

UZDATNIANIE POPIOŁU DO PRODUKTU W PROCESACH SPALANIA WĘGLA W ENERGETYCE

Dr Jack Groppo
Wydział Inżynierii Górniczej
Uniwersytet Kentucky
Lexington, KY

STRESZCZENIE

Przetwarzanie albo uszlachetnianie popiołu rozwinęło się w przeciągu ostatnich dwóch dekad z koncepcji w praktykę gospodarczą wymuszoną działaniami energetyki podejmowanymi w celu sprostania coraz surowszym wymaganiom w zakresie emisji. Podstawową rolą przetwarzania popiołu było utrzymywanie jakości popiołu w celu zachowania istniejących rynków zagospodarowania. Przedstawia się do rozważenia odmienne podejście, w którym zarówno wysoką temperaturę, jak i właściwości chemiczne popiołu w kotle energetycznym można wykorzystać jako środek do wytwarzania użytecznych wyrobów, stosując dodatki w strumieniu produktu ubocznego. Takie podejście oferuje perspektywę stworzenia zeroemisyjnej instalacji, w której pozostałości spalania są wyrobami wytworzonymi celowo do wykorzystania. Porównano piec cementowy oraz kocioł energetyczny, zarówno na pył węglowy (PCC), jak i z cyrkulacyjnym złożem fluidalnym (CFBC), wraz ze składem chemicznym materiału w każdym z układów. Przedstawiono również zarys wyłaniających się technologii, uwzględniających takie podejście.

WPROWADZENIE

Przez ostatnie 20 lat przetwarzanie popiołu z węgla zaczęło być powszechniej praktykowane w celu sprostania wymogom jakościowym przy zagospodarowaniu produktów ubocznych. Większość ze strategii przetwarzania skupia się na obniżeniu zawartości węgla lub poprawie miąższości, co stało się konieczne w miarę przyjmowania przez energetykę technologii pozwalających spełniać bardziej surowe wymagania dotyczące emisji, często skutkujące pogorszoną jakością

popiołu. Rynki masowego zagospodarowania skupiają się głównie wokół zastosowań budowlanych, takich jak pucolanowe zamienniki cementu portlandzkiego w betonie, mogące oferować korzyści w postaci poprawy trwałości i wytrzymałości. Inną praktyką zagospodarowania jest recykling popiołu ze spalania węgla jako składnika surowcowego do wytwarzania cementu portlandzkiego, co jest podejściem bardziej zrównoważonym i zmniejszającym potrzebę wydobywania surowców mineralnych. Praca pieca cementowego i spalanie węgla mają wiele podobieństw, choć ich cele różnią się radykalnie. Piece cementowe wykorzystują wysokie temperatury, powodowane przez spalanie paliwa, do wytwarzania ściśle określonych faz chemicznych złożonych z Si, Al, Ca oraz Fe. Piece energetyczne również wykorzystują wysokie temperatury, powstałe ze spalania paliwa, do wytwarzania pary dla produkcji energii elektrycznej oraz wytwarzają stały produkt uboczny, zawierający różne ilości Si, Al, Ca oraz Fe. Temperatury robocze obu procesów są często podobne, tak samo jak występujące tam główne składniki chemiczne.

Mając na uwadze te podobieństwa, można rozważyć inne podejście do przetwarzania popiołu. Czy, zamiast przetwarzać popiołowy produkt uboczny w celu spełnienia istniejących specyfikacji dotyczących zagospodarowania, jest możliwe wykorzystać dodatki i gorąco panujące w kotłach energetycznych, by wytwarzać bardziej użyteczny wyrób popiołowy? Jeśli można, to takie podejście oferowałoby znaczne ograniczenie zużycia energii, kosztów oraz wytwarzania CO₂, zwiększając wykorzystanie produktu ubocznego. Koncepcja ta ujmuje podwójną rolę pracy kotła energetycznego, jako zarówno generatora energii, jak i zakładu wytwórczego.

