

OCENA ZAWARTOŚCI AKTYWNEGO SiO₂ W POPIOŁACH LOTNYCH WYTWARZANYCH W OBIEKTACH ENERGETYCZNYCH PÓŁNOCNO-WSCHODNIEJ POLSKI

Małgorzata LELUSZ*

Wydział Budownictwa i Inżynierii Środowiska, Politechnika Białostocka, ul. Wiejska 45A, 15-352 Białystok

Streszczenie: W artykule przedstawiono wyniki badań terenowo-laboratoryjnych wahań ilości reaktywnego SiO₂ w popiołach lotnych z obiektów energetycznych północno-wschodniej Polski. Ocena ilości SiO₂ wykonano w zależności od dwóch czynników: źródła pochodzenia popiołu lotnego (czynnik A) i okresu odbioru próbek popiołu (czynnik B). Zastosowanie analizy wariancji do oceny zgromadzonych danych pozwoliło ustalić, że oba rozpatrywane czynniki A i B istotnie wpływają na zawartość SiO₂ w popiołach lotnych uzyskanych w ciągu siedmiu miesięcy sezonu grzewczego 2010/2011 z wytypowanych sześciu obiektów energetycznych. Udział wpływu czynnika A wynosi 64%, zaś czynnika B – 7%, to jest czynnik B ma znacznie mniejszy wpływ niż czynnik A.

Słowa kluczowe: obiekt energetyczny, popiół lotny, reaktywna krzemionka, sezon grzewczy, analiza wariancji, czynnik istotny.

1. Wprowadzenie

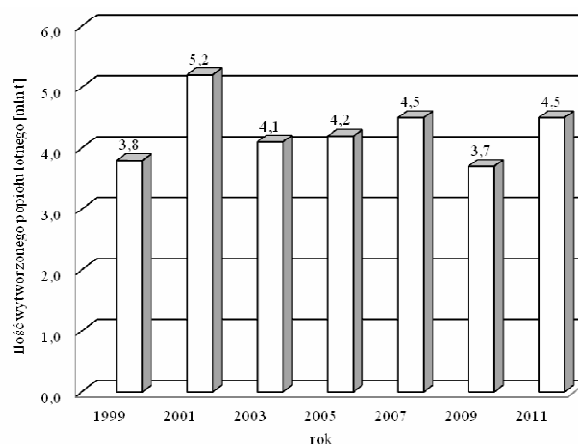
Popioły lotne od lat są powszechnie stosowane jako dodatki do cementu i betonu. Są to pyły wytrącane w elektrofiltrach po spalaniu węgla kamiennego lub brunatnego w różnego rodzaju paleniskach obiektów energetycznych. Popiół lotny dodawany do mieszanki betonowej w znacznym stopniu wpływa na właściwości betonu. Uzyskane tworzywo może wykazywać zwiększoną trwałość konstrukcji w wyniku zmniejszenia ciepła hydratacji spoiwa, obniżenia alkaliczności cementów, wzrostu odporności betonu na wnikanie chlorków i siarczanów.

Stosowanie popiołów lotnych jako dodatków do betonu ma również znaczenie ekologiczne.

Umożliwia bezpieczne zagospodarowanie uciążliwego odpadu. Produkty hydratacji cementu portlandzkiego mogą trwale wiązać toksyczne kationy występujące w popiołach lotnych. Stopień immobilizacji metali ciężkich przez spoiwa mineralne może wynosić powyżej 99% (Nocun-Wczelik, 1997).

Przemysł energetyczny w Polsce, który opiera się głównie na spalaniu węgla, generuje każdego roku miliony ton ubocznych produktów spalania. Popioły lotne stanowią prawie 70% wytwarzanych odpadów energetycznych. Na rysunku 1 przedstawiono ilości wytworzonych popiołów lotnych w Polsce. Popioły lotne

z węgla wytwarzane są w naszym kraju na zbliżonym poziomie od kilkunastu lat (GUS, 2000-2012).



