

KATARZYNA ŁASKAWIEC\*  
AGNIESZKA MICHALIK\*\*  
GENOWEFA ZAPOTOCZNA-SYTEK\*\*\*

# **Badania nad zastosowaniem popiołów lotnych ze współspalania biomasy drzewnej i węgla kamiennego do wytwarzania betonu komórkowego\*\*\*\***

W artykule przedstawiono wyniki badań właściwości fizykochemicznych popiołów oraz ich skład fazowy. Omówiono wpływ biomasy na prace kotłów na podstawie monitorowania warunków przygotowania paliwa i procesu spalania. Zaprezentowano możliwość utylizacji popiołów ze współspalania biomasy z węglem w produkcji autoklawizowanego betonu komórkowego (ABK) na podstawie prób technologicznych w halach doświadczalnych CEBET-u oraz uzyskane właściwości betonu komórkowego.

## **1. Wstęp**

Racjonalne wykorzystanie energii ze źródeł odnawialnych, a zwłaszcza energii z biomasy, jest jednym z istotnych elementów zrównoważonego i trwałego rozwoju [1–2]. Zaletami stosowania biomas są: ograniczenie emisji gazów CO<sub>2</sub>, wykorzystanie lokalnych zasobów energetycznych, decentralizacja wytwarzania energii, zróżnicowanie źródeł energii, ograniczenie szkód w środowisku związanym z wydobyciem paliw kopalnych, zagospodarowanie odpadów. Ponadto, wykorzystanie biomasy wspiera rozwój społeczno-gospodarczy poprzez tworzenie nowych miejsc pracy.

---

\* Dr inż., Instytut Ceramiki i Materiałów Budowlanych w Warszawie, Centrum Badań Betonów CEBET w Warszawie.

\*\* Mgr inż., Instytut Ceramiki i Materiałów Budowlanych w Warszawie, Centrum Badań Betonów CEBET w Warszawie.

\*\*\* Prof. ICiMB dr inż., Instytut Ceramiki i Materiałów Budowlanych w Warszawie, Centrum Badań Betonów CEBET w Warszawie.

\*\*\*\* Praca finansowana ze środków Ministerstwa Nauki i Szkolnictwa Wyższego jako projekt badawczy nr N506 066 31/3156.

Podjęte w Polsce prace pozwalają, z wyprzedzeniem szerokiego wdrożenia współspalania biomasy, na określenie jakiego rodzaju zmiany jakościowe zajdą w popiołach oraz ustalenie technologii zastosowania popiołów o zmienionych parametrach w przemyśle materiałów budowlanych, głównie betonów komórkowych, gdzie popiół stanowi ok. 70% składników receptury, a zakłady betonów komórkowych zwykle połączone są z elektrowniami bezpośrednimi liniami transportu pneumatycznego [3]. Tym bardziej więc istotne będzie ustalenie wpływu właściwości popiołów powstałych po wprowadzeniu współspalania biomasy z węglem na proces technologiczny i właściwości użytkowe wyrobów z betonu komórkowego.

Dotychczasowe technologie wykorzystania popiołów lotnych w przemyśle materiałów budowlanych, w tym i betonów komórkowych, były opracowane w zasadzie dla popiołów powstających przy spalaniu w kotłach pyłowych samego węgla kamiennego lub brunatnego [3–6]. Z danych literaturowych wynika, że zastosowanie biomasy przy spalaniu węgla skutkuje zmianami powstających popiołów lotnych [7–13]. Niektóre źródła wskazują na zmiany w składzie chemicznym, co skutkuje zmniejszeniem ich aktywności pucolanowej, oraz na zwiększenie zawartości  $P_2O_5$ , co z kolei skutkuje zakłóceniem procesu hydratacji materiału wiążącego.

Podstawowym biopaliwem stałym, które obecnie jest stosowane w procesie współspalania, są odpady przemysłu drzewnego (trociny), a także drewno pozyskiwane przez Lasy Państwowe w trzebieżach i w ramach cięć sanitarnych, które są niezbędne dla utrzymania odpowiedniego stanu zdrowotnego lasu. W najbliższych latach spodziewany jest wzrost udziału biomasy pochodzenia rolniczego, między innymi z upraw roślin energetycznych oraz odpadów, takich jak słoma, ale również susz malinowy, susz z czerwonych porzeczek, suszone pestki wiśni, łuski słonecznika i wiele innych.

Konieczność określenia warunków, jakie powinny spełniać popioły lotne do produkcji betonów, powstające w procesach współspalania, przyniosła nowelizacja przez Komitet Techniczny 104 CEN normy EN 450:1998 [14] i zastąpienie jej normą EN 450-1+A1:2009 [15], uzupełnioną normą EN 450-2:2006 [16]. Norma EN 450-1+A1:2009 [15] wyszczególnia rodzaje materiałów współspalanych z węglem, ograniczając ich ilość do 20%. Podaje również, że przy utylizacji popiołów do mieszanek betonowych, zapraw, zaczynów, ilość popiołów pochodzących z materiałów współspalanych może stanowić do 10%.

Nie ma ustalonych wymagań dla popiołów, powstających w procesach współspalania, do wytwarzania ABK. Są natomiast ustalone wymagania dla popiołów z tradycyjnych metod spalania węgla [17–18]. W związku z tym i dla uzyskania wyników własnych w COBRPB CEBET\*, Ośrodku zajmującym się od lat zagad-

---

\* Od 1 stycznia 2011 r. w strukturze organizacyjnej ICI MB jako Centrum Badań Betonów CEBET.

nieniami utylizacji odpadów do wytwarzania materiałów budowlanych, podjęto badania nad przydatnością popiołów powstających ze współspalania biomasy z węglem do produkcji betonu komórkowego.

## 2. Badania właściwości popiołów lotnych

Badania prowadzono w dwóch wytypowanych elektrowniach A i B, które dysponują kotłami pyłowymi o mocy 220 MW. W elektrowni A jako biomasę spalano trociny, a w B zrębki. Analizowano wpływ biomasy (różne ilości) na pracę kotłów na podstawie monitorowania warunków przygotowania paliwa i procesu spalania, dla wykorzystania w przyszłości tych danych do wspólnych działań z elektrowniami w zakresie otrzymywania popiołów nadających się do utylizacji w przemyśle materiałów budowlanych. Badania te prowadzono przy współpracy z Instytutem Energetyki.

