filtracyjnej do analizy jakościowej z czystej celulozy i puchu bawełnianego o czasie filtracji 10 [s].

3. Warunki prowadzenia procesu syntezy

Odpowiednio odmierzone ilości metakaolinu oraz jego mieszanin z popiołem lotnym zmieszano z wodnym roztworem wodorotlenku sodu o określonych stężeniach. Stężenia molowe roztworów alkalicznych podano w tabeli 3.1. Stężenie metakaolinu, bądź jego mieszaniny z popiołem, wynosiło w każdym przypadku 200 g/dm³. Do procesu zeolityzacji przygotowano dwie mieszaniny popiołu lotnego oraz metakaolinu. Zastosowano mieszaniny gdzie 25 % stanowił metakaolin, a 75 % popiół lotny (Próbka 2) oraz mieszaninę 25 % popiołu lotnego i 75 % metakaolinu (Próbka 3). Przygotowano również próbkę, gdzie syntezie poddano 100 %

metakaolinu (Próbka 1). Aby porównać efektywność aktywacji hydrotermalnej mieszanin z aktywacją metodą niskotemperaturową samego metakaolinu, przeprowadzono taką aktywację dla Próbki nr 1.

Roztwory przygotowane w sposób opisany powyżej dokładnie wymieszano i umieszczono w polipropylenowych naczyniach cylindrycznych o pojemności 1000 ml. Pojemniki zostały szczelnie zamknięte i umieszczone w suszarce laboratoryjnej w temperaturze 80 °C. Aby zminimalizować koszty przeprowadzenia procesu postanowiono aktywować metakaolin oraz mieszaniny metakaolinu i popiołu lotnego w temperaturach nie większych niż 80 °C. W przypadku hydrotermalnej aktywacji mieszanin co 6 godzin roztwory intensywnie mieszano ręcznie i wstrząsano. W przypadku niskotemperaturowej aktywacji, która trwała 30 dni, codziennie, kilkanaście minut mieszano ręcznie i wytrząsano mieszaninę metakaolinu i 3M roztworu NaOH. Po procesie zeolityzacji metodą hydrotermalną próbki zostały schłodzone do temperatury pokojowej, a następnie filtrowane w celu usunięcia pozostałego po aktywacji roztworu. Po filtracji próbki przemywano wodą destylowaną, tak aby uzyskać pH około 10. Zwykle polegało to na 8-12 krotnym przepłukiwaniu 1000 ml wody destylowanej. Końcowym etapem syntezy było suszenie próbek w temperaturze 105 °C. Czas suszenia wynosił 6 godzin.

Tabela 3.1. Warunki, w których prowadzono procesy zeolityzacji

Lp.	Zastosowany wodorotlenek	Stężenie wodorotlenku [Mol/dm ³]	Stężenie popiołu lotnego lub meta kaolinu [g/dm ³]	Temperatura reakcji	Czas reakcji	Czas suszenia
1	NaOH	3	200 g MK	21 °C	30 dni	6 h
2	NaOH	5	50 g PL + 150g MK	80 °C	24 h	6 h
3	NaOH	5	150 g PL+ 50g MK	80 °C	24 h	6 h