Rys. 1. Popioły z węgla wytwarzane w Polsce w ciągu roku (opracowanie własne na podstawie GUS, 2000-2012)

Obecnie istnieje wiele możliwości zagospodarowywania popiołów lotnych. Są one stosowane do produkcji klinkieru i cementu, do produkcji betonu oraz produkcji kruszyw lekkich i ceramiki budowlanej, jak również w drogownictwie i robotach inżynierskich oraz w górnictwie podziemnym (Hycnar 2009; Galos

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

i Uliasz-Bocheńczyk 2005). Wykorzystanie popiołów lotnych jest wysokie i utrzymuje się w ostatnich latach na poziomie około 90% (GUS, 2000-2012).

Klasyfikację oraz ocenę jakości popiołów lotnych można przeprowadzić ze względu na różne kryteria: skład chemiczny, zawartość substancji amorficznej i krystalicznych składników mineralnych, uziarnienie (miałkość) czy zawartość niespalonego węgla (straty prażenia). Skład chemiczny popiołów lotnych zależy od rodzaju spalonego węgla, a przede wszystkim od składu mineralnego substancji towarzyszących. Można wyodrębnić cztery grupy składników popiołów lotnych (Bastian, 1980):

- składniki podstawowe (SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 , CaO),
- składniki uboczne (MgO , SO_3 , NaO , K_2O),
- składniki śladowe (TiO_2 , P_2O_5 , MnO i inne),
- niespalony węgiel (straty prażenia).

Popioły lotne uzyskane w wyniku spalania węgla kamiennego stosuje się w produkcji cementu i betonu, ponieważ mają one dużą miałkość i skład zbliżony do ilastych surowców naturalnych. Ich skład chemiczny jest podobny do składu wyprażonego łupku karbońskiego, który jest głównym niepalnym składnikiem węgla kamiennego. Jest to powodem niedużych różnic chemicznych tej grupy popiołów lotnych (Giergiczny, 2006). Kurdowski (2010) podaje, że popioły z węgla kamiennego charakteryzują się stosunkowo nieznacznymi różnicami składu chemicznego, ilość aktywnego SiO_2 stanowi przeciętnie 46-50%. Natomiast Giergiczny (2006) podaje, że zawartość krzemionki może się wahać od 23 do 70%, czyli wahania składu chemicznego popiołów mogą być znaczne.

Oceniając popioły jako aktywne dodatki mineralne do cementu czy betonu należy wziąć pod uwagę nie tylko ich skład chemiczny, lecz przede wszystkim udział w nim aktywnej substancji bezpostaciowej. O właściwościach pucolanowych popiołów lotnych krzemionkowych decyduje zawarte w nim nietrwałe szkło krzemionkowo-glinowo-potasowe. Składnik ten powstaje w wyniku wydzielania w trakcie spalania węgla substancji nieorganicznej, następnie jej stopienia i zestalenia w postaci bardzo drobnych kulistych cząstek. Ilość fazy szklistej w składzie popiołów krzemionkowych jest zróżnicowana i zawiera się w granicach 30-80% (Giergiczny, 2006).

Ilość SiO_2 oraz udział szkła w składzie popiołów lotnych decydują o zawartości aktywnego SiO_2 , czyli krzemionki, która reaguje w normalnych warunkach z Ca(OH)_2 i odpowiada za aktywność pucolanową krzemionkowych popiołów lotnych. Zgodnie z PN-EN 450-1: 2009 *Popiół lotny do betonu. Część 1: Definicje, specyfikacja i kryteria zgodności* w popiele lotnym przeznaczonym do betonów ilość zawartej w nim krzemionki nie powinna być mniejsza niż 25%.

Popioły lotne wprowadzone do betonu mogą w istotny sposób wpływać na właściwości mieszanki betonowej i stwardniałego betonu. Dodatek ten istotnie zmniejsza dynamikę narastania wytrzymałości oraz znacząco zwiększa trwałość betonów (Neville 2000; Giergiczny 2006; Ezerskiy i Lelusz, 2011). Nie każdy popiół lotny

może być wykorzystywany w technologii betonu. O możliwości stosowania decyduje jego skład chemiczny oraz właściwości fizyczne.