W tabeli 1 podano charakterystykę węgla i biomasy, ze spalania których powstały badane popioły, a w tabeli 2 jakość przemiału węgla i mieszanin węgla z biomasą (pozostałość na sitach) w elektrowniach A i B.

Tabela 1

Charakterystyka węgla i biomasy

Lp.	Parametr	Jednostka	Paliwo węglowe	Biomasa	
				zrębki	trociny
1	wartość opałowa	MJ/kg	elektrownia A 21,00–23,00	–	9,20–11,30
			elektrownia B 19,50–22,00	8,50–10,20	–
2	zawartość wilgoci	%	9,00–12,00	49,00–60,10	38,10–40,50
3	zawartość popiołu	%	17,00–25,00	1,80–2,00	1,90–2,10
4	zawartość siarki	%	0,60–1,00	0,09–0,11	0,11–0,12
5	zawartość węgla	%	78–81*	26,93	38,15–39,08

\* Wg danych literaturowych.

Źródło: Opracowanie własne.

Tabela 2

Jakość przemiału węgla i mieszaniny węgla z biomasą (pozostałość na sitach) w elektrowniach A i B

Lp.	Wymiar oczka sita [mm]	Wyniki badań (wartości średnie)				
		elektrownia A			elektrownia B	
		zawartość biomasy w paliwie [%]				
		0	8,7	12	0	20
pozostałość na sicie [% mas.]						
1	R <sub>200</sub>	0,62	1,40	3,33	0,61	9,31
2	R <sub>90</sub>	21,83	23,51	36,31	27,08	52,69

Źródło: Jak w tab. 1.

Badania (tab. 1) wykazały, że stosowana biomasa (zrębki, trociny) zawiera większą ilość wilgoci niż paliwo węglowe, ma zdecydowanie mniejszą ilość popiołu i niewielką zawartość siarki. Niska wartość opałowa biomasy w powiązaniu z wysoką wilgotnością powoduje, że dla uzyskania tej samej ilości ciepła trzeba jej zużyć 2–2,5 razy więcej niż węgla.

W przeprowadzonych badaniach stwierdzono, że dodawanie do paliwa węglowego biomasy w postaci trocin i zrębków ma wpływ na warunki pracy instalacji młynowej i jakość uzyskiwanego przemiału mieszanin paliwa węglowego i biomasy. Występuje ograniczenie wydajności młynów wynikające z dużej objętości biomasy i zdolności suszącej instalacji młynowej.

Ze względów produkcyjnych (ograniczenia młynów) w okresie poboru prób popiołów do badań w elektrowniach maksymalny udział biomasy wynosił: w elektrowni A – 12%, a w elektrowni B – 20%. W czasie poboru prób popiołów do badań stwierdzono, że w każdym z badanych przypadków jakość przemiału mieszaniny węgla i biomasy w porównaniu z jakością przemiału węgla uległa pogorszeniu (tab. 2). Stwierdzono znaczące różnice pomiędzy jakością przemiału mieszaniny węgla i biomasy w obu elektrowniach, gorszy przemiał był w elektrowni B aniżeli w elektrowni A.

Dla pobranych prób popiołów lotnych, powstałych ze współspalania biomasy z węglem i ze spalania samego węgla, określono:

- skład chemiczny, właściwości fizyczne, właściwości pucolanowe,
- badania składu fazowego metodą dyfrakcji rentgenowskiej XRD, w tym mikrostruktura i morfologia ziarn (mikroskop skaningowy SEM/EDS).

Po przebadaniu właściwości popiołów przeprowadzono w halach doświadczalnych COBRPB CEBET próby wytwarzania autoklawizowanego betonu komórkowego z zastosowaniem popiołów powstających ze współspalania węgla i biomasy. Jako beton kontrolny wykonano beton z zastosowaniem popiołów ze spalania samego węgla. Dla gotowego betonu komórkowego po procesie autoklawizacji określano właściwości zgodnie z normami PN-EN: gęstość według PN-EN 772-13; wytrzymałość na ścislenie według PN-EN 771-1.

## 2.1. Skład chemiczny i właściwości fizyczne

W tabeli 3 zestawiono wyniki badań składu chemicznego i właściwości fizycznych popiołów otrzymanych ze współspalania różnych ilości biomasy z węglem oraz popiołów ze spalania samego węgla kamiennego.

T a b e l a 3

Wyniki badań składu chemicznego i właściwości fizycznych popiołów lotnych

Lp.	Właściwości	Wyniki badań					
		elektrownia A			elektrownia B		
		zawartość biomasy w paliwie [%]					
		0	12	$\pm d^*$ dla $\alpha = 0,05$	0	20	$\pm d^*$ dla $\alpha = 0,05$
1	straty prażenia [%]	4,20	4,35	0,15	5,40	4,50	0,89
2	SiO <sub>2</sub> [%]	48,55	48,58	0,39	49,72	48,13	1,32
3	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> [%]	25,60	25,98	0,15	27,15	25,42	0,47
4	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> [%]	6,59	6,96	0,17	6,17	6,86	0,08
5	SO <sub>3</sub> [%]	0,36	0,52	0,04	0,40	0,46	0,09
6	CaO [%]	4,58	4,50	0,07	2,92	4,60	0,54
7	CaO wolne [%]	0,10	0,35	0,04	0,16	0,43	0,03
8	MgO [%]	3,46	3,32	0,04	2,13	26,34	0,39
9	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> [mg/kg]	–	19,50	3,93	–	22,00	5,24
10	gęstość [g/cm <sup>3</sup> ]	2,12	2,12	0,01	1,93	1,94	0,04
11	rozdrobienie (przeпад przez sito#0,063) [%]	95,80	95,20	0,19	75,30	68,80	5,13
12	wodozadność [%]	26,70	31,30	–	31,90	27,60	1,01
13	wskaźnik aktywności pucolanowej po 28 dniach	95,60	92,40	–	82,02	73,44	–
Stężenie naturalnych pierwiastków promieniotwórczych							
14	f <sub>1</sub>	1,20	1,12	–	1,24	1,07	–
15	f <sub>2</sub> [Bq/kg]	134,03	123,36	–	139,70	112,40	–

\* Szerokość przedziału ufności (d) wyliczona dla 9 próbek.

