

Właściwości odpadowego popiołu lotnego powstałego ze spalania węgla kamiennego po zastosowaniu suchych sorbentów sodowych w oczyszczaniu gazów spalinowych

JOANNA GLUZIŃSKA*, BARBARA WALAWSKA, DOROTA ŁUCZKOWSKA

Instytut Nowych Syntez Chemicznych, Oddział Chemii Nieorganicznej „IChN” w Gliwicach

ANNA PAJDAK

Instytut Mechaniki Górotworu PAN; ul. Reymonta 27, 30-059 Kraków

Streszczenie

W artykule przedstawiono charakterystykę odpadowych popiołów lotnych uzyskanych w procesie spalania węgla kamiennego w instalacji z kotłem fluidalnym. Jako sorbent do usuwania poprocesowych zanieczyszczeń gazowych wykorzystano wodorowęglan sodu w postaci sody oczyszczonej i bikarbonatu surowego wysuszonego. Uzyskane popioły lotne poddano analizie składu fazowego (RTG) oraz analizie mikroskopowej struktury powierzchni za pomocą elektronowego mikroskopu skaningowego SEM i analizie widm EDS. W zależności od rodzaju zastosowanego sorbentu sodowego uzyskano popioły lotne różniące się składem fazowym oraz budową strukturalną.

Słowa kluczowe: popiół lotny, uboczne produkty spalania, sorbenty sodowe

1. Wstęp

Ilość i jakość popiołu powstającego w procesach spalania węgla kamiennego zależy zarówno od fizyko-chemicznych właściwości eksploatowanych pokładów węgla oraz towarzyszącej im skały płonnej, jak i od procesów wzbogacania, stosowanych w procesach przerobczych oraz typu procesu przetwarzania węgla na energię elektryczną lub ciepło. Główne składniki popiołu to krzemionka, tlenki glinu, żelaza, wapnia i magnezu. W zależności od udziału poszczególnych komponentów, popioły klasyfikuje się jako krzemianowe ($\text{SiO}_2 > 40\%$, $\text{Al}_2\text{O}_3 < 30\%$), glinowe ($\text{SiO}_2 > 40\%$, $\text{Al}_2\text{O}_3 > 30\%$) lub wapniowe ($\text{SiO}_2 > 30\%$, $\text{Al}_2\text{O}_3 < 30\%$).

W procesach przetwarzania surowców energetycznych w kotłach fluidalnych uzyskiwane są dwie frakcje popiołu, tj. popiół lotny oraz popiół denny. Popiół lotny z kotłów fluidalnych charakteryzuje duża zmienność składu fazowego. Krystaliczne formy, takie jak anhydryt (CaSO_4), kalcyt (CaCO_3) i kwarc (SiO_2) są obecne w największym udziale. W porównaniu z popiołem uzyskanym ze spalania w kotłach konwencjonalnych nie zawiera fazy szklistej, natomiast zawiera znaczne ilości fazy amorficznej występującej w postaci odwodnionych minerałów ilastych typu metakaolinitu. Jeżeli do procesu oczyszczania gazów odlotowych stosuje się związki wapnia, wówczas w popiołach lotnych pojawia się także wolny tlenek wapnia (CaO) i nieprzereagowany sorbent [Łaskawiec i in., 2011 (a)]. Przykładowy skład fazowy popiołów uzyskanych ze spalania węgla kamiennego w Elektrowni Katowice i węgla brunatnego w Elektrowni Turów w kotłach fluidalnych przedstawiono w tabeli 1.

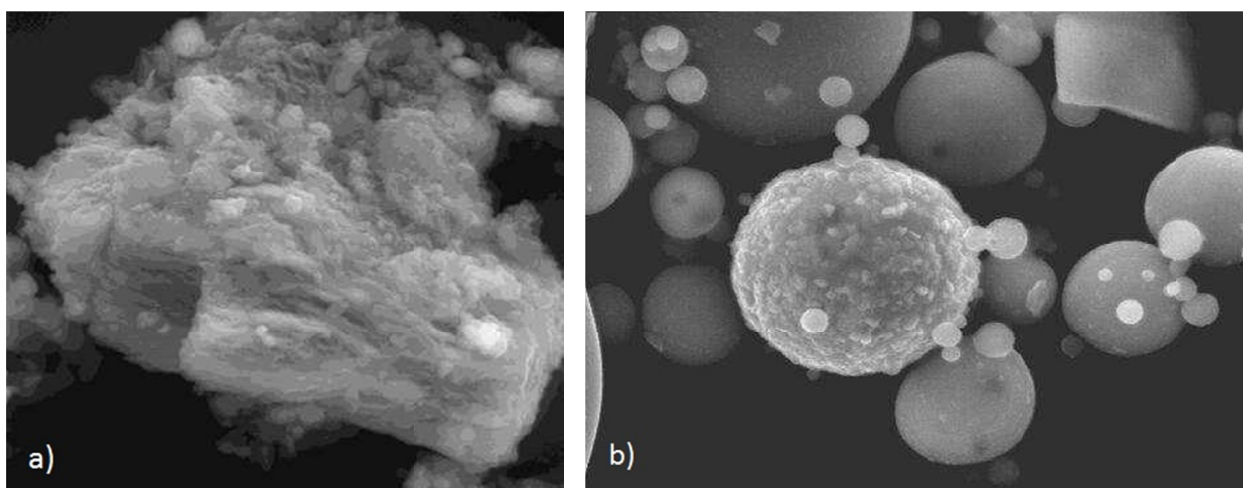
* Autor do korespondencji: Instytut Nowych Syntez Chemicznych, Oddział Chemii Nieorganicznej „IChN” w Gliwicach, ul. Sowińskiego 11, 44-101 Gliwice, www.ichn.gliwice.pl, joanna.gluzinska@ichn.gliwice.pl