W zależności od jakości spalanego węgla oraz od parametrów spalania popiół lotny może mieć różny skład chemiczny oraz zmienione właściwości fizyczne. Zmiany temperatury spalania oraz stosowane systemy odpielania powodują wahania zawartości niespalonych cząstek węgla oraz wpływają na skład granulometryczny popiołu lotnego. Tego typu wahania można zauważyć w każdym obiekcie energetycznym w różnych przedziałach czasowych.

W północno-wschodniej Polsce najczęściej występuje popiół lotny powstały ze spalania węgla kamiennego. Jednak coraz częściej są współspalane również inne paliwa, na przykład biomasa (Ścieżko i in., 2006). Powoduje to zmienność składu, jak i właściwości popiołów. Odbija się to na stopniu i charakterze wpływu tych popiołów na właściwości kompozytów cementowych oraz komplikuje prognozowanie właściwości betonów z popiołami lotnymi. W regionie tym funkcjonują dwie elektrociepłownie, a w każdym mieście znajduje się co najmniej jedna duża oraz kilka mniejszych ciepłowni.

Stosowanie popiołów lotnych ze względu na ich dużą zmienność może prowadzić do znacznych różnic właściwości betonów. Prowadzone dotychczas badania jakości popiołów lotnych miały charakter wyrwykowy. Brak jednorodności oraz niestabilność właściwości zniechęcają producentów materiałów budowlanych do szerszego stosowania popiołów jako dodatków mineralnych przy produkcji kompozytów cementowych.

2. Cel i zakres badań terenowo-laboratoryjnych

Brak stabilności właściwości popiołów lotnych stwarza trudności w ocenie ich przydatności jako dodatków do kompozytów cementowych (zapraw i betonów). W zależności od rodzaju i jakości paliwa oraz parametrów spalania można się spodziewać, że popioły lotne z różnych źródeł mogą mieć różny skład chemiczny, w tym różną ilość aktywnego SiO_2 . Można przewidywać również, że popioły lotne pochodzące z tego samego obiektu energetycznego mogą charakteryzować się różną zawartością SiO_2 w różnych przedziałach czasowych. Związane to może być, między innymi, z rodzajem stosowanego paliwa, jego przemiałem, transportem czy nawet składowaniem.

Celem przedstawionych w artykule badań terenowo-laboratoryjnych jest ocena istotności wahań ilości SiO_2 w popiołach lotnych, pozyskanych z kilku różnych obiektów energetycznych północno-wschodniej Polski w zależności od dwóch czynników: źródła pochodzenia popiołu lotnego (czynnik A) i czasu odbioru próbek popiołu (czynnik B).

Zawartość w popiele SiO_2 (y_{ij} , %) została wybrana jako wskaźnik uogólniony do oceny przydatności popiołów lotnych jako dodatków mineralnych do kompozytów cementowych. Zawartość reaktywnego SiO_2 w popiele lotnym pochodzącym ze spalania węgla kamiennego

w zasadniczy sposób wpływa na jego właściwości pucolanowe.

Przy wyborze obiektów badania, zapewniających poziomy czynnika A , zostało wytypowanych sześć źródeł wytwarzania popiołu, zlokalizowanych w północno-wschodniej Polsce. Odbiór próbek popiołów lotnych oraz badania laboratoryjne zostały przeprowadzone w sezonie grzewczym 2010/2011.

3. Badane czynniki i zakresy ich zmienności oraz metodologia badań

Przeanalizowano wpływ dwóch niezależnych czynników A i B na zmienność cechy y . Czynniki A – źródło pochodzenia popiołu lotnego, rozpatrywano na sześciu poziomach ($a = 6$). Czynniki B – okres odbioru próbek popiołu, rozpatrywano na siedmiu poziomach ($b = 7$). Jako źródła pochodzenia/pobierania popiołów wytypowano 6 obiektów energetycznych (A_i), w których spalany jest węgiel kamienny. Z każdego obiektu pobierano próbki popiołów siedmiokrotnie w odstępach miesięcznych od października do kwietnia. W obiektach energetycznych oznaczonych jako $A1$ i $A2$ węgiel był spalany w kotłach pyłowych, dodatkowo w obiekcie $A1$ węgiel kamienny spalano z dodatkiem biomasy. W obu tych obiektach wytrącanie popiołów odbywało się w elektrofiltrach. W pozostałych obiektach energetycznych oznaczonych jako $A3$, $A4$, $A5$ i $A6$ w procesie spalania wykorzystywano kotły miałowe oraz odpylacze cyklonowe do odpopielania spalin.