EKSPLOATACJA PIECA CEMENTOWEGO

Od czasu jego odkrycia blisko 200 lat temu, cement portlandzki stał się jednym z najwszechstronniejszych materiałów budowlanych na świecie. Techniki wytwarzania wykształciły się w dobrze poznaną wiedzę naukową, która umożliwia dzisiaj nieprzerwane wytwarzanie stałych wyrobów przy pomocy pieców obrotowych. Przy występowaniu znacznej odmienności w budowie i eksploatacji poszczególnych pieców cementowych, proces wytwarzania cementu portlandzkiego składa się zasadniczo z trzech podstawowych etapów: i) przemiału składników surowcowych, ii) podgrzania w celu wytworzenia pożądaných faz chemicznych oraz iii) zmielenia dla wytworzenia skończonego wyrobu.

W pierwszym etapie, dobiera się składniki surowcowe z dostępnych zasobów i miesza ze sobą w pożądanę proporcji, aby uzyskać składniki chemiczne niezbędne dla skończonego wyrobu. Podstawowymi składnikami pierwiastkowymi są Si, Al, Fe oraz Ca, które wszystkie mogą pochodzić z rozmaitych źródeł, jak pokazano w Tabeli 1. W tym przykładzie wykorzystuje się lokalne zasoby gliny jako podstawowego źródła krzemionki, ruda żelaza jest podstawowym źródłem żelaza, zaś źródła wapnia obejmują kamień wapienny, margiel oraz pył bypassowy (CKD), będący drobnoziarnistym produktem ubocznym powstającym w piecu cementowym. Każde z tych źródeł zawiera różne ilości Si, Al, Fe oraz Ca, jeśli

jednak zmiesza się je ze sobą w odpowiednich proporcjach, dają mieszankę nadawy do pieca, spoistą pod względem składu pierwiastkowego (Tabela 2).

Tabela 1. Przykładowy skład chemiczny surowców użytych do przygotowania nadawy do pieca cementowego.¹

Składnik	Kamień wapienny	Margiel	Ruda żelaza	Glina	CKD
SiO ₂	8,43	27,98	8,56	53,75	9,55
Al ₂ O ₃	2,74	10,87	6,79	14,4	2,58
Fe ₂ O ₃	0,94	3,08	68,69	4,99	2,37
CaO	47,62	30,12	5,97	8,71	53,27
MgO	0,97	1,95	0,481	1,8	1,1
SO ₃	0	0,7	0,901	0,31	0,301
K ₂ O	0,39	0,2	0,151	1,99	1,08
Na ₂ O	0,04	0,33	0,177	0,62	0,087
str. prażenia	38,54	24,98	5	13,37	29
Pozostałe	0,42	0,09	3,28	0,06	0,66
Suma	100	100	100	100	100

Tabela 2. Skład chemiczny mieszanek nadawy do pieca cementowego.¹

Składnik	Nadawa do pieca Przypadek 1	Nadawa do pieca Przypadek 2	Nadawa do pieca Przypadek 3
SiO ₂	11,601	11,61	11,616
Al ₂ O ₃	2,522	2,517	2,52
Fe ₂ O ₃	20,53	20,56	2,052
CaO	44,241	44,267	44,268
MgO	1,422	1,413	1,405
SO ₃	0,217	0,222	0,219
K ₂ O	0,784	0,708	0,784
Na ₂ O	0,042	0,088	0,043
str. prażenia	37,279	37,269	37,281
Suma	100,161	100,259	100,294
Zawartość CaCO ₃	79,00	79,048	79,05