Tab. 1. Skład fazowy popiołów ze spalania węgla kamiennego i brunatnego w kotłach fluidalnych [Kabała i in., 2006]

Skład fazowy	Węgiel kamienny	Węgiel brunatny
	%	%
SiO ₂	16,4	2,3
CaSO ₄	8,6	7,1
CaO	1,2	6,6
CaCO ₃	2,2	5,2
Faza bezpostaciowa związana z rozkładem minerałów ilastych typu metakaolinitu	70,2	79,1

W składzie fazowym popiołu lotnego uzyskanego ze spalania w kotłach konwencjonalnych mogą pojawiać się składniki krystaliczne z grupy silimanitów jak mullit. Mullit ($3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$) powstaje w wyniku rozpadu minerałów z grupy kaolinitów w trakcie procesu spalania w temperaturze 750-800°C. Jest trwały i zachowuje swoją strukturę w temperaturze do 1800°C. Naturalnie występujący mullit zawiera tytan, który stabilizuje wiązania w układzie Si-Al. W przypadku mullitu syntetycznego – przeobrażonego (proces spalania fluidalnego) funkcję tę przejmuje żelazo (III) [Cameron, 1977]. Popiół lotny pochodzący ze spalania fluidalnego, w porównaniu z popiołem z procesów spalania konwencjonalnego, charakteryzuje wysoka zawartość tlenku wapnia (ok. 20-45%) i anhydrytu, niższa zawartość związków krzemu (5-25%) i glinu (4-15%) [Sellakumar i in., 1999]. Występuje w nim także pewna ilość węgla pierwiastkowego, będąca pozostałością niespalonego węgla, której zawartość może się wahać w zakresie 1-5% C_{org.} [Sarbak i Kramer-Wachowiak, 2012].

Popioły z różnych typów palenisk różnią się także kształtem i wielkością ziaren [Łaskawiec i in., 2011 (b)]. Obraz mikroskopowy SEM dwóch typów popiołów przedstawiono na rysunku 1.



Rys. 1. Powierzchnia ziaren popiołu lotnego a) ze spalania w warstwie fluidalnej; b) krzemionkowego, pow. 12 000× [Łaskawiec i in., 2011 (b)]

Właściwości produktów spalania zależą w dużej mierze od sorbentów zastosowanych w procesach oczyszczania gazów odlotowych [Zapotoczna-Sytek i in., 2015; Pflughoeft-Hassett i in., 2009; Renedo i Fernández, 2008; Patent PL207649, 2011]. Często wskazuje się na wpływ nie tylko rodzaju zastosowanego sorbentu, ale także miejsca i sposobu jego wprowadzenia, na skład i właściwości popiołu lotnego oraz przebieg procesu oczyszczania spalin. W pracy [Pflughoeft-Hassett i in., 2009] opisano badania prowadzone z zastosowaniem sorbentów na bazie związków magnezu (MgO, Mg(OH)₂), wapnia (Ca(OH)₂) i sodu (NaHSO₄, Na₂CO₃, trona), wprowadzanych w postaci zawiesiny lub fazy stałej, w górnej i dolnej części kotła. W powstałym popiele lotnym oznaczano skład chemiczny, pH, wilgotność, straty prażenia, przeprowadzono testy wymywalności pierwiastków, takich jak arsen, selen, rtęć i in., a także zbadano właściwości pozwalające na wykorzystanie uzyskanego popiołu w technologii wytwarzania betonu.

W próbkach popiołu pochodzących ze spalania węgla kamiennego, podczas którego stosowano sorbenty sodowe, w składzie chemicznym zaobserwowano znaczny wzrost stężenia sodu, które przewyższało nawet ośmiokrotnie wartość w popiołach z procesów spalania z wykorzystaniem innych sorbentów. Podobnie

relatywnie wysokie było stężenie siarczanów. Najmniej widoczne różnice w charakterystyce porównywalnych popiołów – kilkuprocentowe – dotyczyły zawartości krzemu (SiO_2) oraz tlenku glinu (Al_2O_3). Metale ciężkie jak np. ołów, kadm, antymon, arsen, nikiel czy wanad występowały w ilościach porównywalnych z wartością odniesienia (popiół wzorcowy), niezależnie od sorbentu zastosowanego w procesie oczyszczania.

W pracy [Raclavska i in., 2010] przedstawiono charakterystykę geochemiczną popiołów lotnych powstających w procesie spalania węgla kamiennego w kotle pyłowym. Sorbent sodowy wprowadzono w strumień gazów odlotowych – przed elektrofiltrami – w trzech wydatkach: 100-150 kg/h, 200-300 kg/h, 300-450 kg/h. Temperatura strumienia gazów wahała się w zakresie 165-195°C. Skład chemiczny popiołów lotnych odbieranych z elektrofiltrów był zróżnicowany, co wynikało z różnego udziału masowego zastosowanego sorbentu i przejawiało się m.in. różną podatnością komponentów odbieranych strumieni na wymywanie. Analiza RTG wykazała w składzie fazowym popiołów dominację form bezpostaciowych (glinokrzemiany) nawet do 95%. Zawartość form krystalicznych występowała w śladowych ilościach. Zawartość krzemionki wyniosła 3,5-12,7%, natomiast zawartość CaO – około 1%. Inne formy krystaliczne, które pojawiły się w badanych popiołach to m.in.: gips ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), anhydryt, kalcyt, aragonit (CaCO_3) o rombowym układzie krystalograficznym, brucyt ($\text{Mg}(\text{OH})_2$), dolomit ($\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$), huntyt ($\text{CaMg}_3(\text{CO}_3)_4$), magnezyt (MgCO_3). W roztworze po ługowaniu popiołów najwyższy stopień nasycenia wykazał dolomit i huntyt, co wpłynęło na intensywność pojawiania się innych minerałów. Zaobserwowano ponadto, że wzrostowi stopnia odsiarczenia gazów odlotowych towarzyszyła niższa zawartość dolomitu, huntytu, kalcytu i brucytu. Analiza nie wykazała obecności form krystalicznych sodu w badanych roztworach ze względu na wysoką rozpuszczalność tych form. Podczas odparowywania roztworów, zaobserwowano natomiast pojawienie się jako pierwszych związków sodu, takich jak gelusyt ($\text{Na}_2\text{Ca}(\text{CO}_3)_2 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$) i pirsonit ($\text{Na}_2\text{Ca}(\text{CO}_3)_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$).