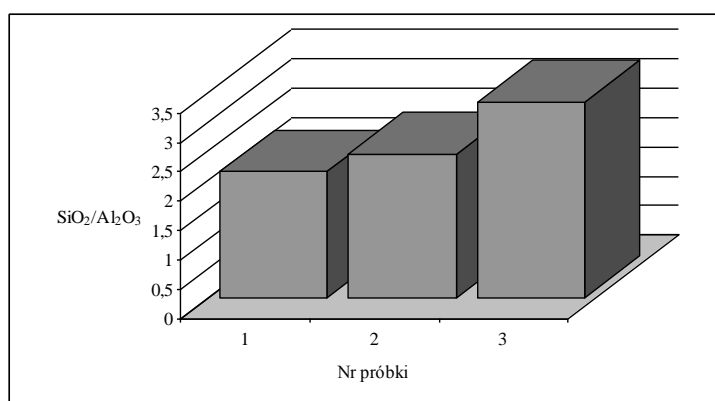
MK- metakaolin, PL- popiół lotny

Tabela 3.2. Zawartości SiO₂ i Al₂O₃ w próbkach użytych do syntezy

Nr próbki	1	2	3
SiO ₂ (Si)	52,00	52,97	54,92
Al ₂ O ₃ (Al)	41,00	36,62	27,87

Tabela 3.3. Stosunki molowe SiO₂/ Al₂O₃

Nr próbki	1	2	3
SiO ₂ /Al ₂ O ₃	2,15	2,44	3,34



Rys. 3.1. Stosunek zawartości SiO₂ do zawartości Al₂O₃ w badanych próbkach

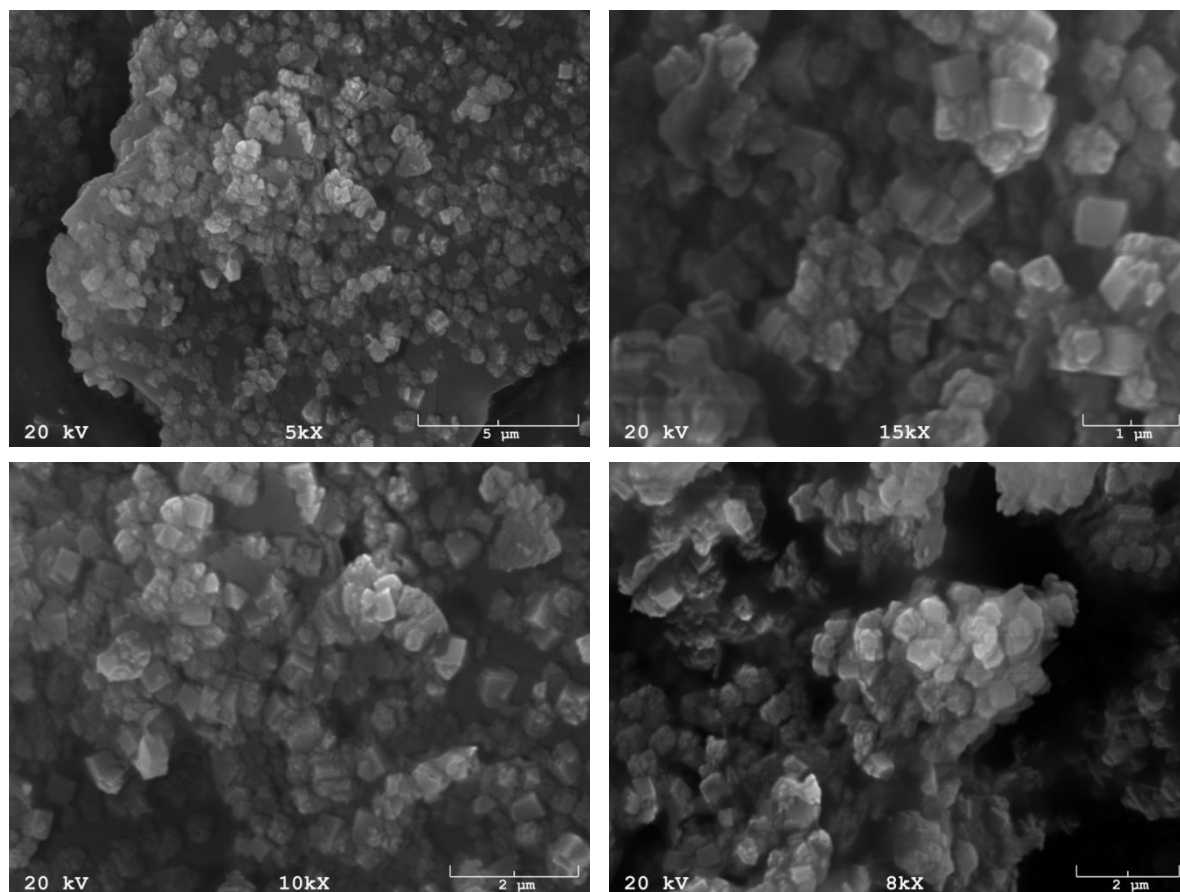
4. Aparatura

Pomiarów porowatości i powierzchni właściwej dokonano w oparciu o teorię wielowarstwowej adsorpcji Brunauera-Emmetta-Tellera, tzw. BET, przy wykorzystaniu sorptomatu – ASAP 2020. Dodatkowo dla wyznaczenia funkcji rozkładu objętości porów materiałów po syntezie zastosowano doświadczalnie wyznaczone niskotemperaturowe izotermy azotu tzw. metodą Barretta, Joynera i Halendy (BJH). Analizę morfologii oraz składu chemicznego wykonano na skaningowym mikroskopie elektronowym JEOL JSM-820 przy wykorzystaniu systemu analizy składu chemicznego opartego na dyspersji energii promieniowania rentgenowskiego – EDS. Próbki do badań na mikroskopie skaningowym zostały napyłone cienką warstwą złota na napyłarce JEOL JEE-4X.