Tabela 3 podaje porównanie składu chemicznego nadawy do pieca oraz klinkieru powstałego z podgrzania danej mieszanki w piecu obrotowym. Wyrób klinkierowy został wzbogacony w Ca i Si, przy mniejszych ilościach Al, Fe, Mg, K oraz Na. Chociaż skład chemiczny końcowego wyrobu jest z pewnością ważnym aspektem, to przekształcenia mineralne lub związki powstałe podczas ogrzewania składników surowcowych są dużo bardziej znamienne dla jakości wyrobu. Związki lub fazy oraz ich skład podsumowano w Tabeli 4 wraz z ich uproszczonym zapisem, obejmującym zarówno nazwy różnych faz, jak i ich stenograficzne skróty. Na przykład jednym z powstałych związków jest krzemian trójwapniowy, o składzie $3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ albo Ca_3SiO_5 , który jest nazywany alitem lub C3S. Jakość wyrobu charakteryzuje określenie ilościowo różnych proporcji każdego ze składników.

Podczas eksploatacji pieca cementowego miesza się ze sobą składniki surowcowe w pożądanym proporcjach oraz podgrzewa, co pozwala na zachodzenie następujących po sobie reakcji chemicznych. Na początkowym etapie podgrzewania (70 do 110°C) odparowuje wolna woda. W miarę wzrostu temperatury do 400 do 600°C, minerały glinowe rozkładają się na swoje tlenki składnikowe, głównie SiO_2 oraz Al_2O_3 . Wszelki występujący dolomit ($\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$) rozkłada się na CaCO_3 , MgO oraz CO_2 . W kolejnym etapie ogrzewania (650 do 900°C), CaCO_3 reaguje z SiO_2 , aby utworzyć belit (Ca_2SiO_4), po czym następuje rozkład pozostałego CaCO_3 na CaO oraz CO_2 przy 900 do 1050°C. Na końcowym etapie podgrzewania (1300 do 1450°C) zachodzi częściowe topnienie i belit reaguje z CaO , aby utworzyć alit (Ca_3SiO_5) będący charakterystycznym składnikiem cementu portlandzkiego. To częściowe topnienie powoduje, że materiał zbija się w grudki albo bryłki znane jako klinkier, który następnie chłodzi się i na koniec mieli na drobny proszek. Ważne jest, aby uwzględnić, że typowo potrzeba szczytowej temperatury 1400 do 1450°C dla dokończenia wymaganych reakcji.

Tabela 3. Skład chemiczny mieszanki nadawy do pieca i utworzonego klinkieru.¹

Składnik	Mieszanka nadawy do pieca	Wytworzony klinkier
SiO_2	14,43	22,2228
Al_2O_3	3,9	5,8784
Fe_2O_3	2,27	3,4506
CaO	42,61	65,1272
MgO	1,09	1,6566
SO_3	0,1	0,1527
K_2O	0,9	1,3742
Na_2O	0,09	0,1374
str. prażenia	34,61	---
Suma	100,0	100,0

Tabela 4. Składniki cementu portlandzkiego.²

Składnik	alias	Skład	Skrót stenograficzny
Krzemian trójwapniowy	alit	$3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2 \sim (\text{Ca}_3\text{SiO}_5)$	C3S
Krzemian dwuwapniowy	belit	$2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2 \sim (\text{Ca}_2\text{SiO}_4)$	C2S
Glinian trójwapniowy	-	$3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \sim (\text{Ca}_3\text{Al}_2\text{O}_6)$	C3A
Glińnożelazian czterowapniowy	faza ferrytowa	$4\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_5 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3 \sim \text{Ca}_2(\text{Al}_x, \text{Fe}_{(1-x)})\text{O}_5$ $X > 0$ oraz $< 0,7$	C4AF
Plus 20-30% szkło			