2. Charakterystyka sorbentów sodowych wykorzystanych w oczyszczaniu spalin z procesu spalania

W ramach prac własnych badano proces suchego oczyszczania gazów odlotowych z procesu spalania węgla kamiennego, z uwzględnieniem analizy wpływu rodzaju zastosowanego sorbentu na właściwości popiołu lotnego. W badaniach wykorzystano sorbenty sodowe w postaci wodorowęglanu sodu (NaHCO_3), tj. sody oczyszczonej oraz bikarbonatu surowego wysuszonego. Soda oczyszczona to produkt zawierający ponad 99% wodorowęglanu sodu, natomiast bikarbonat surowy zanieczyszczony jest ługami pokryształizacyjnymi, których główny składnik stanowi jon amonowy. Różnica składu elementarnego przekłada się na zróżnicowanie właściwości fizykochemicznych, a zatem reaktywność tych sorbentów i w efekcie skuteczność oczyszczania spalin [Pajdak i Walawska, 2015; Pajdak i in., 2016].

Badania przeprowadzono w instalacji z kotłem fluidalnym, dozując sorbent do drugiego ciągu spalinowego, za układem odpylania. Ilość wprowadzonego sorbentu odpowiadała stosunkowi molowemu sodu zawartego w sorbencie do siarki zawartej w węglu ($2\text{Na}/\text{S}$) równemu 1,0. Sorbenty poddano wstępnej aktywacji mechanicznej w młynie udarowym, co zapewniło zwiększenie ich powierzchni właściwej i tym samym powierzchni kontaktu z zanieczyszczeniami obecnymi w spalinach. Aktywowane mechanicznie sorbenty charakteryzowały się średnią wielkością uziarnienia równą 12,2 μm (soda oczyszczona) i 11,5 μm (bikarbonat surowy wysuszony).

3. Metodyka badań

Popioły lotne uzyskane w procesie spalania węgla kamiennego z zastosowaniem suchego oczyszczania spalin, poddano analizie składu fazowego (analiza RTG) oraz analizie mikroskopowej struktury powierzchni i analizie widm EDS.

Analizę RTG wykonano z wykorzystaniem dyfraktometru rentgenowskiego Empyrean firmy PANalytical stosując filtrowane promieniowanie kobaltu w konfiguracji z detektorem Pixcel. Identyfikacji składu fazowego dokonano w oparciu o bazę International Centre for Diffraction Data PDF-4+, w wersji 2012.

Analizę struktury powierzchni wykonano za pomocą elektronowego mikroskopu skaningowego Philips XI 30 Esem z Analizatorem EDS EDAX (SEM). Umożliwił on odwzorowywanie topografii cząstek w przestrzeni rzeczywistej (bez pośrednictwa dyfrakcji) oraz szacunkowe określenie ich średniego rozmiaru. Z każdej próbki przygotowano preparat do badań na podłożu węglowym umieszczonym na podstawowym stoliku aluminiowym, nanosząc cienką warstwę próbki, a następnie napyłając ją złotem. Dla każdego preparatu

zarejestrowano kilka obrazów stosując detektor BSE (elektronów wstecznie rozproszonych). Obrazy rejestrowano przy powiększeniu w zakresie od 50× do 20000×. Badania przeprowadzono w trybie wysokopróżniowym, przy napięciu 15 kV. W wybranych punktach próbek wykonano mikroanalizy rentgenowskie EDS.

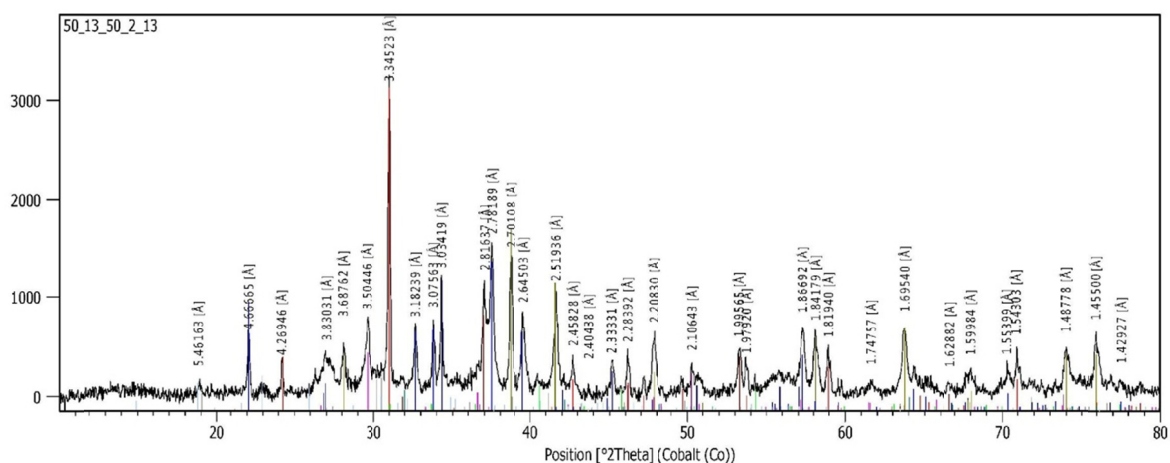
4. Wyniki badań

3.1. Analiza składu fazowego

Analiza RTG popiołów lotnych uzyskanych z procesu spalania przy zastosowaniu różnych sorbentów sodowych wykazała obecność głównie siarczanu (VI) sodu w formie tenardytu oraz kwarcu. W obrazie krystalograficznym popiołów widoczne były ponadto kryształy siarczanu wapnia, siarczanu żelaza oraz tlenki tych pierwiastków. Skład fazowy popiołów przedstawiono w tabeli 2, natomiast dyfraktogramy rentgenowskie badanych próbek przedstawiono na rysunkach 2 i 3.

