

BADANIE PRZYDATNOŚCI POPIOŁU LOTNEGO ZE SPALANIA BIOMASY DO PRODUKCJI BETONÓW CEMENTOWYCH

Małgorzata A. LELUSZ*

Wydział Budownictwa i Inżynierii Środowiska, Politechnika Białostocka, ul. Wiejska 45E, 15-950 Białystok

Streszczenie: W obiektach energetycznych coraz częściej wykorzystuje się paliwa wtórne (alternatywne) do wytwarzania energii. Biomasa, uznawana za paliwo zeroemisyjne, jest coraz powszechniej wykorzystywana w elektrowniach i elektrociepłowniach. W artykule przedstawiono wyniki badań, których celem była wstępna ocena możliwości zastosowania popiołów lotnych ze spalania biomasy do wytwarzania kompozytów o matrycy cementowej. W testach laboratoryjnych stosowano popiół ze spalania biomasy drzewnej, z jednoczesnego spalania węgla kamiennego i biomasy oraz ze spalania samego węgla. Zaprezentowano wyniki badań rozwoju wytrzymałości na ściskanie betonu zawierającego popiół lotny w ilości do 40% masy spoiwa. Dodatek traktowany był jako zamiennik cementu. Porównano właściwości pucolanowe badanych popiołów oraz oceniono wpływ ilości popiołu ze spalania biomasy na ciepło hydratacji cementu. Przeprowadzone badania pokazały, że istnieje możliwość gospodarczego wykorzystania popiołów lotnych ze spalania biomasy drzewnej.

Słowa kluczowe: popiół lotny, biomasa, kompozyt o matrycy cementowej, wytrzymałość na ściskanie.

1. Wprowadzenie

Zobowiązania międzynarodowe obligują Polskę do zwiększania udziału odnawialnych źródeł energii w bilansie energetycznym kraju. W elektrowniach i elektrociepłowniach coraz powszechniej paliwa kopalne zastępowane są paliwami odnawialnymi. W Polsce jako biopaliwo najczęściej stosuje się odpady leśne, wierzbę i topolę energetyczną oraz odpady pochodzenia rolniczego, czyli tak zwane paliwo „agro”. Paliwo to, to przede wszystkim tak zwany „pellet” czyli odpowiednio przygotowana słoma, łuski słonecznika lub wytłoki z buraka cukrowego. Ponadto, jako paliwo „agro” mogą być również stosowane ziarna zbóż niespełniające wymagań jakościowych. Zgodnie z ustawą z dnia 20 lutego 2015 roku o odnawialnych źródłach energii (Dz. U. 2015 poz. 478) biopaliwo to również odpady pochodzenia zwierzęcego, w tym odpady kostne oraz odpady z papieru i osady ściekowe. Tego typu bioodpady wykorzystywane są w mniejszych ilościach. Uboczne produkty spalania, powstające podczas spalania biomasy, mają odmienny skład chemiczny i fazowy od produktów spalania węgla kamiennego czy brunatnego. Jedną z przeszkód w rozwoju produkcji biomasy i jej spalania jest brak możliwości zagospodarowania popiołów pochodzących ze spalania tego biopaliwa. Ostre warunki odzysku zawarte w rozporządzeniu Ministra Środowiska z dnia 9 września 2002 roku (Dz.U. 2002, Nr 165, poz. 1359) ograniczają wykorzystanie odpadu jako nawozu. Brakuje

również wytycznych stosowania tego typu popiołów w technologii produkcji materiałów budowlanych (Baran i in., 2015).

Celem pracy była wstępna ocena popiołów lotnych pochodzących ze spalania biomasy drzewnej (BFA), jednoczesnego spalania węgla kamiennego i biomasy (FAC) oraz samego węgla (FA) jako zamiennika części cementu w kompozytach o matrycy cementowej. Program badań obejmował oznaczenie wybranych właściwości popiołów lotnych oraz określenie rozwoju wytrzymałości betonów zawierających popioły. Oceniono również wpływ popiołu pochodzącego ze spalania biomasy na ciepło hydratacji cementu.