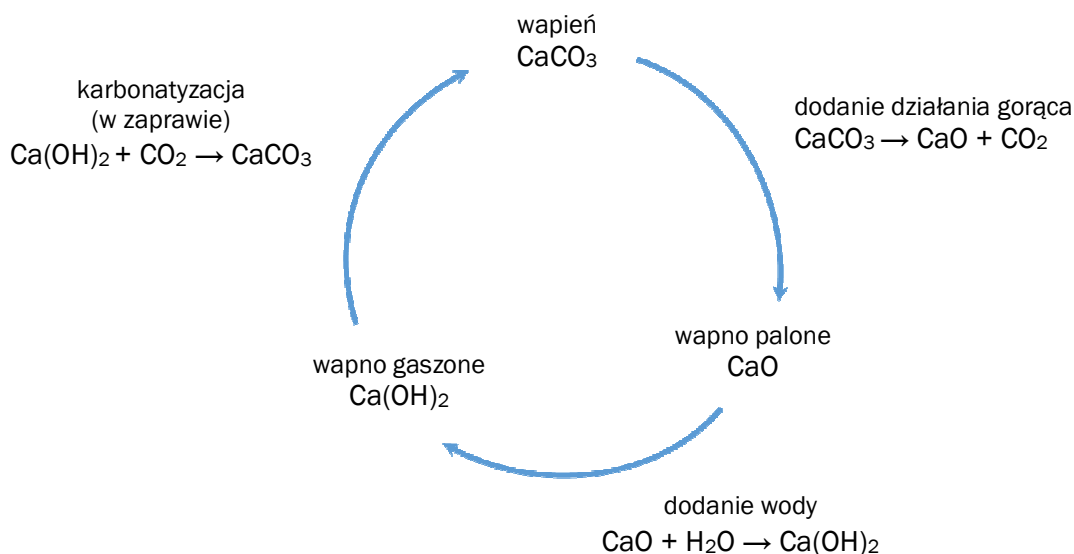
POPIOŁ LOTNY JAKO NADAWA DO PIECA

Jak opisano uprzednio, składniki surowcowe dobiera się w oparciu o szereg czynników, w tym skład, koszt i dostępność. Jako taki, popiół lotny ze spalania węgla używany jest często jako składnik nadawy do pieca, w oparciu o te same kryteria doboru, jak dla pozostałych składników surowcowych. Ilość popiołu z węgla używanego w USA jako nadawa do pieca wzrosła z 3,7mln ton w 2005 r. do 4,7mln ton w 2015 r.³ Popiół lotny klasy F jest źródłem Si i używany jako zamiennik gliny, podczas gdy wysokowapniowy popiół lotny klasy C może być zarówno przydatnym częściowym zamiennikiem dla Ca w kamieniu wapiennym, jak również dostarczać Si. Popiół lotny o wysokiej zawartości żelaza może również dostarczyć część Fe wymaganego w nadawie, zmniejszając tym samym ilość potrzebnej rudy żelaza.

Popiół lotny z węgla powstaje ze spalania węgla, powszechnego paliwa używanego na świecie do wytwarzania elektryczności. Najczęściej stosowaną technologią jest spalanie pyłu węglowego (PCC), w której nadawę węglową mieli się i spala w kotle. Typowe temperatury spalania węgla kamiennego wynoszą 1500 do 1700°C, zaś dla węgla niższego sortu 1300 do 1600°C. Czas przebywania cząsteczki w kotle wynosi najczęściej od 2 do 5 sekund, zaś warto zauważyć, że zakres temperatur jest podobny do tego, jakiego używa się w piecach cementowych. Skład popiołu ze spalania zależy od składu materiału nieorganicznego obecnego w nadawie węglowej. Spalanie węgla kamiennego wytwarza zwykle popiół wzbogacony w Si oraz Al (Klasa F), natomiast spalanie węgla gorszej odmiany zwykle wytwarza popiół wzbogacony w Si oraz Ca (Klasa C).