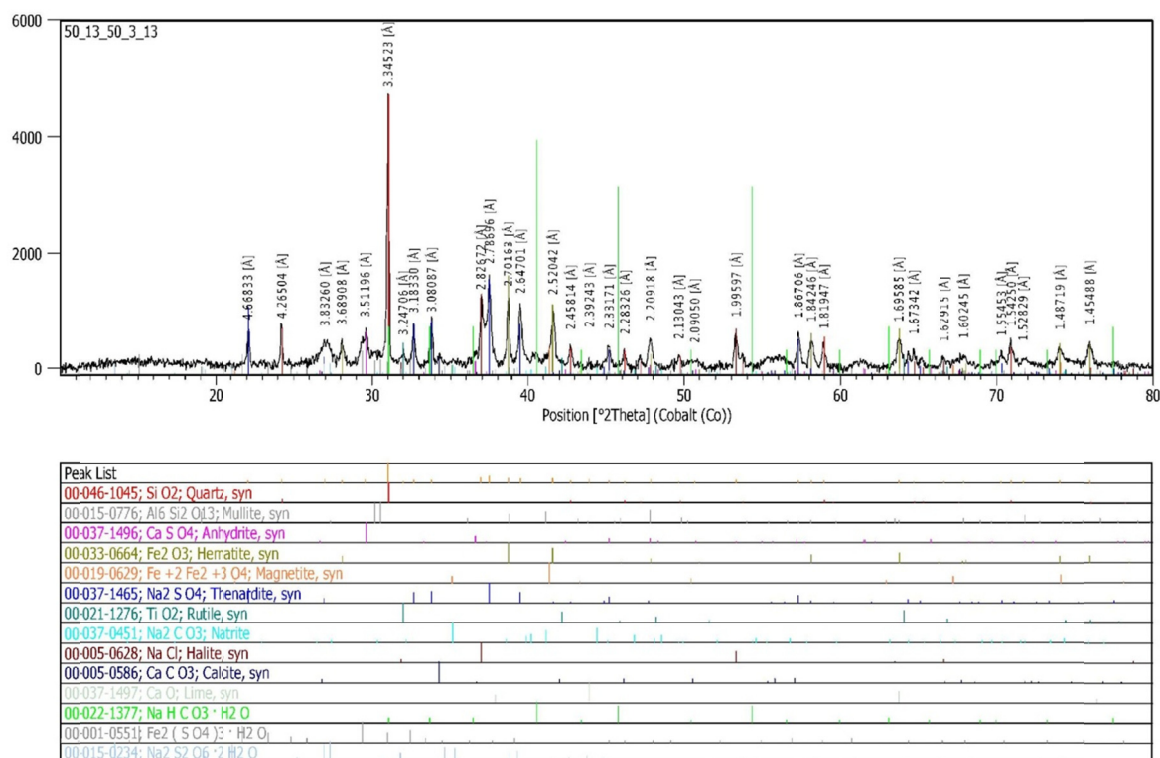
Tab. 2. Fazy krystaliczne minerałów zidentyfikowane w próbkach popiołów (analiza RTG)

Sorbent	Soda oczyszczona	Bikarbonat surowy wysuszony
Średnia średnica ziarna	12,2 μm	11,5 μm
Skład fazowy	Tenardyt Na ₂ SO ₄ Kwarc SiO ₂ Mullit Al ₆ Si ₂ O ₁₃ Kalcyt CaCO ₃ Anhydryt CaSO ₄ Rozenit FeSO ₄ ·4H ₂ O Wapno CaO Peryklaz MgO Hematyt Fe ₂ O ₃ Magnetyt Fe ₃ O ₄ Rutyl TiO ₂ Halit NaCl	Tenardyt Na ₂ SO ₄ Na ₂ S ₂ O ₆ ·2H ₂ O Natryt Na ₂ CO ₃ NaHCO ₃ ·H ₂ O Kwarc SiO ₂ Mullit Al ₆ Si ₂ O ₁₃ Kalcyt CaCO ₃ Anhydryt CaSO ₄ Fe ₂ (SO ₄) ₃ ·H ₂ O Wapno CaO Hematyt Fe ₂ O ₃ Magnetyt Fe ₃ O ₄ Rutyl TiO ₂ Halit NaCl



Peak List
00-305-0586; Ca C O3; Calcite, syn
00-346-1045; Si O2; Quartz, syn
00-337-1496; Ca S O4; Anhydrite, syn
00-315-0776; Al6 Si2 O13; Mullite, syn
00-333-0664; Fe2 O3; Hematite, syn
00-319-0629; Fe +2 Fe2 +3 O4; Magnetite, syn
00-337-1465; Na2 S O4; Thenardite, syn
00-305-0628; Na Cl; Halite, syn
00-321-1276; Ti O2; Rutile, syn
00-319-0633; Fe S O4 14 H2 O; Rozenite, syn
00-337-1497; Ca O; Lime, syn
00-345-0946; Mg O; Periclase, syn
00-322-1377; Na H C O3 · H2 O