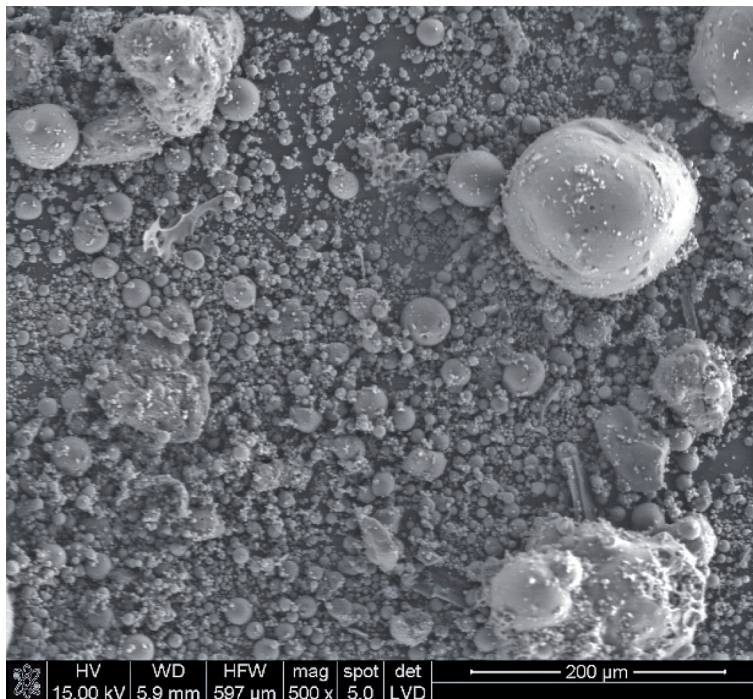
Ź r ó d ł o: Jak w tab. 1.

Badania wykazały, że w składzie chemicznym popiołów ze współspalania węgla i biomasy w stosunku do popiołów ze spalania samego węgla występują pewne różnice, nie są one jednak znaczące. Popioły ze współspalania węgla i biomasy

zawierają przeważnie więcej CaO, a w każdym przypadku więcej wolnego CaO. Popioły ze współspalania węgla i biomasy zawierają  $P_2O_5$ , który w zasadzie nie występuje w popiołach ze spalania samego węgla. Popioły ze współspalania z biomasą charakteryzują się mniejszym stężeniem naturalnych pierwiastków promieniotwórczych. Większe różnice w składzie fizykochemicznym popiołów występują przy stosowaniu biomasy w postaci zrębków aniżeli trocin. Mniejsze rozdrobnienie oraz mniejsza zawartość  $SiO_2$  i  $Al_2O_3$  w popiołach ze współspalania wpływa na pewne zmniejszenie ich aktywności pucolanowej.

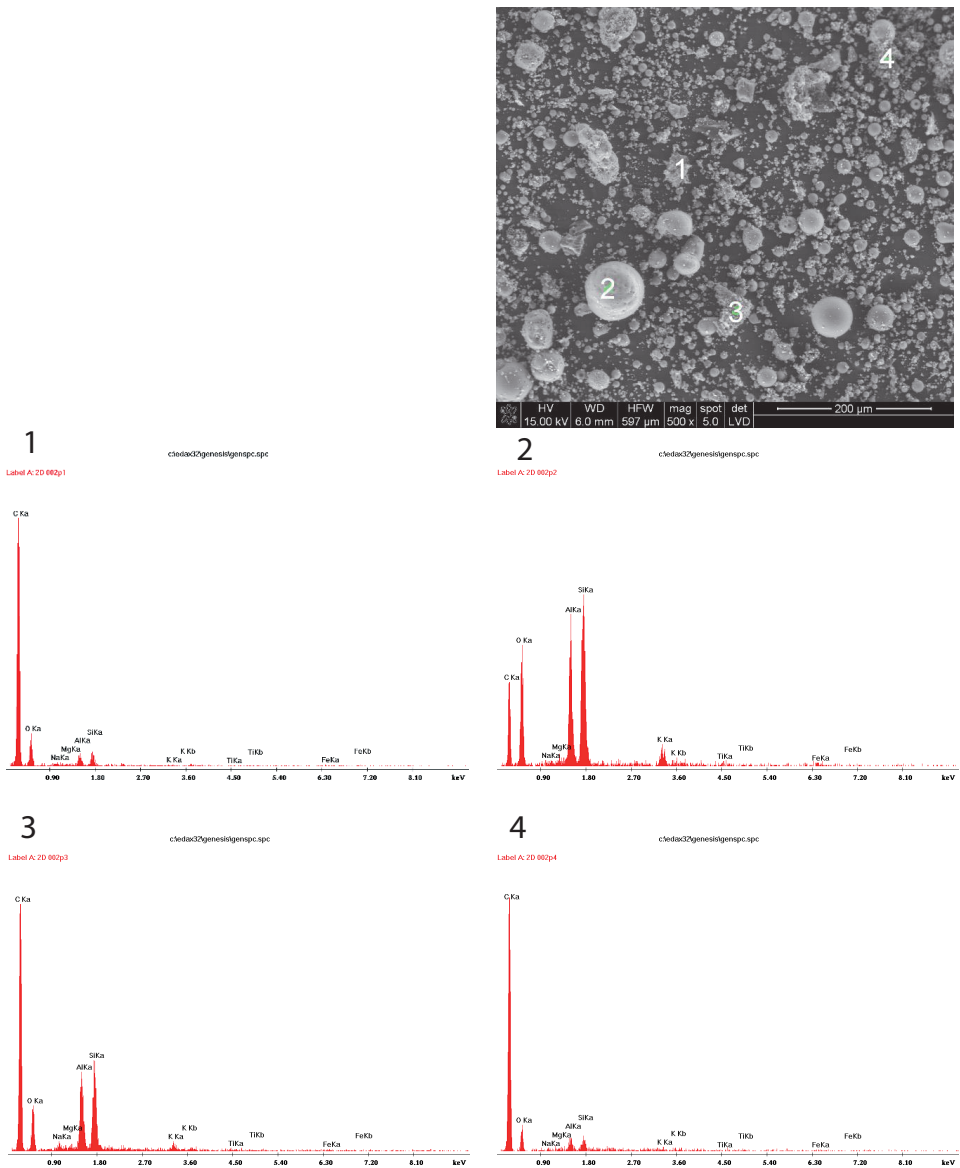
## 2.2. Skład fazowy, mikrostruktura i morfologia

Obrazy morfologii próbek popiołów ze współspalania węgla kamiennego i biomasy oraz popiołów ze spalania węgla kamiennego przedstawione są na rycinach 1–2. Wszystkie zdjęcia zostały wykonane za pomocą techniki SEM/EDS. Badania próbek przeprowadzone były przy ciśnieniu 60 Pa.