Dla każdego połączenia poziomów czynników A i B przy realizacji obserwacji uzyskano po $n = 3$ wartości wielkości y_{ijm} , gdzie i – numer poziomu czynnika A ; j – numer poziomu czynnika B ; m – numer obserwacji. Sumaryczna liczba obserwowanych wartości cechy y_{ijm} wynosiła $N = a \cdot b \cdot n = 6 \cdot 7 \cdot 3 = 126$.

W celu określenia cechy y w każdym ze źródeł wytwarzania popiołu lotnego raz w miesiącu (w równych odcinkach czasowych) odbierano trzy próbki popiołu lotnego. Zawartość SiO_2 (y) każdej z pobranych próbek oznaczano w laboratoriach Politechniki Białostockiej.

Zawartość SiO_2 (y) w popiołach oznaczano metodą przyspieszoną wolumetryczną zgodnie z procedurą podaną przez Katal i innych (2008). Czas badania ilości

reaktywnej krzemionki w popiele lotnym tą metodą wynosi około 4 godzin.

Zbiór uzyskanych wartości y_{ijm} przy znanych $a = 6$ i $b = 7$ umieszczono w planie badania, który przedstawiono w tabeli 1.

4. Wyniki badań i ich analiza

Wstępna analiza wyników pomiarów (tab. 1) wykazała, że istnieje widoczny rozrzut wartości y_{ijm} przy rozpatrywaniu różnych źródeł pozyskiwania popiołu lotnego oraz w różnych miesiącach poboru popiołu, jak też w powtórzeniach próbek.

Na podstawie uzyskanych wyników określono wartości średnie zawartości SiO_2 \bar{y}_i w badanych popiołach. Przeprowadzono sprawdzenie jednorodności wariancji pomiarów według kryterium Cochra. Okazało się, że przy poziomie istotności $\alpha = 0,05$ obliczeniowa wartość kryterium Cochra $G_{obl} = 0,0730$ nie przekracza wartości krytycznej $G_{kr}^{0,05;2,42} = 0,1531$ (Krysicki i in., 2003). Można więc uznać wariancje pomiarów za jednorodne i wyznaczyć wariancję odtwarzalności eksperymentu jako średnią z wariancji poszczególnych prób. Tak obliczona wartość wyniosła $S_0^2 = 15,0314$.

Obliczono również wartości współczynnika zmienności v_i dla każdej z prób, który charakteryzuje miarę względnej zmienności obserwowanej wielkości y . Wskazano szeroki zakres zmiany współczynnika – od 3,6 do 30,2%, zaś średnia wartość v całego eksperymentu wyniosła 15,8%. Oznacza to, że mimo jednorodności wariancji dla rozpatrywanej cechy charakterystyczna jest niestabilność w poszczególnych próbach.

Do oceny istotności wpływu rozpatrywanych czynników na zmienność sumarycznej bezwzględnej wielkości zawartości SiO_2 , przedstawiającej pewną przypadkową wielkość y , zastosowano dwuczynnikową analizę wariancji. Metoda ta pozwala wykazać, czy badany pojedynczy czynnik lub wspólne oddziaływanie mają istotny wpływ na zmienność cechy. Umożliwia ona również ocenę ilościowego wkładu każdego z badanych czynników na całokształt oddziaływania (Scheffe, 1999).