2. Materiały i metody badań

2.1. Charakterystyka badanych

Przedmiotem badań były: popioły lotne pochodzące ze spalania w kotle fluidalnym ze złożem pęcherzykowym (temperatura spalania około 750°C) biomasy drzewnej (oznaczone jako BFA), popioły lotne pochodzące z jednoczesnego spalania w kotle konwencjonalnym (temperatura spalania 1100-1200°C) mieszaniny biomasy drzewnej i węgla kamiennego w procentowej proporcji wagowej 20:80 (oznaczone jako FAC) oraz popioły ze spalania pyłu węglowego w kotle konwencjonalnym (FA). Właściwości badanych popiołów podano w tabeli 1.

* Autor odpowiedzialny za korespondencję. E-mail: m.lelusz@pb.edu.pl

Analizowane popioły różnią się między sobą zawartością SiO₂ oraz ilością niespalonych cząstek. Zróżnicowana jest również ich miąłkość i wodożądność.

Badanie morfologii popiołu lotnego ze spalania biomasy (BFA) wykonano za pomocą elektronowego mikroskopu skaningowego E-SEM (rys. 1). W popiele zauważyć można duże zróżnicowanie wielkości i kształtów cząstek popiołu. Dominują ziarna o kształtach nieregularnych. Występują zarówno formy zwarte, jak i gąbczaste o rozwiniętej powierzchni. W popiele znajdują się również ziarna kuliste.

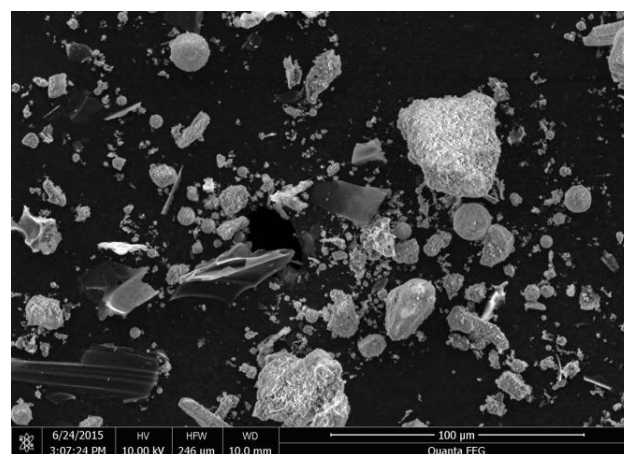
2.2. Przygotowanie próbek i metody badań

Do przygotowania próbek betonowych wykorzystywano cement CEM III 42,5A oraz kruszywo naturalne o uziarnieniu do 8 mm. Popiół lotny stosowany był jako dodatek typu II w ilości 20%, 30% i 40% w stosunku do masy cementu. Ilość spoiwa była stała i wynosiła 550 kg/m³. We wszystkich składach betonu przyjęto jednakowy współczynnik $w/s = 0,36$. W celu poprawy urabialności stosowano superplastyfikator wytwarzany na bazie karboksylanów. Był on dozowany w ilości od 2 do 7% masy cementu. Składy mieszanek betonowych podano w tabeli 2.

Próbki po rozformowaniu przechowywane były w wodzie w temperaturze około 20°C do momentu rozpoczęcia właściwego badania. Ocenę rozwoju

wytrzymałości w czasie przeprowadzono na 7, 28 i 90 dniowych próbkach betonu zgodnie z PN-EN 12390-3 *Badania betonu – Część 3: Wytrzymałość na ściskanie próbek do badania*.