Źródło: Opracowanie własne.

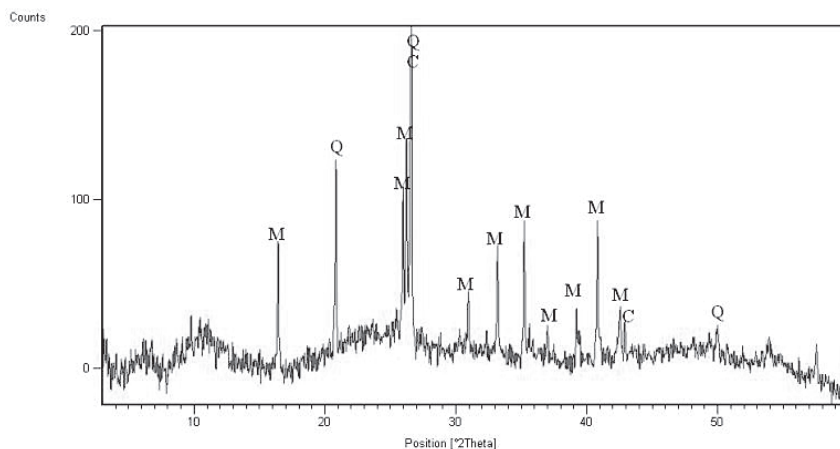
Ryc. 1. Mikrostruktura popiołów lotnych ze spalania samego węgla. Widoczne są w obrazie mikroskopowym dobrze wykształcone kuliste ziarna popiołu lotnego różnej wielkości (powiększenie 500 x)



Źródło: Jak w ryc. 1.

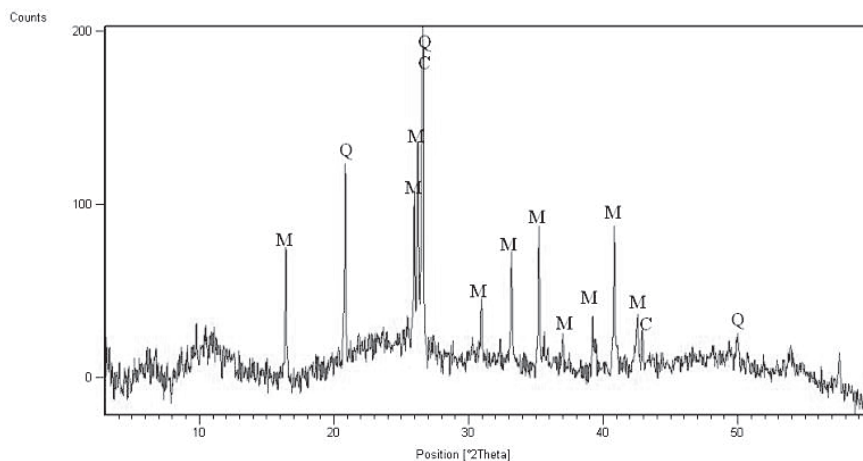
Ryc. 2. Widnieją dobrze wykształcone kuliste ziarna popiołu lotnego różnej wielkości, charakterystyczne dla mikrostruktury popiołów lotnych oraz niewielkie fragmenty ziaren nieforemnych, będące prawdopodobnie pozostałością po spalonej biomase (powiększenie 500 x). Przeprowadzona w wybranych punktach próbki analiza EDS wskazuje na charakterystyczny dla popiołów lotnych skład chemiczny form kulistych (2/2) oraz wzbogacenie w węgiel ziaren nieforemnych (2/1; 2/3; 2/4)

W oznaczeniu składu fazowego wykorzystano do pomiaru promieniowanie  $\text{CuK}_{\alpha}$ , przy parametrach lampy rentgenowskiej 45 kV/40 mA. Impulsy zliczano trybem krokowym z krokiem  $0,02^{\circ}$ , w zakresie kątów ugięcia  $5-60^{\circ}$  ( $2\theta \text{ CuK}_{\alpha}$ ). Próbki poddawane były analizie w postaci proszkowej o wymaganym rozdrobnieniu ( $1-3 \mu\text{m}$ ). Do interpretacji uzyskanych wyników wykorzystano bazę danych JCPDS-ICDD (*Joint Committee on Powder Diffraction Standards – International Center for Diffraction Data*) oraz tablice mineralogiczne.



Źródło: Jak w ryc. 1.

Ryc. 3. Rentgenogram próbki popiołu ze spalania węgla kamiennego:  
M – mullit, Q – kwarc, C – węgiel



Źródło: Jak w ryc. 1.

Ryc. 4. Rentgenogram próbki popiołu ze współspalania węgla i biomasy:  
M – mullit, Q – kwarc, C – węgiel



Na podstawie przeprowadzonej analizy rentgenograficznej próbek popiołów pochodzących zarówno ze spalania węgla kamiennego, jak i popiołów ze współspalania węgla kamiennego i biomasy zidentyfikowano w badanym materiale występowanie głównych refleksów charakterystycznych dla kwarcu (26,64; 20,86; 50,14) oraz mullitu (16,43; 26,26; 35,27; 40,86). W analizowanych popiołach największą intensywność posiadały refleksy pochodzące od kwarcu oraz mullitu. Jednocześnie podniesione tła rentgenogramów świadczą o obecności w badanych popiołach znacznych ilości materiału amorficznego.

Z badań tych wynika, że skład fazowy popiołów ze spalania węgla kamiennego, jak i popiołów ze współspalania węgla kamiennego i biomasy jest do siebie zbliżony. Dominującymi składnikami w obydwu rodzajach popiołów jest kwarc, mullit oraz faza szklista o charakterze glino-krzemianowym. Mikrostruktura badanych popiołów ze spalania węgla kamiennego, jak i popiołów ze współspalania węgla kamiennego i biomasy nie wykazuje bardzo wyraźnych różnic w ukształtowaniu dominujących ziaren. Mikrostruktura popiołów ze współspalania węgla kamiennego i biomasy jest nieznacznie wzbogacona w ziarna nieforemne w stosunku do popiołów ze spalania samego węgla kamiennego.