Tab. 1. Plan badań i wyniki pomiarów zawartości SiO_2 y_{ijm} [%] w popiołach lotnych

Numer próby	Poziomy czynników A i B	zawartość SiO_2 [%]				Wariancja [%]	Zmienność [%]
		próbka 1	próbka 2	próbka 3	średnia		
		y_{ij1}	y_{ij2}	y_{ij3}	y_{ij}	S^2	v
1.	11	52,09	38,56	46,32	45,66	46,0952	14,9
2.	12	41,99	37,45	36,37	38,60	8,8937	7,7
3.	13	33,50	30,91	34,95	33,12	4,1887	6,2
4.	14	33,68	29,87	37,12	33,56	13,1520	10,8
...
41.	66	24,05	18,94	24,09	22,36	8,7727	13,2
42.	67	21,53	16,62	22,02	20,06	8,9180	14,9

Analiza ta pozwala na uzyskanie pozytywnej odpowiedzi tylko w przypadku istnienia istotnego wpływu. Wyniki analizy wariancji, przeprowadzonej przy założeniu zgodności wielkości y z rozkładem normalnym w stosunku do wartości średniej, podano w tabeli 2. Przy ocenie istotności wpływu rozpatrywanych czynników okazało się, że wszystkie obliczone wartości F_{obl} przewyższają odpowiednie wartości F_{kr} . W ten sposób, analiza wariancji ujawniła, że badane czynniki i ich współdziałanie w istotnym stopniu wpływają na zawartość SiO_2 popiołów lotnych. Poszczególne udziały wpływu czynników różnił się i wyniósł dla czynnika A – 63,8%, czynnika B – 7,0 % oraz czynników A i B – 17,3 %.

W związku z potwierdzonym wpływem analizowanych czynników w dalszej kolejności przeprowadzono badanie istotności wpływu ich średnich wartości na poszczególnych poziomach zmienności według schematu podanego przez Sheffe (1999). W tym celu wykorzystując dane z tabeli 3 obliczono średnie wartości na każdym z poziomów zmienności czynników A oraz B :

$$\begin{aligned} \bar{y}_{A1} &= 36,21; \bar{y}_{A2} = 32,91; \bar{y}_{A3} = 17,93; \\ \bar{y}_{A4} &= 20,74; \bar{y}_{A5} = 23,48; \bar{y}_{A6} = 17,05; \\ \bar{y}_{B1} &= 26,11; \bar{y}_{B2} = 24,78; \bar{y}_{B3} = 24,25; \\ \bar{y}_{B4} &= 24,54; \bar{y}_{B5} = 20,41; \bar{y}_{B6} = 29,17; \bar{y}_{B7} = 23,77. \end{aligned}$$

Wartości \bar{y}_{AiBj} podano w tabeli 3.

Następnie wyznaczono odchylenia standardowe \bar{S} różnic wartości średnich \bar{y}_{Ai} , \bar{y}_{Bj} , \bar{y}_{AiBj} oraz określono maksymalnie dopuszczalne błędy średnich $\bar{S} \cdot t$, które wyniosły dla czynnika A – 1,99; dla czynnika B – 2,15; dla współdziałania AB – 5,28.

Odpowiednie porównanie w parach wartości \bar{y}_{Ai} , \bar{y}_{Bj} , \bar{y}_{AiBj} pokazało, że różnice między parami nie zawsze przekraczają wartości maksymalne dopuszczalnych błędów, to jest nie zawsze są istotne. Porównując wartości średnie \bar{y}_{Ai} stwierdzono, że tylko dla jednej pary różnica $\bar{y}_{A1} - \bar{y}_{A6}$ okazała się mniejsza od 1,99. Oznacza to, że dla wartości zawartości SiO_2 popiołów uzyskanych z obiektów $A3$ oraz $A6$ nie ma podstaw do stwierdzenia ich istotnego zróżnicowania. Natomiast zawartości SiO_2 popiołów z pozostałych źródeł istotnie się różnią.