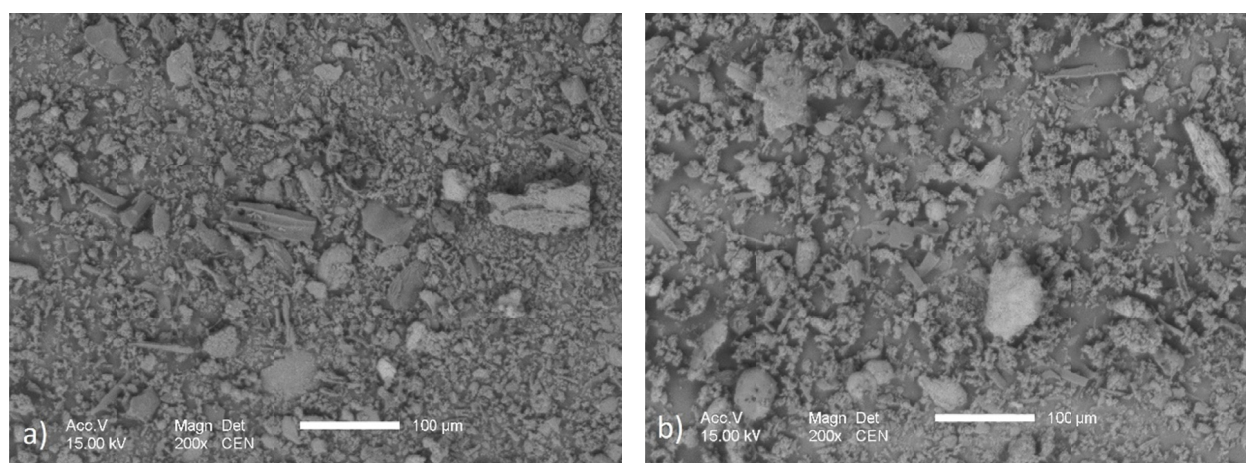
Rys. 2. Dyfraktogram rentgenowski popiołu lotnego po zastosowaniu sody oczyszczonej jako sorbentu



Rys. 3. Dyfraktogram rentgenowski popiołu lotnego po zastosowaniu bikarbonatu surowego wysuszonego jako sorbentu

3.2. Analiza mikroskopowa

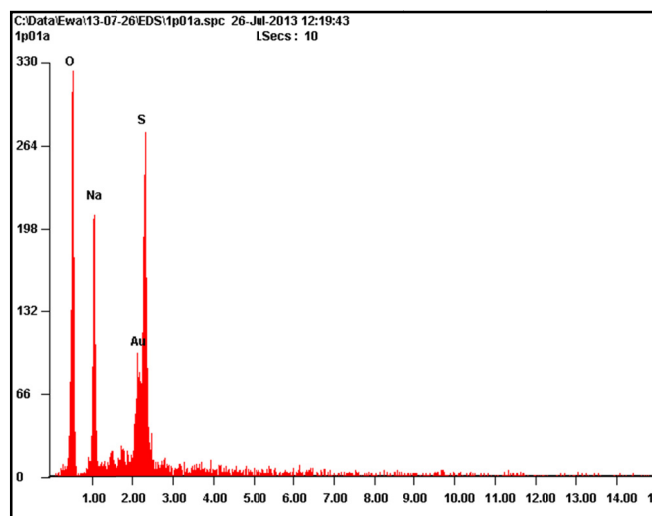
W wyniku analizy mikroskopowej SEM stwierdzono, że w próbkach popiołu lotnego uzyskanego z procesu spalania i oczyszczania gazów odlotowych z wykorzystaniem obydwu sorbentów dominuje szkliwo glinokrzemianowe i koksik. Nieco rzadziej występują w nich cząsteczki zbudowane z tlenków żelaza lub siarczanu wapnia. Na rysunku 4 przedstawiono mikrofotografie SEM powierzchni popiołów lotnych. Wielkość cząstek popiołu lotnego często osiąga wielkość kilkudziesięciu μm , a czasami przekracza 100 μm , natomiast cząstki sorbentu są znacznie mniejsze i osiągają wielkość kilkunastu μm (Tab. 2).



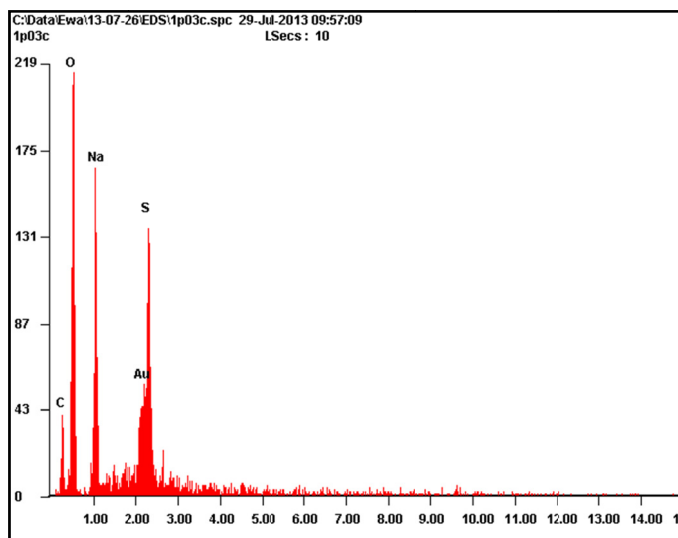
Rys. 4. Ziarna popiołu lotnego po procesie spalania węgla kamiennego i oczyszczania gazów spalinowych, przy zastosowaniu jako sorbentu: a) sody oczyszczonej, pow. 200 \times b) bikarbonatu surowego wysuszonego, pow. 200 \times

W żadnej z próbek nie zaobserwowano cząstek zawierających przeważającą ilość węgla sodu. Wszystkie analizowane kilkunastu-mikrometrowe porowate cząstki zbudowane były głównie z siarczanu (VI) sodu, a w ich widmach EDS występowały piki tlenu, sodu i siarki (Rys. 5). W niektórych widmach,

zwłaszcza rejestrowanych w miejscach, gdzie ziarna budujące cząstkę sorbentu były bardzo drobne, oprócz pików siarki pojawił się pik węgla (Rys. 6). W tych miejscach pod cienką warstwą ziaren siarczanu prawdopodobnie obecna jest pozostałość węgla sodu.