Aktywność pucolanową popiołów oceniano metodą zalecaną w PN-EN 450-1 *Popiół lotny do betonu – Część 1: Definicje, wymagania i kryteria zgodności*. Rozwój ilości i szybkości wydzielania ciepła hydratacji w okresie 48 h od chwili wymieszania spoiwa z wodą prześledzono wykorzystując kalorymetr przewodzący.



Rys. 1. Popiół lotny ze spalania biomasy (BFA)

Tab. 1. Właściwości badanych popiołów

Badana właściwość	Wymagania PN-EN 450-1	BFA	FAC	FA
Zawartość SiO ₂	≥ 25%	51,6%	62,1%	62,5%
Straty prażenia	≤ 9%	11,7%	4,5%	18,5%
Miałkość	≤ 40%	41,2%	36,3%	31,8%
Wodożądność	-	117%	104%	113%

Tab. 2. Składy mieszanek betonowych w kg/m³

Numer serii	Spoiwo	Cement	BFA	FAC	FA	Woda	kruszywo
1		440	110	-	-		1622
2		385	165	-	-		1606
3		330	220	-	-		1590
4		440	-	110	-		1622
5	550	385	-	165	-	198	1606
6		330	-	220	-		1590
7		440	-	-	110		1622
8		385	-	-	165		1606
9		330	-	-	220		1590

3. Analiza wyników badań

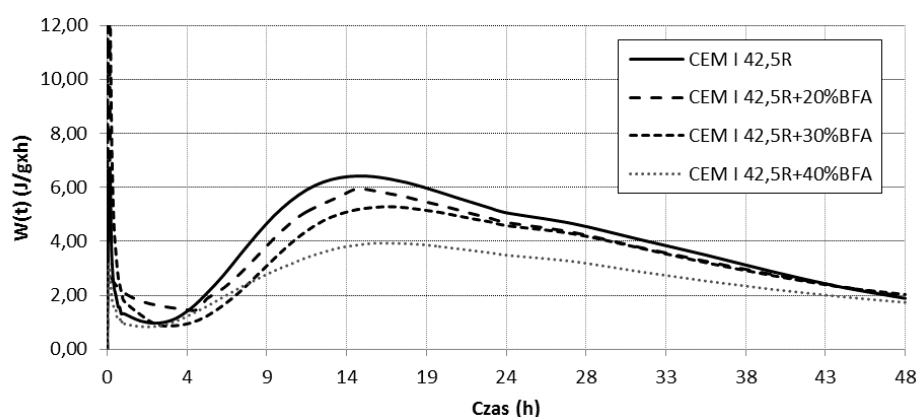
3.1. Kinetyka wydzielania ciepła hydratacji

Wyniki badań ciepła hydratacji przedstawiono w formie wykresów zmiany szybkości wydzielania ciepła hydratacji w funkcji czasu (rys. 2) oraz całkowitej ilości wydzielonego ciepła (rys. 3). Analizując wyniki badań ciepła hydratacji można zauważyć, że dodatek 20% BFA nie wpłynął na zmianę wystąpienia maksimum szybkości wydzielania ciepła, natomiast zwiększenie udziału popiołu lotnego z biomasy w spoiwie do 30% oraz 40% spowodowało opóźnienie o dwie godziny wystąpienia maksymalnego efektu cieplnego spoiw (rys. 2). Zawartość popiołu lotnego w spoiwie wpływa na ciepło hydratacji cementu. Szybkość hydratacji zmniejszała się wraz ze wzrostem ilości popiołu. Również całkowite ciepło wydzielone po 48 godzinach (rys. 3) było mniejsze o 10,3% w przypadku zastąpienia 20% cementu popiołem, o 11,4% w przypadku zastosowania 30% popiołu