Inną technologię wytwarzania energii elektrycznej jest spalanie w cyrkulacyjnym złożu fluidalnym (CFBC), gdzie węgiel miesza się ze substratem bogatym w wapń, takim jak wapień, i spala w złożu fluidalnym. W miarę powstawania SO_x podczas spalania reagują one z wapieniem, wytwarzając siarczanowe związki wapnia, zapewniając tym samym korzyść w postaci zmniejszonych emisji SO_x . Skoro złożo fluidalne zawiera dużo wapienia, temperatury spalania w CFBC są

niższe (tj. 850 do 900°C), co daje dodatkową korzyść w postaci ograniczenia termicznego wytwarzania NO_x. Ponieważ proces CFBC jest tak radykalnie inny niż PCC, skład wynikowego popiołu bardzo się różni. Obok materiału nieorganicznego zawartego w nadawie węglowej, popiół CFBC zawiera również produkty rozkładu wapienia. Na przykład wapień rozkłada się termicznie na wapno (CaO) i CO₂, zaś wapno reaguje z SO₂ i tlenem, żeby utworzyć anhydryt (CaSO₄). W zależności od stechiometrii w kotle, w popiele powstają zmienne ilości anhydrytu i innych związków zawierających siarczany. Te reakcje obejmują początkową część cyklu wapiennego (Rys 1), serię reakcji opisujących liczne zastosowania dla wapna.⁴ Cykl wapienny zaczyna się od wapienia, który przy ogrzaniu rozpada się na wapno palone, które ulega hydratacji, aby utworzyć wapno gaszone. Gaszone wapno ulega następnie karbonatyzacji, jak ma to miejsce w przypadku zaprawy, i tworzy wapień. Cykl wapienny jest przydatny dla zrozumienia roli związków wapnia w zastosowaniach wiążących i ma szczególne znaczenie dla sposobu, w jaki produkty uboczne z układów spalania węgla mogą być modyfikowane chemicznie dla wytwarzania użytecznych wyrobów. Na przykład jeśli wapień zostaje użyty jako sorbent siarki w CFBC i zostaje termicznie przekształcony podczas spalania w produkt uboczny w postaci wapna palonego, to może powstać wapno gaszone, jeśli zaistnieją właściwe warunki dla hydratacji. W ten sposób wynikowy popiół będzie zawierać wapno gaszone, co uczyni go bardziej odpowiednim do zastosowań wiążących.



Rysunek 1. Cykl wapienny.⁴

SPALANIE JAKO PROCES WYTWÓRCZY

Spalanie paliw takich jak węgiel ma przede wszystkim na celu wytworzenie ciepła dla generowania energii elektrycznej. Nieuchronnym następstwem tego jest wytwarzanie stałych produktów ubocznych, zasadniczo pochodzących z nieorganicznych składników zawartych w nadawie węglowej, które zostają zmienione

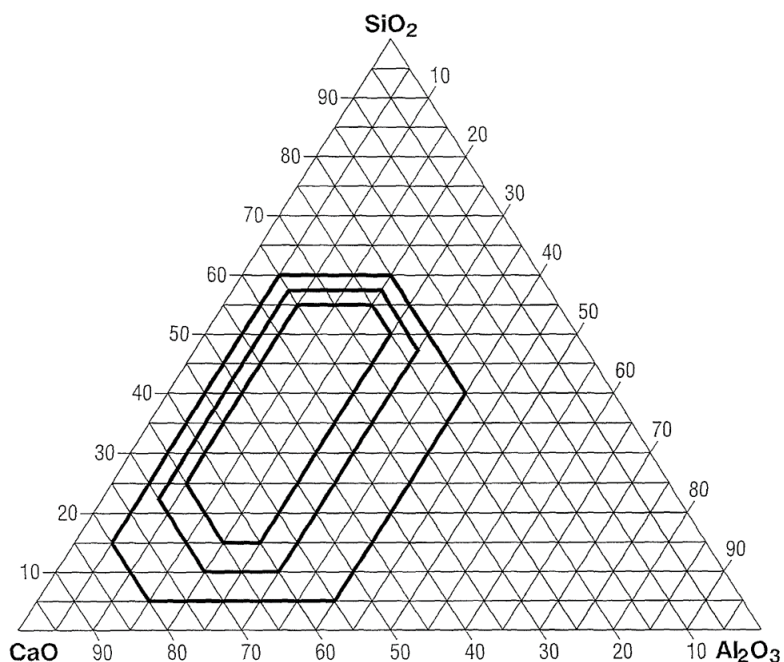
termicznie przez proces spalania. Do teraz, masowe zagospodarowanie tych produktów ubocznych skupiało się zasadniczo na zastosowaniach budowlanych, wykorzystując wiążące lub pucolanowe właściwości tych produktów ubocznych. W miarę zmiany sposobu spalania w celu spełnienia rygorystycznych przepisów środowiskowych, dla spełnienia wymogów jakościowych może być konieczne przetwarzanie produktów ubocznych. Na przykład przejście na palniki niskoemisyjne dla spełnienia wymogów w zakresie emisji NO_x spowodowało wzrost zawartości niespalonego węgla, wymuszając stosowanie technik odwęglania, takich jak odsiewanie⁵, separacja elektrostatyczna⁶ lub rozkład termiczny⁷. Wszystkie te opcje są technologiami przetwarzania po spalaniu stosowanymi do popiołu zebranego po spalaniu.