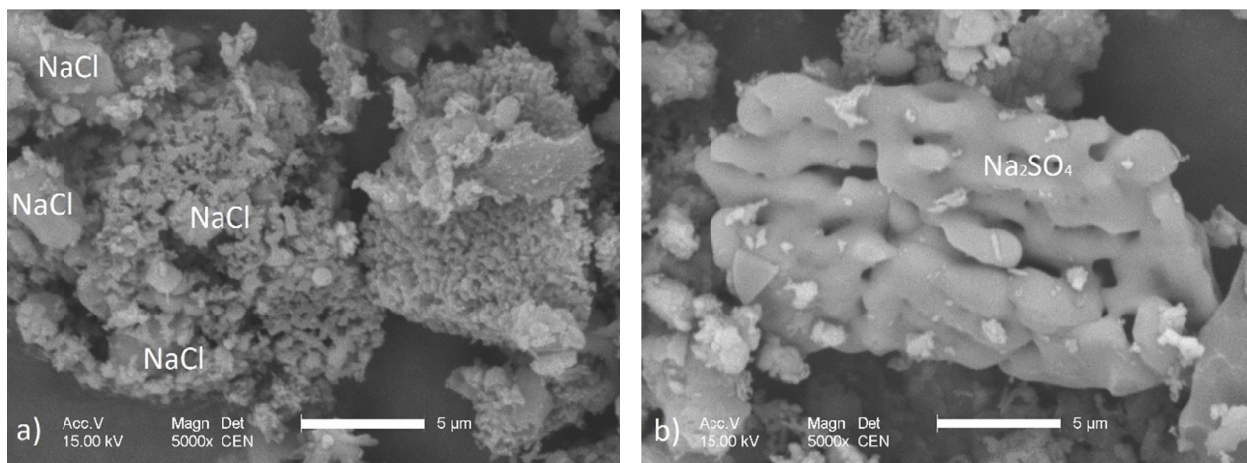
Rys. 5. Widmo EDS siarczanu (VI) sodu



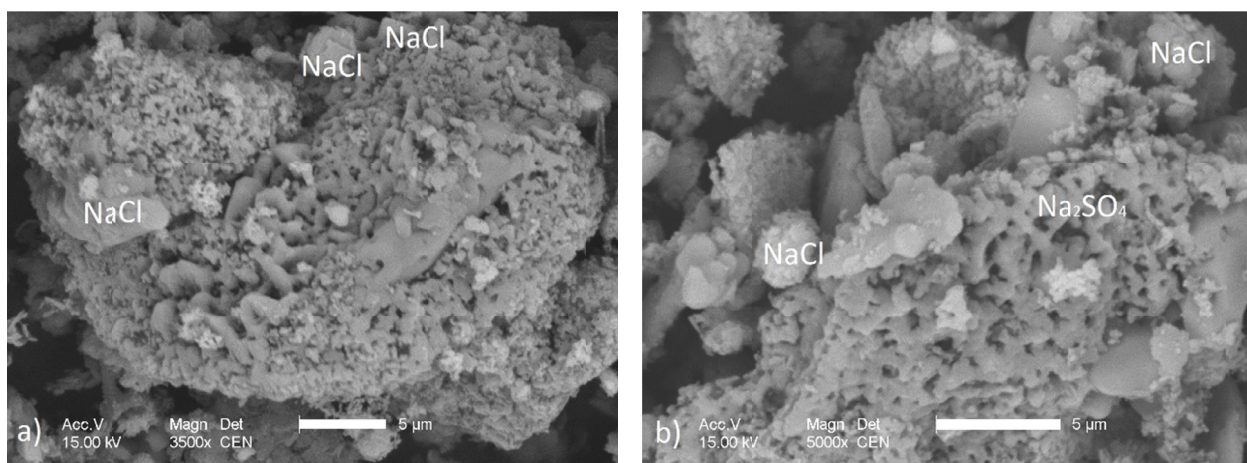
Rys. 6. Widmo EDS siarczanu (VI) sodu na węglanie sodu

Na powierzchni cząstek sorbentu często obserwowano przyczepione okruchy szkliwa glinokrzemianowego i tlenków żelaza. Na wielu cząstkach stwierdzono obecność wykwitów chlorku sodu (NaCl), co utrudniało obserwację ich powierzchni. Czasem NaCl tworzyło kilkumikrometrowe kryształy. Niekiedy spotykało się również skupienia drobnych ziaren węgla wapnia. Na rysunku 7 zestawiono zdjęcia obrazujące ziarna sorbentu w próbce popiołu lotnego uzyskanego w procesie oczyszczania gazów odlotowych z zastosowaniem sody oczyszczonej jako sorbentu. Rysunek 7a) przedstawia powstające na węglanie sodu ziarna chlorku sodu i początkowe stadium przeobrażenia węgla sodu w siarczan (VI) sodu, którego ziarna są wielkości poniżej 1 μm . Na rysunku 7b) rozrastające się ziarna siarczanu sodu zlały się ze sobą. Rys. 8 pokazuje cząstki zbudowane z ziaren siarczanu o różnej wielkości z wbudowanymi cząstkami chlorku sodu i drobnych pozostałości węgla sodu.