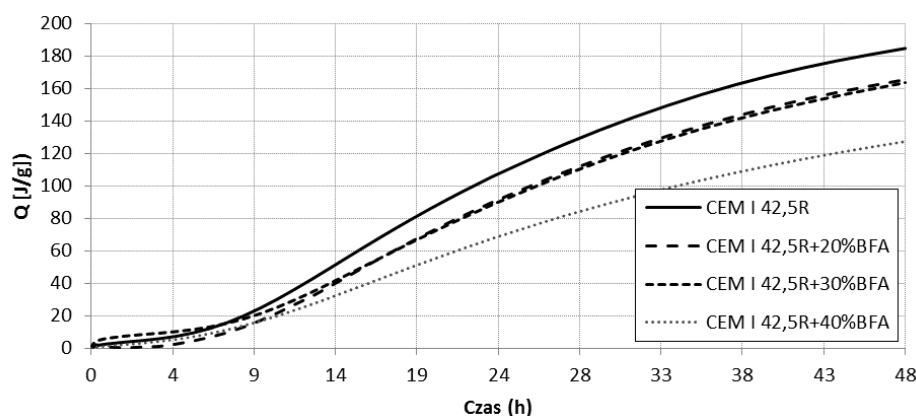
w spoiwie oraz aż o 31,2% – gdy wprowadzono 40% popiołu zamiast cementu.

3.2. Aktywność pucolanowa popiołów

W tabeli 3 przedstawiono wskaźniki aktywności pucolanowej obliczone na podstawie wyników badania wytrzymałości zapraw zgodnie z PN-EN 450-1. Pomimo znacznej ilości niespalonego węgla w popiele FA, wyrażonej stratami prażenia, wskaźniki przekroczyły wymagane wartości. Świadczy to o prawidłowym przebiegu reakcji pucolanowej. Jedynie współczynnik aktywności pucolanowej zaprawy z popiołem lotnym, uzyskanym ze spalania biomasy drzewnej, oznaczony po 90 dniach dojrzewania nie osiągnął wymaganych przez normę PN-EN 450-1 – 85%. Norma PN-EN 450-1 odnosi się do popiołów lotnych uzyskanych ze spalania węgla lub jednoczesnego spalania węgla i biomasy w kotłach konwencjonalnych, nie uwzględnia jednak popiołów uzyskanych ze spalania samej biomasy.



Rys. 2. Krzywe kalometryczne szybkości wydzielania ciepła hydratacji cementu z dodatkiem popiołu lotnego ze spalania biomasy (BFA)



Rys. 3. Krzywe kalometryczne wydzielonego ciepła hydratacji cementu z dodatkiem popiołu lotnego ze spalania biomasy (BFA)

Tab. 3. Wskaźniki aktywności pucolanowej popiołów

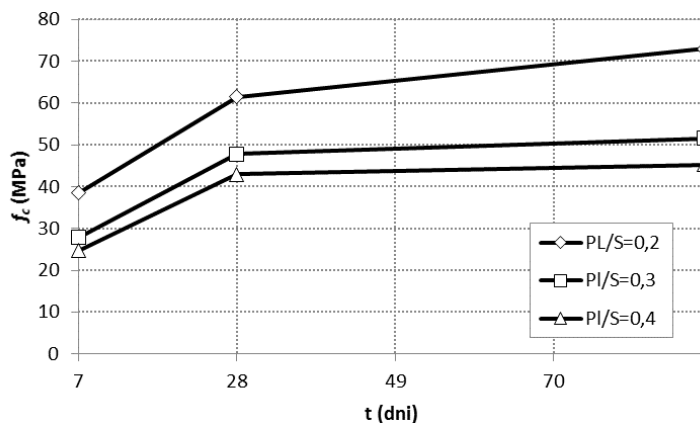
Wiek zaprawy	Wymagania PN-EN 450-1	BFA	FAC	FA
28 dni	75%	77,4%	81,4%	77,1%
90 dni	85%	80,3%	87,7%	95,9%