### 3. Próby wytwarzania ABK

W halach doświadczalnych COBRPB „CEBET” wykonano próbne odlewy w skali laboratoryjnej oraz w skali półtechnicznej. Zaprojektowano beton komórkowy klasy gęstości 500 o następującym składzie:

- spoiwo – wapno palone mielone (przemielone z częścią popiołów lotnych i gipsem),
- kruszywo – popiół lotny ze współspalania węgla kamiennego z biomasą (w odlewach kontrolnych – popiół ze spalania samego węgla),
- regulator wiązania – gips,
- środek porotwórczy – proszek Al,
- środek powierzchniowo czynny – Sulfapol,
- woda.

Próby technologiczne w skali laboratoryjnej prowadzono wykonując bloczki o wymiarach 24 x 24 x 49 cm (ryc. 5), a następnie na wybranych recepturach w skali półtechnicznej w formach o wymiarach 147 x 72 x 60 cm (ryc. 6). Podczas prowadzenia prób monitorowano procesy wyrastania i wiązania masy (tab. 4). Nie stwierdzono znaczących różnic pomiędzy zachowaniem się odlewów wykonanych z zastosowaniem popiołów lotnych ze spalania samego węgla i z zastosowaniem popiołów ze współspalania węgla i biomasy.



Ź r ó d ł o: Jak w ryc. 1.

Ryc. 5. Widok odlewów – skala laboratoryjna



Ź r ó d ł o: Jak w ryc. 1.

Ryc. 6. Widok odlewu – skala półtechniczna

## 4. Badanie betonu komórkowego

Po zakończeniu procesu autoklawizacji nastąpiło rozformowanie i wstępna wizualna ocena struktury makroskopowej betonu komórkowego. Oględziny wyrobów wykazały, że struktura makroporowatości jest prawidłowa. W dalszej kolejności beton komórkowy poddano określonym badaniom: gęstości według PN-EN 772-13 oraz wytrzymałości na ściskanie według PN-EN 771-1. Ponadto, przeprowadzono badanie składu fazowego (SEM/EDS oraz analiza rentgenograficzna XRD) betonów komórkowych.

### 4.1. Właściwości fizykomechaniczne

W tabeli 4 zestawiono wyniki badań gęstości i wytrzymałości na ściskanie autoklawizowanych betonów komórkowych, wytworzonych przy użyciu popiołów ze spalania samego węgla oraz popiołów otrzymanych ze współspalania węgla z biomasą.

T a b e l a 4

## Właściwości betonu komórkowego

Elektrownia	Udział biomasy [%]	Właściwości betonu komórkowego			
		gęstość w stanie suchym [kg/m <sup>3</sup> ]	gęstość średnia [kg/m <sup>3</sup> ]	wytrzymałość na ściskanie [MPa]	wytrzymałość średnia [MPa]
A	12	505	510	4,2	4,3
	12	485		3,6	
	12	540		5,1	
	8,7	535	530	5,1	4,9
	8,7	550		5,4	
	8,7	510		4,2	
	0	535	540	5,1	5,4
	0	540		5,4	
	0	545		5,5	
B	20	490	505	3,6	3,4
	20	515		3,4	
	20	510		3,2	
	0	520	530	4,1	3,9
	0	535		3,7	
	0	535		3,9	

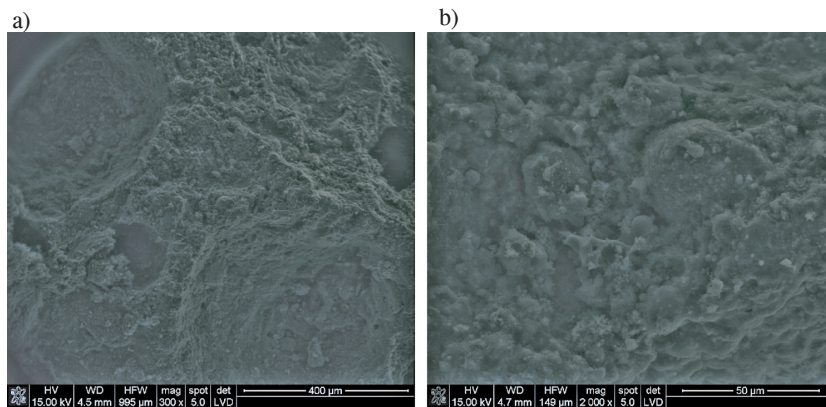
Ź r ó d ł o: Jak w tab. 1.

Dane zestawione w tabeli 4 świadczą o tym, że gęstości zarówno betonów wykonanych z zastosowaniem popiołów ze współspalania węgla z biomasą, jak i betonów kontrolnych, w których użyto popioły uzyskane ze spalania samego węgla, zawierały się w założonej recepturą gęstości i wytrzymałości, z wyjątkiem betonu komórkowego z zastosowaniem popiołów ze współspalania węgla i biomasy w ilości 20%, który posiadał zaniżoną wytrzymałość.

## 4.2. Skład fazowy

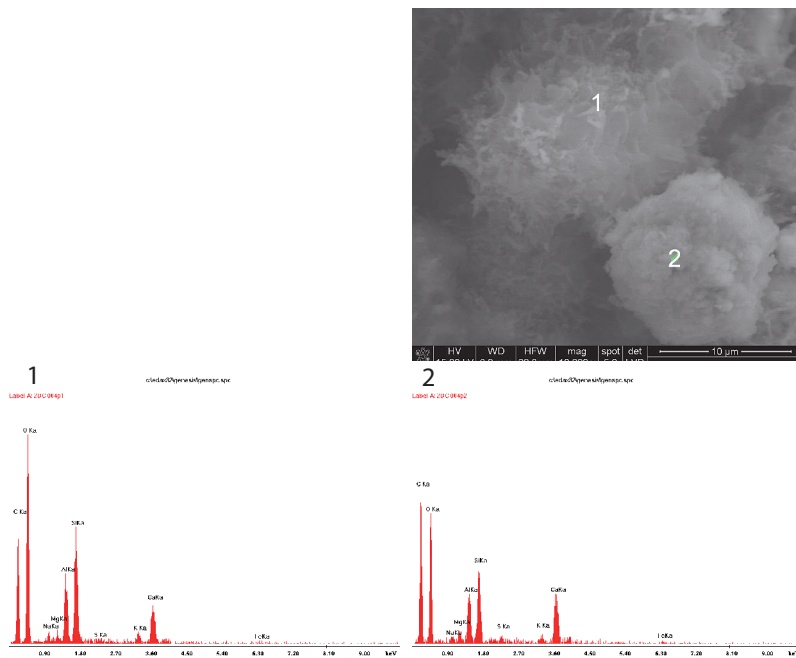
### Obserwacje mikroskopowe SEM/EDS

Dokonano obserwacji mikroskopowych próbek ABK z popiołem krzemionkowym oraz z popiołem ze współspalania węgla i biomasy.