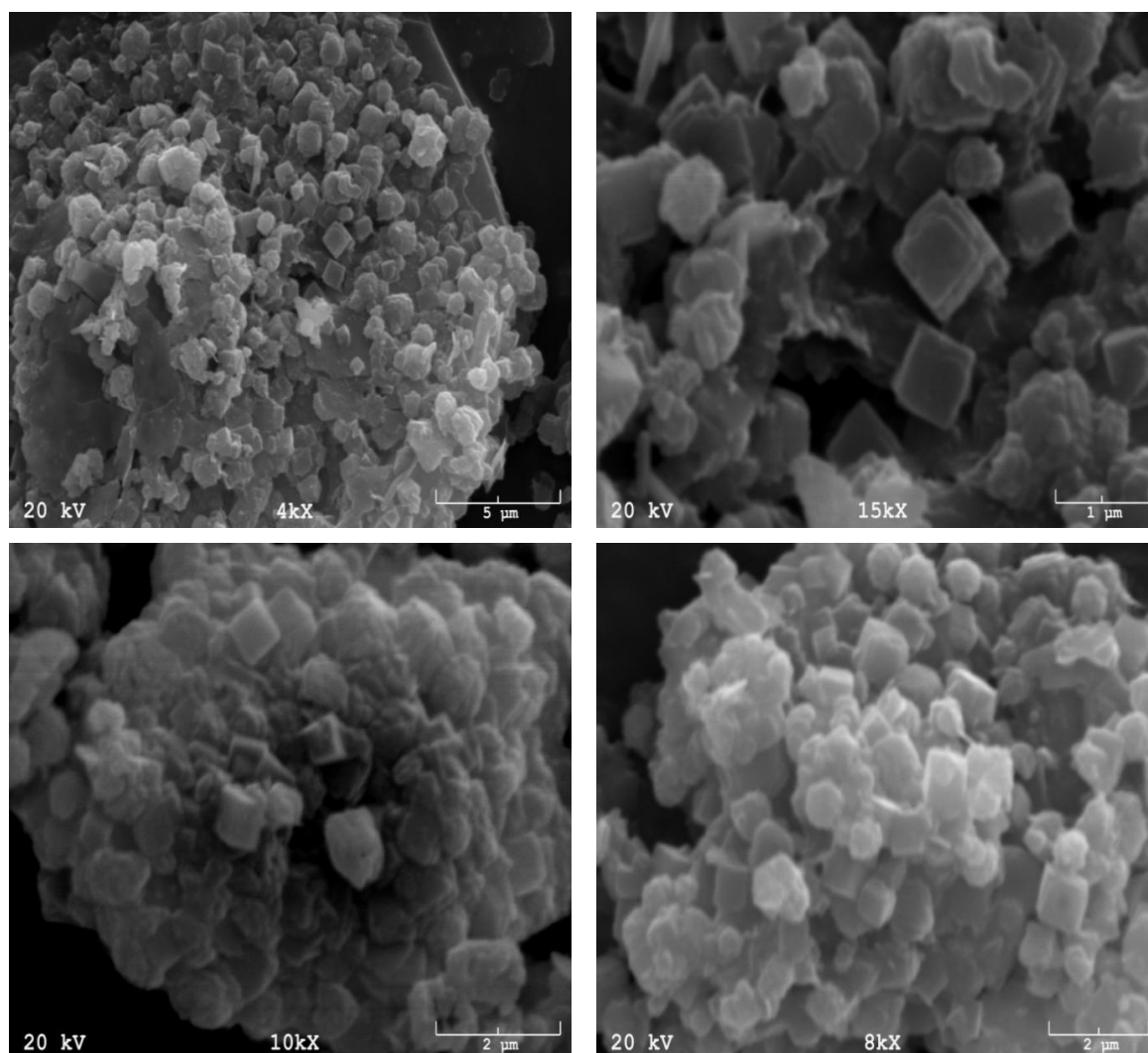
5. Omówienie wyników

Przedstawiono wyniki badań fraktograficznych oraz porozymetrycznych dotyczących alkalicznej aktywacji: metakaolinu metodą niskotemperaturową oraz jego mieszanin z popiołem lotnym metodą hydrotermalną. Przeprowadzone badania (zdjęcia SEM) pokazują, że alkaliczna aktywacja prowadzi do powstania (w każdym z wariantów syntezy) podobnego, ale nie identycznego, zasadowego żelu glinowo – krzemianowego oraz różnych typów zeolitów (sodalit, fojazyt, zeolit X).