3.3. Wytrzymałość na ściskanie betonów

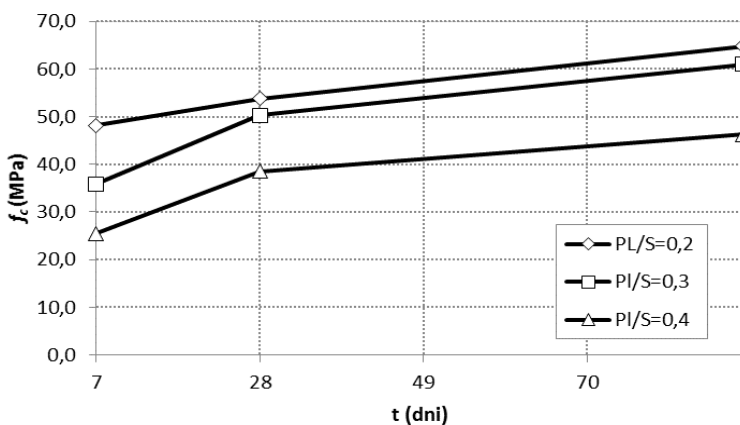
Średnie wartości wytrzymałości na ściskanie betonów zawierających badane popioły lotne przedstawiono na rysunkach 4-6.

W początkowym okresie, po 7 dniach dojrzewania, betony zawierające popiół lotny z biomasy uzyskiwały najniższe wyniki wytrzymałości na ściskanie niezależnie od zawartości popiołu lotnego. Po dłuższym okresie twardnienia, to znaczy po 90 dniach dojrzewania, beton w

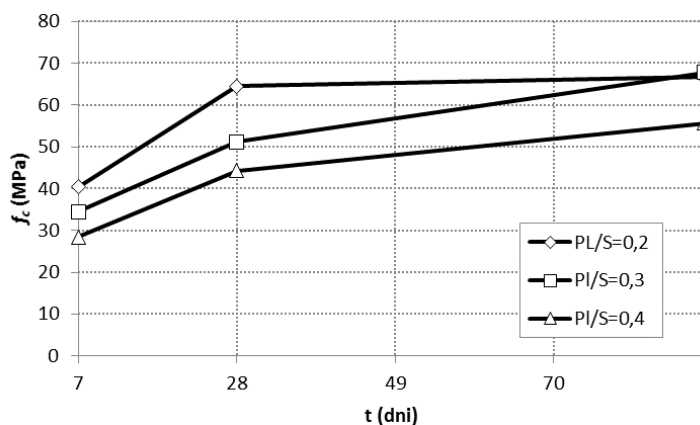
którym zastosowano popiół lotny BFA w ilości 20% masy cementu wykazywał najlepsze właściwości wytrzymałościowe. Uzyskana wytrzymałość była o 12,5% większa od wytrzymałości betonu z popiołem ze współspalania (FAC) i 9,3% wyższa od wytrzymałości betonu z popiołem z węgla (FA). Zwiększanie ilości popiołu lotnego powodowało każdorazowo obniżenie wytrzymałości betonu na ściskanie, niezależnie od tego jaki rodzaj popiołu zastosowano.



Rys. 4. Zależność wytrzymałości na ściskanie betonu zawierającego popiół lotny ze spalania biomasy (BFA) od czasu dojrzewania i zawartości popiołu



Rys. 5. Zależność wytrzymałości na ściskanie betonu zawierającego popiół lotny ze współspalania węgla i biomasy (FAC) od czasu dojrzewania i zawartości popiołu



Rys. 6. Zależność wytrzymałości na ściskanie betonu zawierającego popiół lotny ze spalania węgla (FA) od czasu dojrzewania i zawartości popiołu