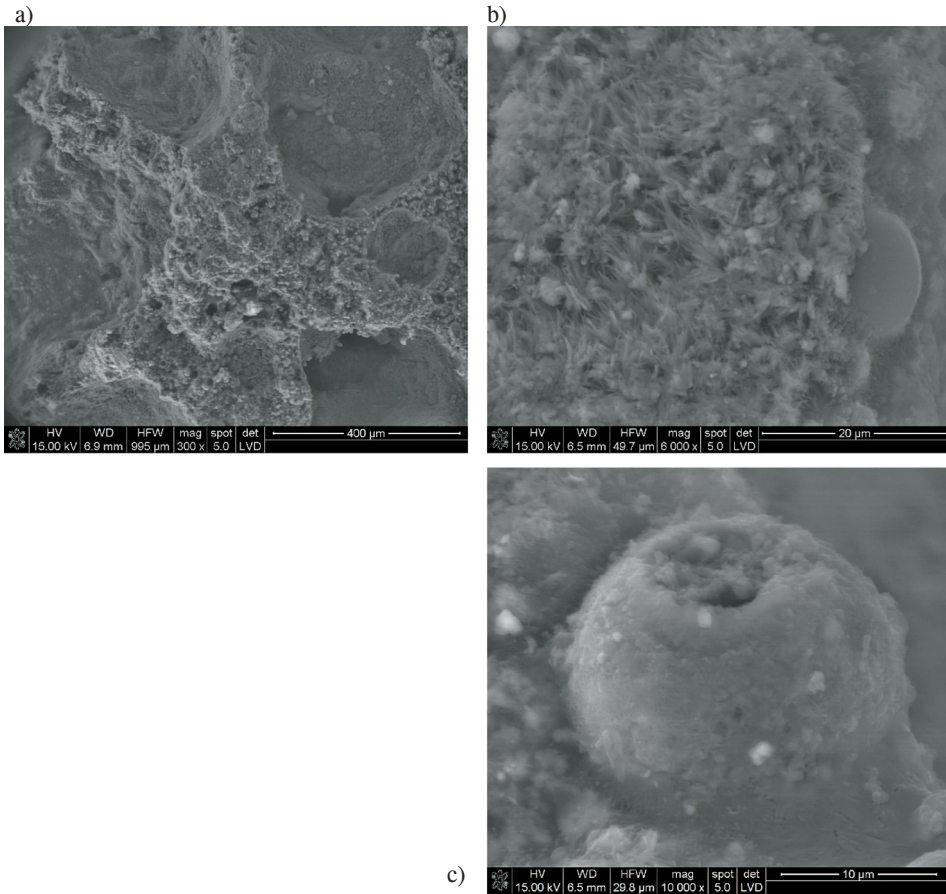
Źródło: Jak w ryc. 1.

Ryc. 7. Obraz mikroskopowy SEM próbki ABK z popiołem krzemionkowym. Fotografia przedstawia typowy obraz mikrostruktury całej analizowanej powierzchni przelamu próbki betonu (7 a). W obserwowanym obszarze wyraźnie widoczne są prawidłowo wykształcone pustki powietrzne w zwartej masie matrycy ABK. Na powiększeniu widoczne są częściowo przereagowane ziarna popiołów w matrycy C-S-H (7 b – powiększenie 2000 x)



Źródło: Jak w ryc. 1.

Ryc. 8 . Obraz mikroskopowy SEM próbki ABK z popiołem ze współspalania węgla i biomasy. Widoczne obszary zajmowane przez C-S-H oraz zarys przereagowanych ziaren popiołów. C-S-H wzbogacone w glin (powiększenie 10 000 x)



Źródło: Jak w ryc. 1.

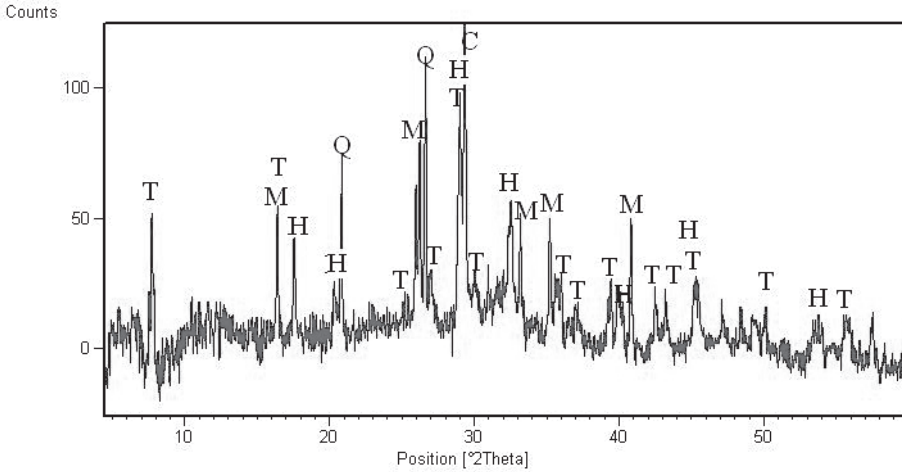
Ryc. 9. Obraz mikroskopowy SEM próbki ABK z popiołem ze współspalania węgla i biomasy.

Obraz mikrostruktury jest typowy dla mikrostruktury obserwowanego fragmentu próbki.