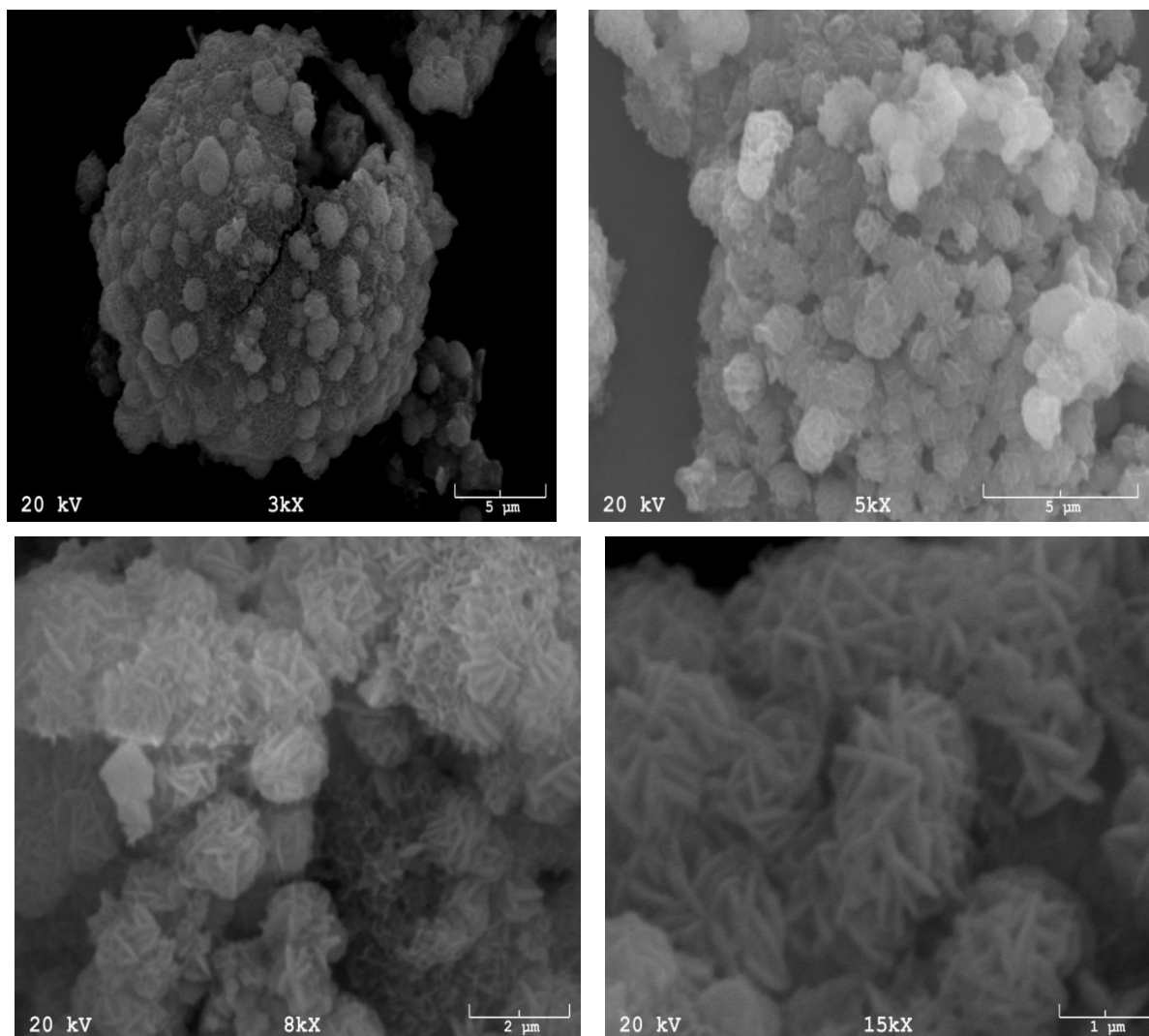
Ze względu na to, iż skład popiołu jest bardzo zmienny, sprawność procesu syntezy nigdy nie osiąga 100 %, ponieważ w wyniku przeprowadzonej syntezy często powstaje kilka różnych zeolitów lub część materiału pozostaje nieprzereagowana.



Rys. 4.1. Mikrofotografie próbki nr 1 metakaolinu po niskotemperaturowej aktywacji



Rys. 4.2. Mikrofotografie próbki nr 2 (25 % PL+75 % MK) po hydrotermalnej aktywacji



Rys. 4.3. Mikrofotografie SEM próbki nr 3 (75 % PL+25 % MK) po hydrotermalnej aktywacji

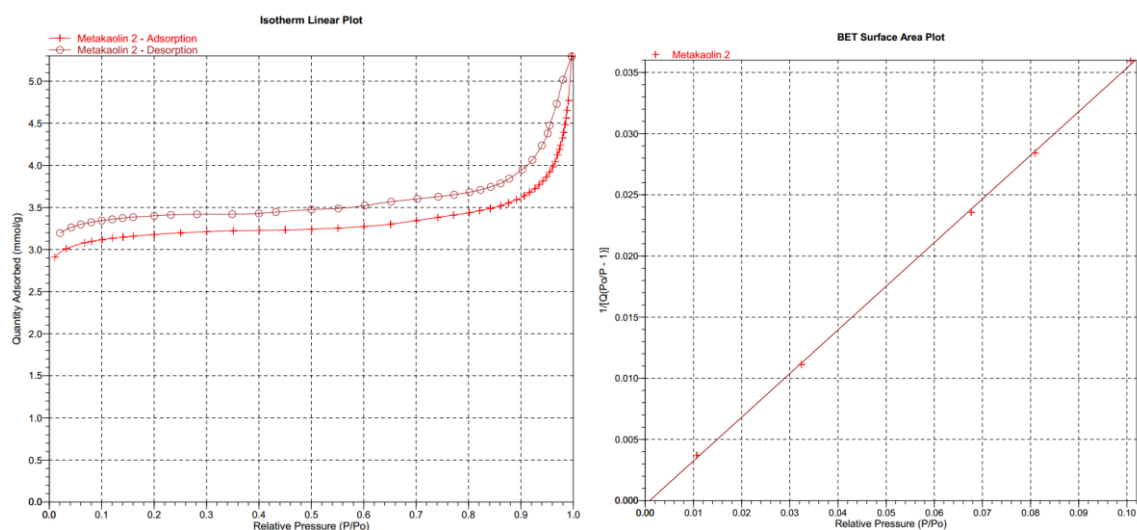
W wykorzystanych do syntezy zeolitów surowcach występowała także faza niekrystaliczna oraz mullit, co ma duże znaczenie dla tworzenia się faz zeolitowych [13]. Należałoby również dokładniej zbadać i przeprowadzić proces krystalizacji zeolitów, gdyż na zdjęciach SEM widoczne jest sporo faz, które nie przekrystalizowały. Niemniej jednak otrzymane wyniki świadczą o powstawaniu frakcji zeolitowych w badanych materiałach i przy założonych parametrach syntezy. W tabeli 4.1 przedstawiono zbiorcze zestawienie wszystkich wyników badań porozymetrycznych dla próbek 1-3.