Alternatywnym podejściem byłoby rozważenie przetwarzania popiołu podczas spalania, podejściem poczynionym z uwzględnieniem podobieństw istniejących pomiędzy pracą pieca cementowego a spalaniem węgla. Podczas gdy oba te procesy mają radykalnie różne cele (tj. produkcja cementu portlandzkiego kontra wytwarzanie energii elektrycznej), to zakresy temperatur roboczych oraz skład pierwiastkowy są podobne. Choć jest sprawą nadrzędną, żeby praktyka spalania węgla nie uległa zmianie w żaden sposób, jaki mógłby kłócić się z wytwarzaniem energii elektrycznej, to potencjał tkwiący w dostarczaniu dodatków lub modyfikowaniu sposobów zbierania popiołu może stanowić sposobność do wytwarzania znacząco korzystnych reakcji chemicznych, które mogłyby przemieniać popiół lotny w produkty rynkowe podczas spalania, zamiast polegać na tradycyjnych procesach przetwarzania ich po spalaniu.

Stosowanie dodatków w kotle energetycznym nie jest nową ideą. Liczne wczesne wysiłki sugerowały stosowanie dodatków przede wszystkim do kontrolowania emisji. Na przykład wykazano, że wtryskiwanie wapna hydratyzowanego (tj. wyprażanego dolomitu) bezpośrednio do kotła poprawia skuteczność usuwania SO_2 .⁸ alternatywnym podejściem jest wtryskiwanie MgO lub $\text{Mg}(\text{OH})_2$ do stref niższych temperatur kotła, dla kontrolowania emisji SO_3 poprzez wytwarzanie MgSO_4 .⁹ Praca ta sugerowała użycie odpadowych związków magnezu, takich jak pokruszone cegły ogniotrwałe z MgO lub żużel z przetwarzania metalicznego magnezu.

Bardziej wszechstronną koncepcję opisała Ash Improvement Technology, Inc. przy pomocy ich technologii CleanCem¹⁰, która opisuje wtryskiwanie dobranych ilości materiałów zawierających CaO , SiO_2 oraz Al_2O_3 do i/lub za komorą spalania. Wykazano, że czyniąc tak, znacząco zwiększa się wytrzymałość na ściskanie betonu, dodając do niego powstałe w wyniku tego produkty spalania. Jak pokazano na Rysunku 2, położone najbardziej na zewnątrz ciemne linie opisują typowe procenty wagowe CaO (20 do 80%), SiO_2 (5 do 60%) oraz Al_2O_3 (5 do 40%). Położone najbardziej do wewnątrz ciemne linie opisują najbardziej preferowane procenty, tj. 25 do 65% CaO , 15 do 55% SiO_2 oraz 10 do 25% Al_2O_3 . Koncepcją jest dodawanie odpowiednich ilości dodatków, przede wszystkim produktów odpadowych z innych procesów, aby uzyskać pożądany skład CaO , SiO_2 oraz Al_2O_3 w zebranych popiele lotnym. Niektóre z dodatków sugerowanych w patencie oraz ich korzystny skład podsumowano w Tabeli 5. Podobnym podejściem byłoby dodawanie odpadowego wapna pokarbidowego lub zmielonego wapna palonego do mieszanki paliwowej, by zapewnić zarówno korzyści w postaci

wychwytu siarki podczas spalania, jak i dostarczyć Ca do popiołu dla modyfikacji właściwości popiołu.¹¹