W obserwowanym obszarze widoczne są pustki powietrzne w masie matrycy ABK (ryc. 9 a – powiększenie 300 x). Obszary pustek zajmowane przez C-S-H przypominającej morfologicznie tobermoryt (ryc. 9 b – powiększenie 6000 x). Pojedyncze ziarna popiołu wyraźnie przekształcone (ryc. 9 c – powiększenie 10 000 x)

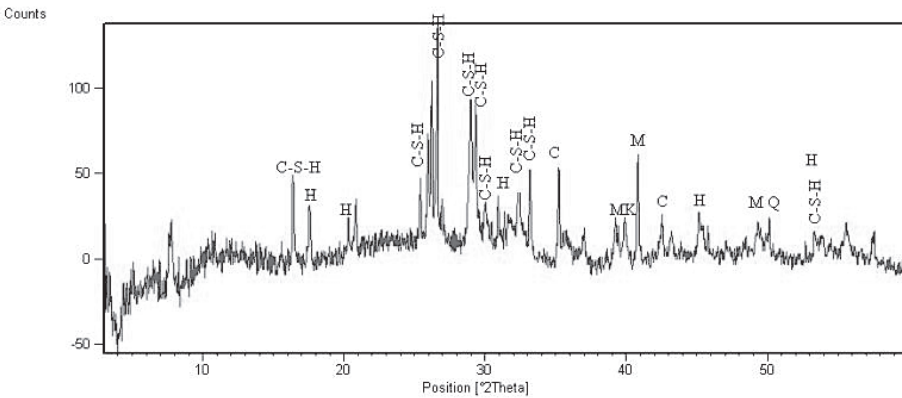
### Analiza rentgenograficzna

Celem potwierdzenia wyników obserwacji mikroskopowych wykonano analizy rentgenograficzne XRD zarówno dla próbek betonów wykonanych z zastosowaniem popiołów ze spalania węgla kamiennego, jak i popiołów ze współspalania węgla kamiennego i biomasy.



Źródło: Jak w ryc. 1.

Ryc. 10. Rentgenogram próbki ABK z popiołem ze spalania węgla kamiennego:  
C – kalcyt, H – hydrogranaty, M – mullit, T – tobermoryt, Q – kwarc



Źródło: Jak w ryc. 1.

Ryc. 11. Rentgenogram próbki ABK z popiołem ze współspalania węgla i biomasy:  
C – kalcyt, H – hydrogranaty, M – mullit, Q – kwarc, C-S-H

Na podstawie przeprowadzonej analizy rentgenograficznej próbek betonu komórkowego zidentyfikowano w badanych materiałach, niezależnie od zastosowanego popiołu, występowanie głównych refleksów charakterystycznych dla kwarcu (26,64; 20,86; 50,14), mullitu (16,43; 26,26; 35,27; 40,86) oraz kalcytu (29,41; 48,52; 39,42). W badanych próbkach stwierdzono także obecność uwodnionych krzemianów wapnia w postaci tobermorytu (28,97; 7,82; 29,96)

oraz uwodnionych krzemianów wapnia typu C-S-H (29,36; 32,05; 50,08), jak i obecność uwodnionych glino-krzemianów wapnia (32,37; 28,88; 39,91). W analizowanych próbkach największą intensywność posiadały refleksy pochodzące od kwarcu oraz mullitu. Stosunkowo dużą intensywność wykazywały także piki charakterystyczne dla kalcytu. Najmniejszą intensywność refleksów stwierdzono dla uwodnionych krzemianów wapnia typu C-S-H, co znajduje wytłumaczenie w skrytokrystalicznej mikrostrukturze fazy C-S-H. Równocześnie także w przypadku próbek betonów komórkowych podniesione tła rentgenogramów świadczą najprawdopodobniej o obecności w badanych betonach znacznych ilości materiału amorficznego lub submikrokrystalicznego (zarówno materiału szklatego pochodzącego z popiołów lotnych, jak i z uwodnionych krzemianów wapnia).

Podsumowując, badania składu fazowego wykazały, że nowo powstałe produkty fazowe w betonach komórkowych wytworzonych przy użyciu popiołów ze spalania węgla kamiennego, jak i popiołów ze współspalania węgla kamiennego i biomasy to C-S-H, tobermoryt oraz uwodnione glino-krzemiany wapnia. Obok nowo powstałych produktów hydratacji we wszystkich analizowanych betonach komórkowych stwierdzono również obecność mullitu, pochodzącego z reliktywów ziaren popiołów, oraz  $\text{CaCO}_3$ , pochodzącego najprawdopodobniej z reakcji wodorotlenku wapnia z  $\text{CO}_2$  zawartym w powietrzu lub też  $\text{CaCO}_3$  wprowadzonego wraz z wapnem przez producenta betonu. Mikrostruktura betonów komórkowych o zwartej matrycy spoiwowej z wyraźnie wykształconymi pustkami powietrznymi jest typowa dla autoklawizowanych betonów komórkowych. W betonach komórkowych wykonanych zarówno z dodatkiem popiołów ze spalania węgla kamiennego, jak i popiołów ze współspalania węgla kamiennego i biomasy stwierdzono bardzo równomierny rozkład porów w betonie.

## 5. Podsumowanie

Przeprowadzone badania pozwoliły na kompleksowe poznanie właściwości popiołów lotnych powstających w energetycznych instalacjach kotłowych z paleniskami pyłowymi, przy współspalaniu węgla i biomasy w postaci trocin w ilości 8,7% i 12% oraz zrębków w ilości 20% w stosunku do paliwa węglowego.

Stwierdzono, że dodawanie do węgla paliwa z biomasy w postaci trocin i zrębków ma wpływ na pracę instalacji młynowej i jakość uzyskiwanego przemiału paliwa. Wzrost udziału biomasy ogranicza wydajność młynów węglowych i pogarsza jakość przemiału paliwa. W pewnym stopniu dodawanie biomasy wpływa na inny przebieg rozkładu temperatur w kotle oraz na spadek sprawności spalania w kotle. Wyniki tych badań mogą być wykorzystane do wspólnych działań z elektrowniami w aspekcie otrzymania popiołów nadających się do utylizacji w przemyśle materiałów budowlanych.