Dla wartości średnich \bar{y}_{Bj} ustalono, że różnice $\bar{y}_{B1} - \bar{y}_{B2}$; $\bar{y}_{B1} - \bar{y}_{B3}$; $\bar{y}_{B1} - \bar{y}_{B4}$; $\bar{y}_{B2} - \bar{y}_{B3}$; $\bar{y}_{B2} - \bar{y}_{B4}$; $\bar{y}_{B2} - \bar{y}_{B7}$; $\bar{y}_{B3} - \bar{y}_{B4}$; $\bar{y}_{B3} - \bar{y}_{B7}$; $\bar{y}_{B4} - \bar{y}_{B7}$ okazały się mniejsze, niż maksymalny dopuszczalny błąd średnich (równy 2,15), co oznacza, że nie ma podstaw do stwierdzenia ich istotnego zróżnicowania między miesiącami: $B1$ i $B2$, $B1$ i $B3$, $B1$ i $B4$, $B2$ i $B3$, $B2$ i $B4$, $B2$ i $B7$, $B3$ i $B4$, $B3$ i $B7$ oraz $B4$ i $B7$. Natomiast dla pozostałych 12-tu par różnice $\bar{y}_{Bi} - \bar{y}_{Bj}$ są istotne. Oznacza to, że zawartości SiO_2 popiołów istotnie różnią się między miesiącami: $B1$ i $B5$, $B1$ i $B6$, $B1$ i $B7$, $B2$ i $B5$, $B2$ i $B6$, $B3$ i $B5$, $B3$ i $B6$, $B4$ i $B5$, $B4$ i $B6$, $B5$ i $B6$, $B5$ i $B7$ oraz $B6$ i $B7$.

Porównując wartości średnie \bar{y}_{AiBj} (tab. 3) ustalono, że najwyższe zawartości SiO_2 popiołu lotnego uzyskanego z obiektu $A1$ w pierwszym przedziale czasowym ($B1$). Najniższą wartość odnotowano dla źródła $A6$ w okresie $B5$. W poszczególnych źródłach wytwarzania popiołu istotne różnice zawartości SiO_2 ustalono między miesiącami podanymi w tabeli 4.

Tab. 2. Wyniki dwuczynnikowej analizy wariancji pomiarów zawartości SiO_2 y_{ijm} , % badanych popiołów lotnych

Źródło wariancji	Suma kwadratów	Liczba stopni swobody	Skorygowana wariancja	Kryterium Fishera		Wpływ η [%]
				obliczeniowe F_{obl}	tablicowe F_{kr}	
Czynnik A	6748,7564	5	1349,7513	89,7954	2,35	63,8
Czynnik B	746,0912	6	124,3485	8,2726	2,23	7,0
A i B	1825,6760	30	60,8559	4,0486	1,63	17,3
Błąd pomiaru	1262,5783	84	15,0314	-	-	11,9
Razem	10583,1020	125	-	-	-	-

Tab. 3. Średnie wartości cechy \bar{y}_{AiBj} przy różnych poziomach czynników A i B

Obiekt energetyczny	Kolejne miesiące sezonu grzewczego						
	$B1$	$B2$	$B3$	$B4$	$B5$	$B6$	$B7$
$A1$	45,66	38,60	33,12	33,56	30,58	41,02	30,91
$A2$	35,64	34,64	32,18	40,42	28,40	30,10	28,97
$A3$	19,98	18,06	14,34	15,10	13,19	20,49	24,34
$A4$	12,16	24,52	25,00	17,69	19,89	25,79	20,13
$A5$	24,64	21,36	24,21	20,72	19,93	35,25	18,23
$A6$	18,56	11,47	16,63	19,77	10,47	22,36	20,06

Tab. 4. Miesiące, w których ustalono istotne różnice zawartości SiO₂

	Miesiące
Obiekt A1	B1 i B2, B1 i B3, B1 i B4, B1 i B5, B1 i B7, B2 i B3, B2 i B5, B2 i B7, B3 i B6, B4 i B6, B5 i B6 oraz B6 i B7
Obiekt A2	B1 i B5, B1 i B6, B1 i B7, B2 i B4, B2 i B5, B2 i B7, B3 i B4, B4 i B5, B4 i B6 oraz B4 i B7
Obiekt A3	B1 i B3, B1 i B5, B2 i B7, B3 i B6, B3 i B7, B4 i B6, B4 i B7, B5 i B6 oraz B5 i B7
Obiekt A4	B1 i B2, B1 i B3, B1 i B4, B1 i B5, B1 i B6, B1 i B7, B2 i B4, B3 i B4, B3 i B5, B4 i B6, B5 i B6 oraz B6 i B7
Obiekt A5	B1 i B4, B1 i B7, B2 i B6, B3 i B6, B3 i B7, B4 i B6, B5 i B6 oraz B6 i B7
Obiekt A6	B1 i B2, B1 i B5, B2 i B4, B2 i B6, B2 i B7, B3 i B5, B3 i B6, B4 i B5, B5 i B6 oraz B5 i B7