Tabela 4.1. Wyniki badań porozymetrycznych otrzymanych materiałów zeolitowych dla próbek 1-3

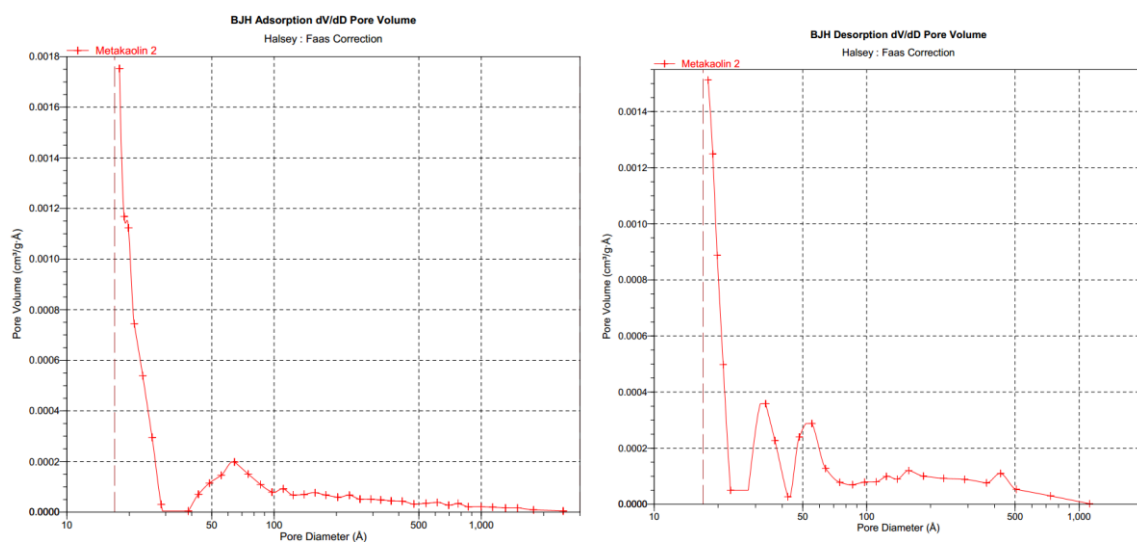
Nr próbki	Próbka nr 1 (metakaolin po aktywacji metodą niskotemperaturową)	Próbka nr 2 (mieszanka: 25 % popiół + 75 % metakaolin po syntezie metodą hydrotermalną)	Próbka nr 3 (mieszanka: 75 % popiół + 25 % metakaolin po syntezie metodą hydrotermalną)
Powierzchnia właściwa [m ² /g]			
Jednopunktowa metoda BET przy p/p ₀ =0,100	273,55	192,72	69,73
Powierzchnia BET	273,63	189,73	71,75
Powierzchnia Langmuira	306,88	227,95	87,60
Powierzchnia mikroporów t-metoda	240,46	153,38	16,73
Powierzchnia BJH (średnica porów 17- 3000 Å, adsorpcja)	24,88	35,51	62,77
Powierzchnia BJH (średnica porów 17- 3000 Å, desorpcja)	24,84	36,39	75,42
Objętość porów [cm ³ /g]			
Całkowita objętość porów w pojedynczym punkcie (adsorpcja)	0,184	0,143	0,188
Całkowita objętość mikroporów t-metoda	0,096	0,065	0,007
Objętość porów BJH (średnica porów 17- 3000 Å, adsorpcja)	0,085	0,079	0,187
Objętość porów BJH (średnica porów 17- 3000 Å, desorpcja)	0,076	0,078	0,189
Rozmiar porów [Å]			
Średnia szerokość porów (adsorpcja 4V/A BET)	26,84	30,21	105,06
Średnia średnica porów (adsorpcja 4V/A BJH)	136,97	88,78	119,15
Średnia średnica porów (desorpcja 4V/A BJH)	124,89	85,42	99,99

Wartość powierzchni właściwej BET dla metakaolinu po aktywacji metodą niskotemperaturową oraz dla mieszaniny 75 % metakaolinu i 25 % popiołu lotnego są zadawalające i wynoszą odpowiednio 273,63 [m²/g] i 189,73 [m²/g]. Uzyskane wartości są zbliżone do wartości charakterystycznych dla zeolitów dostępnych komercyjnie na rynku. Mieszanka, która zawierała 75 % popiołu lotnego i 25 % metakaolinu charakteryzowała się najmniej korzystnymi wynikami badań porozymetrycznych. Na rysunkach 4.4, 4.6 oraz 4.8 przedstawiono izotermy adsorpcji BET i wykresy BET dla wszystkich trzech próbek po przeprowadzonej aktywacji. Analizując wartości dotyczące powierzchni właściwej mikroporów wyznaczonych za pomocą t-metody dla próbki 1 i 2, które wynoszą odpowiednio 240,46 [m²/g] i 153,38 [m²/g], można jednoznacznie stwierdzić, iż w wyniku aktywacji uzyskano materiały mikroporowate. Dodatkowo fakt ten potwierdzają: całkowita objętość mikroporów