Badania wykazały, że chociaż w składzie chemicznym popiołów ze współspalania węgla i biomasy, w porównaniu z popiołami ze spalania samego węgla, występują pewne różnice, nie stanowią one jednak przeszkody w zastosowaniu tych popiołów w przemyśle materiałów budowlanych. Stwierdzono wzrastającą zawartość CaO wolnego w miarę większego udziału biomasy w paliwie i korzystnie malejącą zawartość naturalnych pierwiastków promieniotwórczych w miarę wzrostu ilości biomasy. Nie stwierdzono zwiększonych ilości  $P_2O_5$  w popiele z biomasą, czego się obawiano z uwagi na możliwość wystąpienia zakłóceń w hydratacji materiałów wiążących przy utylizacji popiołów w procesach wytwarzania materiałów budowlanych.

Skład fazowy popiołów ze współspalania węgla i biomasy oraz popiołów ze spalania samego węgla jest zbliżony. Popioły ze współspalania zawierają nieznacznie więcej ziaren nieforemnych niż popioły ze spalania samego węgla.

Popioły lotne powstające przy ilości współspalanej biomasy ok. 20% w stosunku do paliwa węglowego mogą być wykorzystane do wytwarzania autoklawizowanych betonów komórkowych. Nie powodują zakłóceń w procesie wyrastania i wiązania masy i pozwalają na uzyskanie betonu o dobrej wytrzymałości (przy ilości współspalanej biomasy 20% uzyskano obniżoną wytrzymałość betonu). Nie wyklucza się dopracowania receptur na uzyskanie betonu o korzystniejszej wytrzymałości przy ilości współspalanej biomasy 20% i powyżej.

## Literatura

- [1] Projekt badawczy nr N506 066 31/3156 – „Popioły lotne powstające przy współspalaniu biomasy z węglem w kotłach pyłowych – badania rozpoznawcze pod kątem ich utylizacji w przemyśle materiałów budowlanych” – Sprawozdanie COBRPB CEBET.
- [2] Łaskawiec K., Górska B., Szymczak J., Zapotoczna-Sytek G., *Zastosowanie popiołów lotnych ze współspalania węgla kamiennego i biomasy do wytwarzania betonu komórkowego*, [w:] *Popioły z energetyki. XVI międzynarodowa konferencja 21–24 października 2009 Zakopane*, Polska Unia UPS, Zakopane 2009.
- [3] Jatyłowicz H., Siejko J., Zapotoczna-Sytek G., *Technologia autoklawizowanego betonu komórkowego*, Arkady, Warszawa 1980.
- [4] Zapotoczna-Sytek G., *Przydatność popiołów lotnych z nowoczesnych palenisk przemysłowych do produkcji betonu komórkowego*, Politechnika Warszawska, Warszawa 1973, praca doktorska.
- [5] Tkaczewska E., *Wpływ właściwości fizykochemicznych krzemionkowych popiołów lotnych na proces hydratacji cementu*, Akademia Górniczo-Hutnicza w Krakowie, Kraków 2007, praca doktorska.
- [6] Giergiczny Z., *Rola popiołów lotnych wapniowych i krzemionkowych w kształtowaniu właściwości współczesnych spoiw budowlanych i tworzyw ceramicznych*, Politechnika Krakowska, Kraków 2006.



- [7] Bilbao R., Mastral J.F., Aldea M.E., Ceamanos J., *The influence of the percentage of oxygen in the atmosphere on the thermal decomposition of lignocellulosic materials*, „Journal of Analytical and Applied Pyrolysis” 1997, Vol. 42, s. 189–202.
- [8] Vouthaluru H.B., *Thermal behaviour of coal/biomass blends during co-pyrolysis*, „Fuel Processing Technology” 2003, Vol. 85, s. 141–155.
- [9] Biagini E., Lippi F., Petarca L., Tognotti L., *Devolatilization rate of biomasses and coal-biomass blends: an experimental investigation*, Fuel 2002, Vol. 81, s. 1041–1050.
- [10] Zhou X., Mahalingham S., *A suitable mixture fraction for diffusion flames of wood pyrolysis gas*, „Combustion and Flame” 2003, Vol. 133, s. 197–199.
- [11] Chan W.-Ch. R., Kelbon M., Krieger B.B., *Modelling and experimental verification of physical and chemical processes during pyrolysis of large biomass particle*, Department of Chemical Engineering, University of Washington, Washington b.r.
- [12] Garbaciak A., Kalarus D., *Popioły lotne z procesów współspalania w energetyce krajowej – uwarunkowania formalne i jakościowe stosowania popiołu do betonu i cementu, w świetle nowej normy EN 450*, [w:] *Popioły z energetyki: monografia, Sopot, 12–14 października 2005*, red. A. Myszkowska, T. Szczygielski, Ekotech, Szczecin [2005].
- [13] Kosior-Kazberuk M., *Wykorzystanie w budownictwie popiołów lotnych pochodzących ze współspalania węgla i biomasy*, [w:] *Zagadnienia materiałowo-technologiczne infrastruktury i budownictwa*, red. A. Łapko, M. Broniewicz, J.A. Prusiel, Wydawnictwo Politechniki Białostockiej, Białystok 2008, s. 333–340.
- [14] EN 450:1998 Popiół lotny do betonu. Definicje, wymagania i kontrola jakości.
- [15] EN 450-1+A1:2009 Popiół lotny do betonu – Część 1: Definicje, specyfikacje i kryteria zgodności.
- [16] EN 450-2:2006 Popiół lotny do betonu – Część 2: Ocena zgodności.
- [17] BN-87/6713-02 Popioły lotne z węgla kamiennego do produkcji betonu komórkowego.
- [18] Instrukcja badań i oceny popiołów lotnych z węgla kamiennego stosowanych do produkcji betonu komórkowego, CEBET, Warszawa 1987.

KATARZYNA ŁASKAWIEC  
AGNIESZKA MICHALIK  
GENOWEFA ZAPOTOCZNA-SYTEK

#### THE FLY ASHES FROM BURNING WOOD-BIOMASS WITH COAL TO PRODUCING AUTOCLAVE AERATED CONCRETE

The paper presents the characteristic of fly ashes from burning biomass with coal. The properties of these ashes depend on the different quantity and the kind of the co-combustion of biomass in relation to coal as well as on the way of its preparation and the burning in dust boilers. Influence of these ashes on technological process, the macro and the microstructure as well as the usable properties of autoclaved aerated concrete are also indicated.