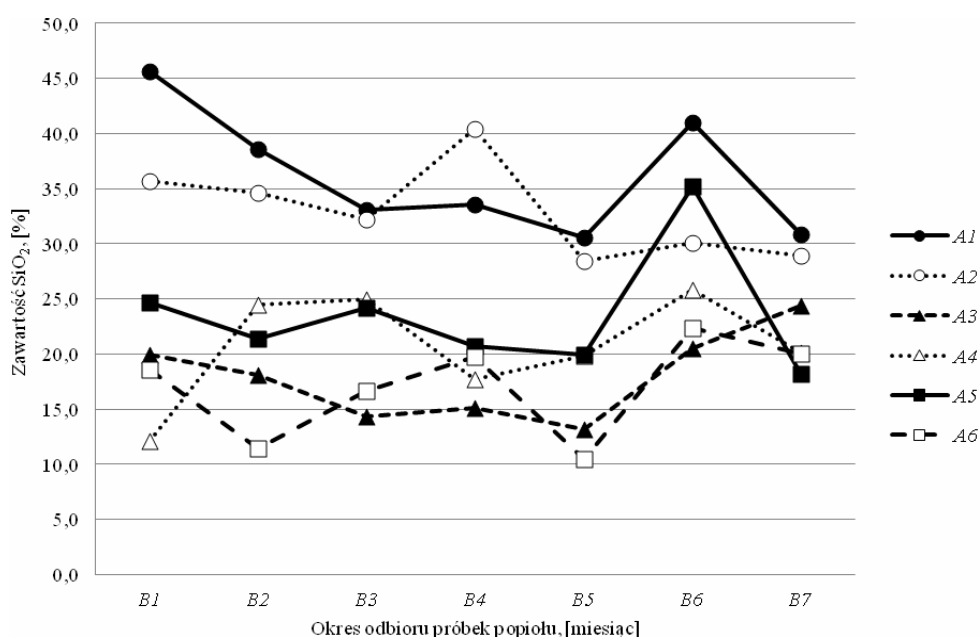
Na rysunku 2 przedstawiono wykres wahań średnich ilości SiO₂ badanych popiołów lotnych w sezonie grzewczym 2010/2011 w zależności od źródła pochodzenia popiołu lotnego. Popioły ze wszystkich rozpatrywanych obiektów energetycznych wykazują zmienną zawartość SiO₂ w poszczególnych miesiącach. Z wykresu wynika, że średnie ilości SiO₂ popiołów ze źródeł A1 i A2 znacząco różnią się od pozostałych czterech średnich i nie tworzą jednorodnej grupy. Zawartość SiO₂ w popiołach z tych źródeł jest niemal dwukrotnie większa od pozostałych. Dwa spośród monitorowanych obiektów energetycznych były to elektrociepłownie, pozostałe to ciepłownie. W elektrociepłowniach stosuje się odmienne systemy spalania węgla i odpopielania spalin, które są znacznie efektywniejsze. Rezultat takich rozwiązań technologicznych jest widoczny na wykresie w postaci znacznie większych zawartości reaktywnej krzemionki w badanych popiołach lotnych. Tylko w popiołach z obiektów A1 i A2 ilość reaktywnej krzemionki jest

większa od wymaganej przez normę PN-EN 450-1 ilości 25%, więc można rozważać stosowanie tych popiołów jako dodatki do betonów.

5. Podsumowanie

Na podstawie przeprowadzonej analizy można stwierdzić, że oba rozpatrywane czynniki – źródło pochodzenia popiołu lotnego (czynnik A) oraz okres odbioru próbek popiołu (czynnik B), istotnie wpływają na zawartość

SiO₂ (y) w popiołach lotnych uzyskanych w ciągu siedmiu miesięcy sezonu grzewczego z wytypowanych sześciu obiektów energetycznych w północno-wschodniej Polsce. Stopień wpływu rozpatrywanych czynników jest różny. Okres odbioru próbek (czynnik B) wpływa znacznie mniej niż źródło pochodzenia popiołu (czynnik A). Udział wpływu tych czynników wyniósł dla czynnika A – 63,8%, a dla czynnika B – 7,0 %. Wykryto również, że średnie