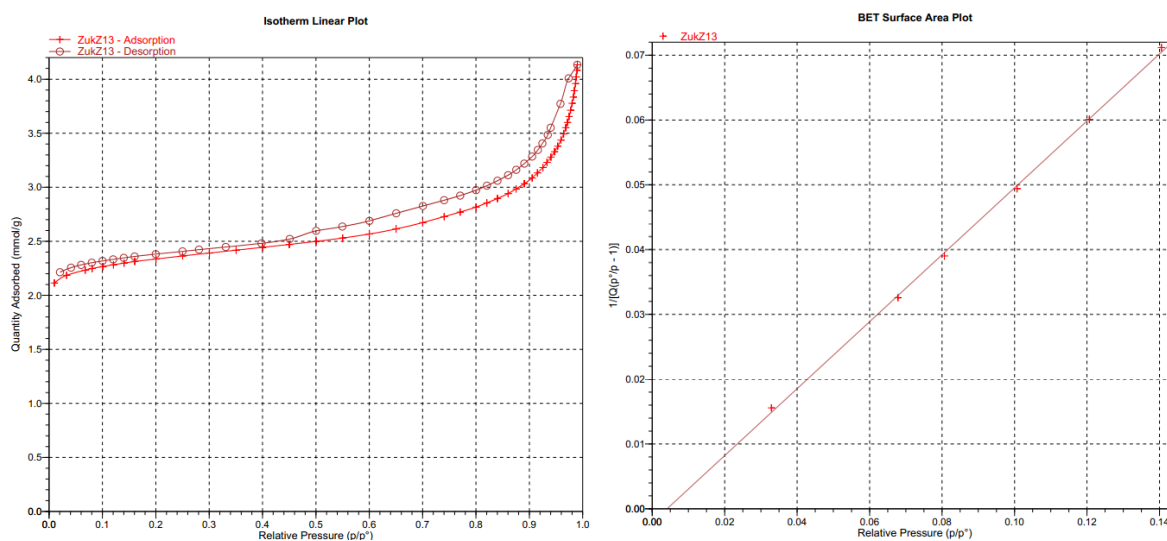
wyznaczona za pomocą t-metody oraz średni rozmiar porów. Na rysunkach 4.5, 4.7 oraz 4.9 przedstawiono powierzchnię i rozkład średnic mikroporów (adsorpcja i desorpcja) dla wszystkich trzech badanych próbek.



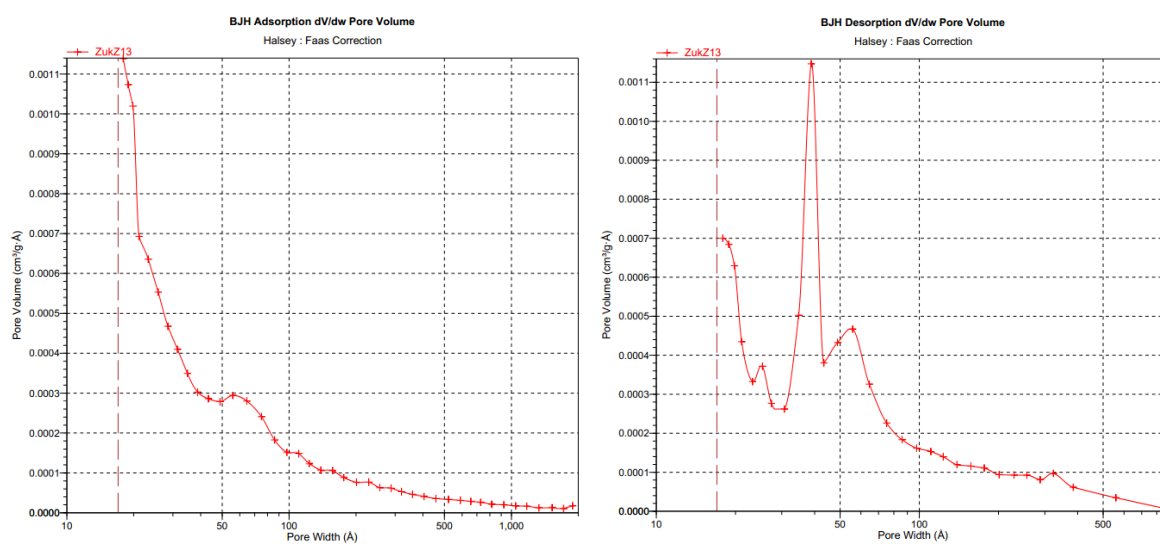
Rys. 4.4. Izoterma adsorpcji BET i wykres BET dla metakaolinu po aktywacji metodą niskotemperaturową