4. Podsumowanie

Biomasa, która uznawana jest za paliwo zeroemisyjne, jest coraz powszechniej stosowana jako podstawowe paliwo w obiektach energetycznych. Uboczne produkty spalania, powstające podczas spalania biomasy, mają odmienny skład chemiczny i fazowy od produktów spalania węgla kamiennego czy brunatnego. Przeprowadzone badania laboratoryjne wykazały, że istnieje możliwość gospodarczego wykorzystania popiołów lotnych ze spalania biomasy drzewnej w technologii betonu i mogą być one traktowane jako potencjalny składnik kompozytów o matrycy cementowej. Badane popioły odznaczają się odmienną morfologią oraz właściwościami od powszechnie znanych popiołów konwencjonalnych. Zawartość w spoiwie popiołu lotnego z biomasy wpływa na ciepło hydratacji cementu. Wraz ze wzrostem ilości popiołu w spoiwie zmniejszała się szybkość hydratacji oraz ciepło całkowite. Zwiększanie ilości popiołu lotnego powodowało każdorazowo obniżenie wytrzymałości betonu na ściskanie, niezależnie od tego jaki rodzaj popiołu zastosowano. Wytrzymałość wczesna betonu zawierającego popiół lotny z biomasy była najniższa, niezależnie od zawartości popiołu lotnego. Osiągnięcie wytrzymałości porównywalnej czy nawet wyższej od wytrzymałości betonu z popiołami konwencjonalnymi wymaga wydłużonego czasu dojrzewania i zmniejszonej ilości popiołu. Kolejne badania nad zastosowaniem w technologii betonu popiołów z biomasy powinny uwzględniać możliwość aktywacji tych popiołów oraz trwałość wyrobów betonowych. Trzeba również pamiętać, że warunkiem umożliwiającym przemysłowe wykorzystanie popiołu pochodzącego ze spalania biomasy jest także prowadzenie procesu spalania i odprowadzania odpadów energetycznych, żeby uzyskać surowiec o wysokiej, stabilnej jakości.

Literatura

- Baran T., Ostrowski M., Giergiczny Z. (2015). Wykorzystanie mieszanych popiołów lotnych z oddzielnego spalania pyłu węglowego i paliw wtórnych w produkcji spoiw wiążących. *Materiały budowlane*, 12/2015, 37-40.
- Gawlicki M., Graur Z., Ślęzak E. (2014). Popioły lotne ze spalania biomasy jako składnik spoiw drogowych. *Prace Instytutu Ceramiki i Materiałów Budowlanych*, Warszawa-Opole, 34-46.
- Kosior-Kazberuk M., Lelusz M. (2010). Ocena popiołu pochodzącego z jednoczesnego spalania biomasy i węgla jako składnika kompozytów cementowych. *Materiały Ceramiczne / Ceramic Materials*, Vol. 62, No 2, 166-170.
- Rozporządzenie Ministra Środowiska z dnia 9 września 2002 roku w sprawie standardów jakości gleby oraz standardów jakości ziemi. *Dz. U. Nr 165. poz.1358 i 1359*.
- Ustawa z dnia 20 lutego 2015 roku o odnawialnych źródłach energii. *Dz. U. 2015 poz. 478*.

SUITABILITY TESTING OF FLY ASH FROM BIOMASS COMBUSTION FOR THE CEMENT CONCRETE PRODUCTION

Abstract: Secondary fuels are increasingly used for power generation in power plants. Biomass, considered as a zero-emission fuel, is more often used in power plants, recently. The paper aim was to assess the possibility of using fly ash from the biomass combustion for the production of cement matrix composites. In the laboratory research ashes from the combustion of: wood biomass, co-combustion of coal and biomass and combustion of coal alone were used. The research results of the development in compressive strength of concrete containing fly ash in an amount up to 40% by mass of the binder are presented. The addition was treated as a substitute for cement. Pozzolanic properties of the ashes were tested and the impact of the content of ash from biomass combustion hydration heat of cement were assessed. The study showed that there is a possibility of economic utilisation of fly ash from the combustion of wood biomass for the cement concrete production.

Badania zostały zrealizowane w ramach pracy nr S/WBiŚ/1/16 i sfinansowane ze środków na naukę MNiSW.