Rysunek 2. Wykres trójczajny względnego wagowego składu procentowego związków w popiele lotnym.¹⁰

Tabela 5. Dodatki i korzystne składniki do modyfikowania składu popiołu lotnego.¹⁰

	Ca	Si	Al
Pył z kamieniołomu wapienia	•		
Gлина		•	•
Kaolin		•	•
Pokruszone szkło z recyklingu		•	
Pył dymnicowy		•	
Czerwony szlam			•
Spodumen		•	•
Żużel z aluminium			•
Pył z pieca do wypalania wapna	•		

Innym nowatorskim podejściem jest wykorzystanie popiołu CFBC oraz innych produktów ubocznych spalania jako surowców do wytwarzania cementów z siarczanoglinianu wapnia-belitu (CSAB).¹² Jak już opisano, popiół CFBC zawiera zmienne ilości związków siarczanowych bogatych w wapień, wytworzonych poprzez rozkład termiczny wapienia i jednoczesny wychwyty siarki w trakcie spalania. Właściwie zhydratyzowany popiół CFBC tworzy minerały siarczanoglinianowe wapnia, przede wszystkim etryngit ($\text{Ca}_6\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3(\text{OH})_{12}\cdot 26\text{H}_2\text{O}$) W tej pracy autorzy

mieszali różne ilości produktów ubocznych o znanym składzie (Tabela 6), aby uzyskać pożądaną mieszaninę składników surowcowych (Tabela 7), następnie podgrzewali tę mieszaninę do 1250°C dla wytworzenia klinkieru CSAB. Klinkier był następnie mielony wraz z gipsem, ponieważ CaSO_4 jest niezbędny w cemencie CSAB dla przyspieszenia narastania wytrzymałości poprzez formowanie się etryngitu.¹³ Zmieloną mieszaninę poddawano następnie ocenie na kostkach z zaprawy, które wykazywały wyższą wczesną wytrzymałość niż cement portlandzki, wraz z dodatkowym długoterminowym wzrostem wytrzymałości. To podejście oferuje szereg zalet w porównaniu z cementem portlandzkim, zwłaszcza o wiele niższą temperaturę tworzenia klinkieru. Dodatkowo, klinkier CSAB jest miękki i o wiele łatwiej daje się mielić. Najważniejszą wadą było zapotrzebowanie na boksyt jako źródło Al, co jest obszarem dodatkowych zogniskowanych badań.

Tabela 6. Skład chemiczny surowców do przygotowania mieszanin nadawy CSAB.¹²

Składnik	CFBC Zużyty materiał złożowy	CFBC Popiół lotny	Klasa F Popiół lotny	Klasa C Popiół lotny	Kamień wapienny	Boksyt	Gips z odsiarczania spalin
SiO ₂	12,77	25,62	57,44	41,65	7,41	10,61	4,54
Al ₂ O ₃	5,25	10,34	29,97	22,28	2,76	78,75	1,09
Fe ₂ O ₃	3,15	9,08	4,94	5,97	0,77	5,25	0,06
CaO	48,23	33,74	1,09	19,32	81,62	0,28	40,15
MgO	2,47	4,09	0,79	4,43	3,31	0,18	0,37
Na ₂ O	0,05	0,13	0,15	1,09	0,04	0,01	0,01
K ₂ O	0,36	1,24	2,73	1,24	0,61	0,03	0,06