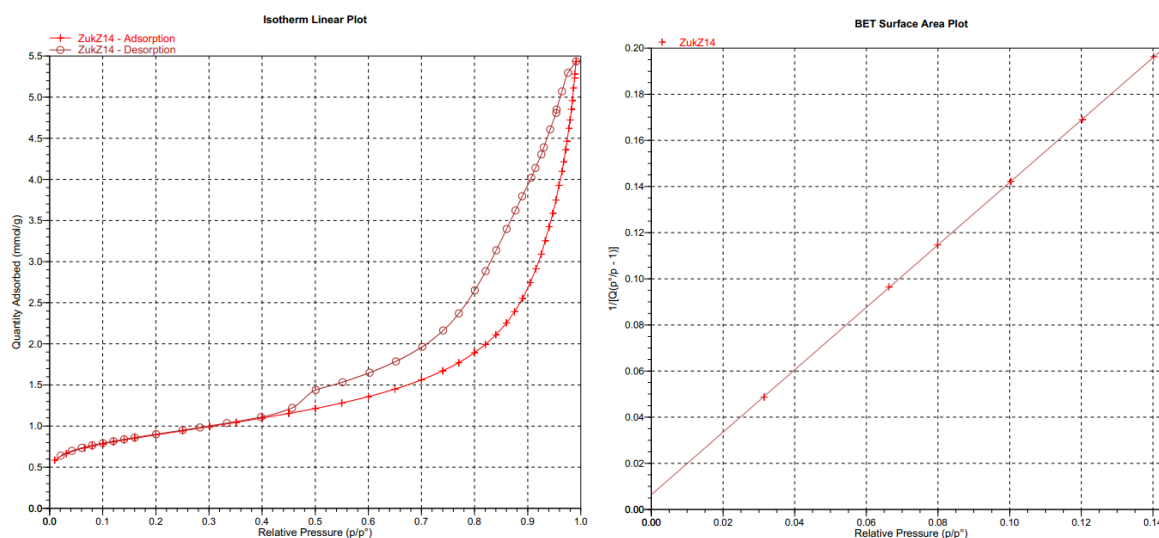
Rys. 4.5. Powierzchnia i rozkład średnic mikroporów (adsorpcja i desorpcja) dla metakaolinu po aktywacji metodą niskotemperaturową



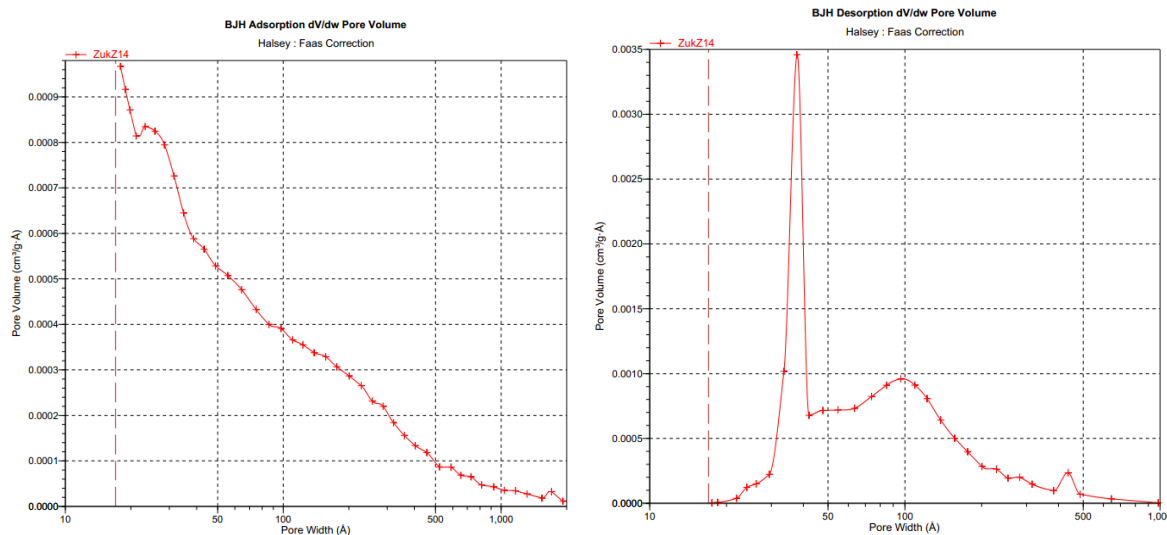
Rys. 4.6. Izoterma adsorpcji BET i wykres BET dla mieszaniny: 25 % popiół + 75 % metakaolin po aktywacji metodą hydrotermalną



Rys. 4.7. Powierzchnia i rozkład średnic mikroporów (adsorpcja i desorpcja) dla mieszaniny: 25% popiół + 75% metakaolin po aktywacji metodą hydrotermalną



Rys. 4.8. Izoterma adsorpcji BET i wykres BET dla mieszaniny: 75 % popiół + 25 % metakaolin po aktywacji metodą hydrotermalną



Rys. 4.9. Powierzchnia i rozkład średnic mikroporów (adsorpcja i desorpcja) dla mieszaniny: 75% popiół + 25% metakaolin po aktywacji metodą hydrotermalną

Uzyskano dobry wynik dotyczący wielkości powierzchni właściwej i mikroporowatości, mimo iż stosowane do procesu alkalicznej aktywacji surowce były zanieczyszczone m.in. pozostałościami niespalonego węgla. Zwiększenie zawartości popiołu lotnego w mieszaninie z metakaolinem powoduje znaczące zmiany powierzchni właściwej i powierzchni mikroporów. Także stosunek molowy $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ dla próbki nr 2 był mniejszy niż w przypadku próbki nr 3, co wg danych literaturowych ma wpływ na powstawanie struktur zeolitowych [14]. Porównując wyniki badań porozymetrycznych zawarte w tabeli 4.1 uzyskane dla próbki 2 i 3 stwierdzić można, że aktywacja przeprowadzana metodą hydrotermalną jest odpowiednia dla mieszanin popiołu i metakaolinu.