Rys. 2. Zależność średnich wartości zawartości SiO₂ w popiołach lotnych od okresu odbioru próbek (czynnik B) uzyskanych z różnych obiektów energetycznych (czynnik A)

wartości zawartości SiO₂ popiołów w podgrupach A1 i A2 znacząco różnią się od pozostałych czterech średnich. Tylko popioły z obiektów A1 i A2 mogą znaleźć zastosowanie w produkcji betonu, ponieważ zawartość reaktywnego SiO₂ przekracza w nich 25%, które jest wymagane przez normę PN-EN 450-1. W dalszych badaniach te dwie podgrupy danych będą rozpatrywane osobno.

Literatura

- Bastian S. (1980). *Betony konstrukcyjne z popiołem lotnym*. Arkady, Warszawa.
- Ezerskiy V., Lelusz M. (2011). Kinetyka procesu hydratacji kompozytów cementowych z popiołem lotnym. *Budownictwo i Inżynieria Środowiska*, 3/2011, 247-252.
- Galos K., Uliasz-Bocheńczyk A. (2005). Źródła i użytkowanie popiołów lotnych ze spalania węgla w Polsce. *Gospodarka surowcami mineralnymi*, Vol. 21, Nr 1, 23-42.
- Girgiczny Z. (2006). Rola popiołów lotnych wapniowych i krzemionkowych w kształtowaniu właściwości współczesnych spoiw budowlanych i tworzyw cementowych. *Wydawnictwo Politechniki Krakowskiej*, Kraków.
- Hycnar J. J. (2009). Eurocoalash – weryfikacja popiołów ze spalania węgla. *Energetyka-Nauka-Przemysł*, 1/2009, 48-53.
- Katyal N. K., Sharma J. M., Dhawan A. K., Ali M. M., Mohan K. (2008). Development of rapid method for estimation of reactive silica in fly ash. *Cement and Concrete Research*, Vol. 38, No. 1, 104-106.
- Krysicki W., Bartos J., Dyczka W., Królikowska K., Wasilewski M. (2003). Rachunek prawdopodobieństwa i statystyka matematyczna w zadaniach. Część II. Statystyka matematyczna. PWN, Warszawa.
- Kurdowski W. (2010). *Chemia cementu i betonu*. Stowarzyszenie Producentów Cementu Kraków, PWN, Warszawa.
- Mały Rocznik Statystyczny Polski (2000-2012). GUS, Warszawa.
- Neville A. M. (2000). Właściwości betonu. *Polski Cement Sp. z o.o.*, Kraków.
- Nocuń-Wczelik W. (1997). Immobilizacja metali ciężkich przez fazę C-S-H. *Cement-Wapno-Beton*, 5/1997, 188-191.
- Scheffe H. (1999). *The Analysis of variance*. John Wiley & Sons, New York.
- Ściężko M., Zuwała J., Pronobis M. (2006). Zalety i wady współspalania biomasy w kotłach energetycznych na tle doświadczeń eksploatacyjnych pierwszego roku współspalania biomasy na skalę przemysłową. *Energetyka i Ekologia*, 3/2006, 207-220.

EVALUATION OF REACTIVE SiO₂ CONTENT IN FLY ASHES FROM POWER PLANTS IN NORTH-EASTERN POLAND

Abstract: In the presented paper the results of field-laboratory investigation concerning the fluctuation in reactive SiO₂ content in fly ashes from power plants in north-eastern Poland. Experiments were conditioned on the basis of the SiO₂ content evaluation depending on two factors: the fly ash source (factor A) and the reception sample period (factor B). The use of variance analysis in evaluating the collected data allowed to conclude that both of the considered factors significantly influenced the fly ashes SiO₂ contents. The fly ashes were monitored during seven months of the 2010/2011 heating season. The influence share of factor A was 64% whereas for the case of factor B it was 7%. This means that factor B influences less than factor A.

Pracę wykonano w Politechnice Białostockiej w ramach realizacji projektu badawczego finansowanego ze środków MNiSW w latach 2010-2012.