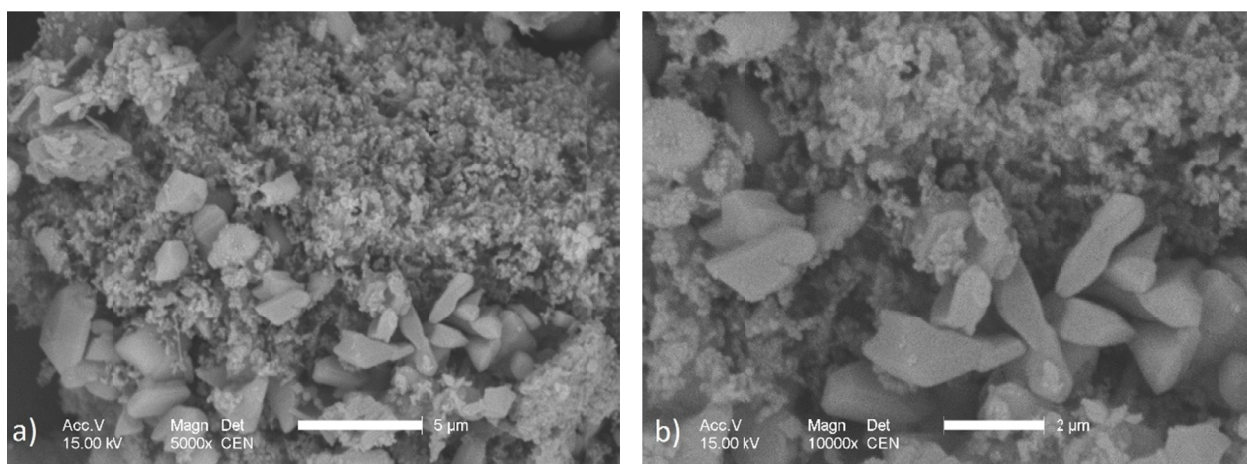
Na rysunkach 9a) i 9b) przedstawiono mikrofotografie cząstek sorbentu, zawartych na cząstkach popiołu lotnego, uzyskanych w procesie oczyszczania gazów odlotowych z zastosowaniem bikarbonatu surowego jako sorbentu. Przy różnym powiększeniu widoczne są kilkumikrometrowe ziarna siarczanu (VI)



Rys. 7. Powierzchnia ziaren, pow. 5000×; a) sody oczyszczonej z wbudowanymi cząstkami chlorku sodu; b) siarczanu (VI) sodu

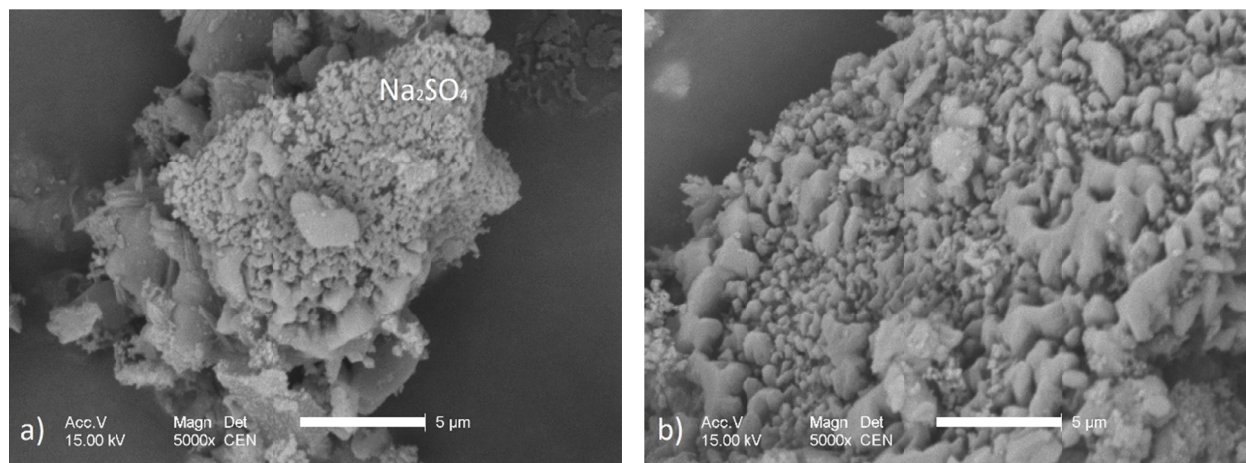


Rys. 8. Powierzchnia ziaren siarczanu (VI) sodu i węgłanu sodu z wbudowanymi cząstkami chlorku sodu, a) pow. 3500×; b) pow. 5000×



Rys. 9. Powierzchnia ziaren siarczanu (VI) sodu narastające na węglenie sodu, a) pow. 5000×; b) pow. 1000×

sodu narastające na węglanie, częściowo przeobrażonym w siarczan. Rysunki 10a) i 10b) przedstawiają cząstki zbudowane z ziaren siarczanu sodu o różnej wielkości. Podobnie jak w przypadku popiołów otrzymanych przy zastosowaniu sody oczyszczonej jako sorbentu, najdrobniejsze z nich identyfikowane są jako pozostałości węglanu sodu.



Rys. 10. Powierzchnia ziaren bikarbonatu surowego wysuszonego z wbudowanymi cząstkami siarczanu (IV) sodu, pow.5000x

5. Podsumowanie

W wyniku reakcji zachodzących podczas procesu spalania węgla kamiennego z jednoczesnym oczyszczaniem spalin sorbentami sodowymi, w popiołach lotnych pojawiły się związki będące produktami tych reakcji. W próbkach popiołów lotnych obecne były głównie ziarna siarczanu (VI) sodu, węglanu wapnia, krzemionki, a także tlenków żelaza i tlenków glinu. Zaobserwowano, że wielkość cząstek siarczanu sodu zależała od zastosowanego sorbentu. W przypadku sorbentu w postaci sody oczyszczonej rozmiar tych ziaren nie przekraczał 1 µm, podczas gdy zastosowanie sorbentu w postaci bikarbonatu surowego wysuszonego skutkowało obecnością w stałych produktach spalania znacznie większych kryształów siarczanu sodu, o wielkości od kilku do kilkunastu µm. Często formowały się one na kryształach węglanu sodu częściowo już przeobrażonych w siarczan sodu.