Tabela 7. Skład mieszanin nadawy CSAB.¹²

	Składnik	CSAB #1	CSAB #2
Klinkier	Wapień	39,0	46,0
	Boksyt	13,1	15,2
	Zużyty materiał złożowy CFBC	27,7	13,1
	Popiół lotny klasy F	---	12,9
	Popiół lotny klasy C	6,9	---
Dodatek technologiczny	Gips	13,3	12,8

LITERATURA

1. Aldieb, M.A., and Ibrahim, H.G. 2010, "Variation of feed chemical composition and its effect on clinker formation-simulation process", Proceedings of the World Congress on Engineering and Computer Science 2010, Vol. 2, WCECS 2010, October 20-22, 2010. Znaleziona na: http://www.iaeng.org/publication/WCECS2010/WCECS2010_pp699-705.pdf, [Dostęp 10 sierpnia 2017 r.].
2. Hewlett, P.C., 1998 "Lea's Chemistry of Cement and Concrete", 4th Ed, Arnold Publishers, London.
3. American Coal Ash Association, "2015 and 2005 Coal Combustion Product (CCP) Production and Use Survey Reports", znaleziona na: <https://www.acaa-usa.org/Publications/Production-Use-Reports> [Dostęp 10 sierpnia 2017 r.].
4. Van Balen, K., 2003, "Understanding the lime cycle and its influence on historical construction practice", Proceedings of the First International Conference on Construction History, Madrid, Jan 20-24, 14 p.
5. Boux, J. F and Pennachetti, J.T., 1970, "Process for the treatment of fly ash and product, US Patent 3,533,819, October 13.
6. Bittner, J.D., Gasiorowski, S.A. and Lewandowski, W., 2011, "Polish chemical plant utilizes Separation Technologies' carbon removal process", Proceedings World of Coal Ash (WOCA) Conference, Denver, CO, May 9-12.
7. Knowles, J., 2009, "New commercial beneficiation process Staged Turbulent Air Reactor (STAR)", Proceedings 2009 World of Coal Ash (WOCA) Conference, Lexington, KY, May 4-7.
8. Abrams, J.Z. and Sherwin, R. M., 1982, "SO₂ Removal", US Patent 4,388,283, Feb. 18.
9. Radway; J. E., 2002, "Combustion emissions control and utilization of byproducts", US Patent 6,997,119, July 23.
10. Fried, W., 2014, "Production of cement additives from combustion products of hydrocarbon fuels and strength enhancing metal oxides", US Patent 8,741,054, June 3.
11. Szczygielski, T., 2017, "Towards zero waste coal power as element of circular economy", Asia Ash, Beijing, China, July 21-24.
12. Jewell, R.G., Rathbone, R.F., Duvallet, T.Y., Robl, T.L and Mahboub, K.C., 2015, "Fabrication and testing of low-energy calcium sulfoaluminate-belite cements that utilize circulating fluidized bed combustion by products", Coal Combustion and Gasification Products Journal, Vol. 7, 18 p.
13. Glasser, F.P., Zhang, L., 2001, High-performance cement matrices based on calcium sulfoaluminate-belite composition, Cement and Concrete Research 31(12), 1881-1886.

A COMBUSTION PERSPECTIVE FOR PROCESSING COAL ASH INTO PRODUCTS

ABSTRACT

Coal ash processing or beneficiation has evolved from a concept to commercial practice over the past two decades, necessitated by changing utility practice in order to meet increasingly stringent emission requirements. The principle role of ash processing has been to maintain ash quality in order to preserve existing utilization markets. An alternative approach is offered for consideration, where both the heat and ash chemistry in utility boilers can be utilized as a means to produce usable products with the use of additives in the byproduct stream. Such an approach offers the potential of creating a zero discharge plant where combustion residuals are manufactured products, tailored for utilization. Cement kiln and both pulverized coal combustion (PCC) and circulating fluidized bed combustion (CFBC) utility boiler operating conditions are compared, along with the chemical composition of material in each system. An overview of two emerging technologies incorporating this approach is also provided.