5. Wnioski

Na podstawie przeprowadzonych badań sformułowano następujące wnioski:

1. Aktywacja metakaolinu oraz jego mieszanin z popiołem lotnym w wyniku zastosowania metod: niskotemperaturowej oraz hydrotermalnej pozwala na otrzymanie struktur zeolitowych: sodalit, fozajyt, zeolit X.
2. Uzyskane parametry dotyczące powierzchni właściwej (BET) oraz mikroporowatości (t-metoda) dla próbek 1 i 2 są porównywalne do parametrów zeolitów komercyjnie dostępnych na rynku.
3. Zwiększenie zawartości popiołu lotnego w mieszaninie z metakaolinem (próbka 3) powoduje spadek wielkości powierzchni właściwej (BET), dodatkowo zmniejsza się także powierzchnia mikroporów (t-metoda).
4. Poprzez stosowanie mieszanin popiołów lotnych z materiałami naturalnymi takimi jak metakaolin można sterować stosunkami molowymi $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$. Dzięki temu możemy otrzymywać różnego rodzaju materiały zeolitowe i mikroporowate. Mogą one zostać wykorzystane m.in. do osuszania i oczyszczania gazów, usuwania metali ciężkich z wody a także dezaktywacji odpadów nuklearnych [17].

Literatura

1. Auerbach S.M., Carrado K.A., Dutta P.K.: Handbook of Zeolite Science and Technology; Marcel Dekker, Inc. 2003
2. Wrzosek J., Gworek B.: Zastosowanie zeolitów do adsorpcji pozostałości środków ochrony roślin. Modelowe badania porównawcze; Przemysł Chemiczny 2011/2
3. Chaber P., Gworek B.: Zastosowanie zeolitów typu A do oczyszczania ścieków komunalnych z wielopierścieniowych węglowodorów aromatycznych; Przemysł Chemiczny 2011/2
4. Gładysz-Płaska A., Kowalska-Ternes M., Majdan M.: Adsorpcja jonów toksycznych metali na zeolitach; Przemysł Chemiczny 2000/9
5. Guisnet M., Gilson J.P.: Zeolites for Cleaner Technologies; Imperial College Press, 2002
6. Suhecki T.T.: Zeolity z popiołów lotnych. Otrzymywanie i aplikacje w inżynierii środowiska; Ossolineum 2005
7. Franus W., Wdowin M.: Wykorzystanie popiołów lotnych klasy F do produkcji materiału zeolitowego na skalę półtechniczną; Polityka Energetyczna; T14, Z2, 2011
8. Ściubidło A., Majchrzak-Kucęba I., Nowak W.: Wpływ składu chemicznego popiołów lotnych na efektywność procesu syntezy zeolitów Na-X
9. Żygadło M., Seweryn A., Woźniak M.: Synteza zeolitów na bazie popiołów lotnych z wybranych instalacji odzysku ciepła; Archiwum Gospodarki Odpadami i Ochrony Środowiska; Vol. 12 nr 1 (2010), s. 15-26
10. Elliot A.D., Dong-ke Z.: 2005 - Controlled Release Zeolite Fertilisers: A Value Added Product Produced from Fly Ash, International Ash Utilization Symposium (IAUS) and World of Coal Ash (WOCA)
11. Bukalak D., Majchrzak-Kucęba I., Nowak W.: Wpływ zawartości Si i Al w popiele lotnym na tworzenie się frakcji zeolitowych typu Na-P1; III Ogólnopolski Kongres Inżynierii Środowiska 13-17 września 2009; Lublin 2009
12. Thuadaj P., Nuntiya A.: Effect of the $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ ratio on the synthesis of Na-X zeolite from Mae Moh fly ash; Science Asia 38 (2012), s. 295-300
13. Shigimoto N., Hayashi H., Miyaura K., Selective formation of Na-X zeolite from coal fly ash by fusion with sodium hydroxide prior to hydrothermal, in: Journal of Materials Science, Vol. 28, (1993), s. 4781-4786

14. Ibrahim H.A., El - Kanash A.M., Hanafy M., Abdel Monem N.M: Examination of the use of synthetic Zeolite NaA - X as backfill material in a radioactive waste disposal facility: Thermodynamic approach 2008, in: Chemical Engineering Journal 144 (2008), s. 67 – 74
 15. Michalikowa F. i inni: Technologie przeróbcze uszlachetniania, zawierających części palne, popiołów lotnych z węgla kamiennych spalanych w elektrociepłowniach; Journal of The Polish Mineral Engineering Society, styczeń-grudzień 2010
 16. Coundy Colin S., Cox P. A.: The hydrothermal synthesis of zeolites: Precursors intermediates and reaction mechanism; Microporous and Mesoporous Materials 82 (2005) 1-78
 17. Anielak A. M. Modyfikowane zeolity w inżynierii środowiska, Ekotechnika 4/2005, pp 12 – 15
-