Analiza mikroskopowa SEM popiołów lotnych wraz z analizą widm EDS, jak i analiza RTG, zidentyfikowały w obu próbkach popiołów te same formy krystalograficzne, głównie tenardyt, kwarc, mulit, hematyt, magnetyt, rutyl i halit. Różnica pojawiła się dla układów charakteryzujących formy węglanowe. W próbce z procesu spalania z udziałem sorbentu w postaci bikarbonatu surowego wysuszonego zostały zidentyfikowane dodatkowo węglan oraz wodorowęglan sodu w postaci natrytu i monohydratu. Formy te są widoczne na dyfraktogramie rentgenowskim (Rys. 3), a obecny w nich węgiel w widmie EDS (Rys. 6).

Charakter składu fazowego i struktura warunkują kierunki wykorzystania popiołów lotnych. Komercyjne wykorzystanie popiołów lotnych z procesów oczyszczania gazów odlotowych z instalacji spalania stałych surowców energetycznych ukierunkowane jest przede wszystkim na budownictwo lądowe (drogi, nasypy, obwałowania zbiorników, budynki, mosty, mury oporowe, produkcja cementu do betonu), podziemne zakłady górnicze (ciśnieniowa podsadzka hydrauliczna, uszczelnianie górotworu), inżynierię środowiska (warstwy filtracyjne, melioracja, osuszanie gruntów), a nawet przemysł chemiczny (jako surowiec w produkcji kwasu siarkowego i bezwodnego siarczanu wapnia). Z punktu widzenia utylizacji popiołów lotnych znaczącą przeszkodą jest zawartość rozpuszczalnych części stałych, jakimi w tym przypadku są siarczan sodu, siarczan żelaza oraz siarczany innych pierwiastków obecnych w popiołach.

Badania wykonano w ramach projektu rozwojowego NR0500910 pt. "Modyfikowany wodorowęglan sodu w procesach suchego oczyszczania gazów odlotowych z różnego rodzaju instalacji przemysłowych" finansowanego przez Ministerstwo Nauki i Szkolnictwa Wyższego

Literatura

- Cameron W.E., 1977: *Nonstoichiometry in sillimanite: Mullite compositions with sillimanite-type superstructures*. Physics and Chemistry of Minerals, tom 1, nr 3, s. 265-272.
- Kabała J., Brzozowski B., Roszczyński W., Małolepszy J., 2006: *Własności i zastosowanie ubocznych produktów spalania węgla w kotłach fluidalnych*. XIII Międzynarodowa Konferencja „Popioły z energetyki”, Kraków, s. 121-142.
- Łaskawiec K., Gębarowski P., Zapotoczna-Sytek G., Małolepszy J., 2011 (b): *Fly ashes of new generation as a raw material to the problem of autoclaved aerated concrete (AAC)*. „Securing a sustainable future”: 5th international conference on Autoclaved Aerated Concrete, Bydgoszcz, Poland, s. 119-128.
- Łaskawiec K., Małolepszy J., Zapotoczna-Sytek G., 2011 (a): *Wpływ popiołów lotnych powstających przy spalaniu węgla kamiennego i brunatnego w kotłach fluidalnych na skład fazowy AAC*. Materiały Ceramiczne, tom 63, nr 1, s. 88-92.
- Pajdak A., Waławska B., 2016: *Zastosowanie modyfikowanych sorbentów sodowych w oczyszczaniu spalin z SO₂ i HCl z elektrowni i elektrociepłowni w świetle polityki energetycznej Unii Europejskiej*. Polityka Energetyczna – Energy Policy Journal, tom 16, zeszyt 2, s. 135-148.
- Pajdak A., Zarębska K., Waławska B., Szymanek A., 2015: *Oczyszczanie gazów ze spalania paliw stałych z SO₂ sorbentami sodowymi*. Przemysł Chemiczny, 94/3, s. 382-386.
- Patent PL207649, 2011: Mieszanka do wytwarzania betonu komórkowego
- Pflughoeft-Hassett D., Ladwig K., Hassett D.J., Dockter B., Heebink L.V., Eylands K., Hoffarth J., 2009: *Characteristics and performance of fly ash from sodium sorbent scrubbing of SO₃ emissions from coal-based power plants*. World of Coal Ash (WOCA) Conference, Lexington, KY, USA
- Raclavska H., Matysek D., Raclavsky K., Juchelkova D., 2010: *Geochemistry of fly ash from desulphurization process performed by sodium bicarbonate*. Fuel Processing Technology, tom 91, s. 150-157.
- Renedo M. J., Fernández J., 2008: *Influence of Different Lignosulphonates on the Properties of Desulfurant Sorbents Prepared by Hydration of Ca (OH)₂ and Fly Ash*. Industrial and Engineering Chemistry Research, tom 47, nr 4, s. 1331-1335.
- Sarbak Z., Kramer-Wachowiak M., 2012: *Wykorzystanie popiołów lotnych jako adsorbentów metali ciężkich*. Przemysł Chemiczny, tom 91, nr 2, s. 189-192.
- Sellakumar K. M., Conn R., Bland A., 1999: *A comparison study of ACFB and PCFB ash characteristics*. Proceedings of 6th International Conference on Circulating Fluidized Beds, Wurzburg, Germany

Properties of waste fly ash as a hard coal combustion by-product after the application of dry sodium sorbents to purify flue gases

Abstract

This article presents the characteristics of the waste fly ash from hard coal combustion in a fluidised bed combustor. Sodium bicarbonate was used as the sorbent to remove post-process gaseous pollutants in two forms. Baking soda and dried crude bicarbonate. Subsequently the fly ash was subjected to phase composition analysis (RTG), electron microscope analysis of the surface structure and spectrum analysis EDS. Depending on the type of the sorbent used, the fly ash varied in terms of phase composition and structure.

Keywords: fly ash, by-products of combustion, sodium sorbents