

Ocena zastosowania popiołów lotnych i mikrokrzemionki w betonie

Mgr inż. Damian Marek Gil, dr hab. Grzegorz Ludwik Golewski, prof. PL, Politechnika Lubelska

1. Wprowadzenie

Globalne zarządzanie odpadami stanowi bardzo duże wyzwanie dla rozwoju krajów, nie ograniczając tym samym wzrostu rozwoju przemysłowego, budowlanego, urbanizacyjnego czy też stylu życia ludzi. Zapotrzebowanie na ekologiczny beton, tzw. zielony beton [1–4], jest spowodowane potrzebą ograniczenia emisji gazów cieplarnianych, zwolnieniem zajmowanych terenów przez odpady, a także zmniejszeniem wydobycia surowców naturalnych. Działania takie stoją w zgodzie z realizacją obiektów budowlanych, uwzględniając zasady zrównoważonego rozwoju, np. [5].

Obecnie wysokie zapotrzebowanie na zasoby naturalne w celu zaspokojenia potrzeb infrastrukturalnych stworzyło ogromne możliwości wykorzystania odpadów do budowy ekologicznej infrastruktury. Wykorzystanie materiałów alternatywnych lub materiałów odpadowych, przeznaczonych do recyklingu, w produkcji materiałów budowlanych, ma na celu zmniejszenie zużycia energii i zużycia zasobów naturalnych, co w znaczący sposób pozytywnie wpływa na środowisko naturalne. Jednym z takich sposobów jest możliwość zastępowania spoiwa cementowego w składzie mieszanki betonowej innymi wartościowymi materiałami odpadowymi. Rozwinięcie tej koncepcji stanowi wykorzystanie w betonie dodatków mineralnych [6–8] i domieszek [9–11], w tym modyfikatorów hybrydowych [12–14].

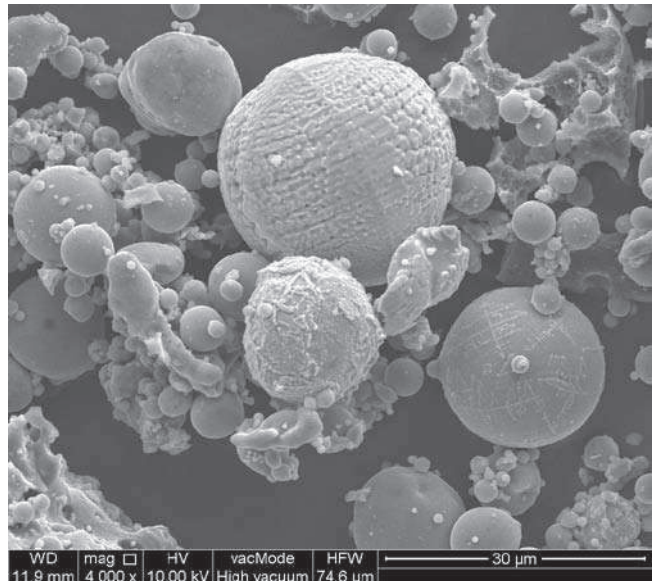
2. Charakterystyka odpadów mineralnych zutylizowanych w betonie

Odpady używane do produkcji ekologicznego betonu można podzielić na różne kategorie, m.in.:

- odpady przemysłowe, np. popiół lotny, pył krzemionkowy, granulowany żużel wielkopiecowy;
- odpady rolnicze, np. popiół z łusek ryżu, popiół z kaczek kukurydzy, popiół z trocin;
- odpady komunalne, np. szkło, papier, plastik.

2.1. Krzemionkowy popiół lotny

Odpady z elektrowni w postaci krzemionkowych popiołów lotnych (rys. 1) są wykorzystywane do produkcji betonu jako składnik cementu, a także przy budowie dróg. Jak określono w normie PN-EN 450-1:2012, popiół uzyskuje

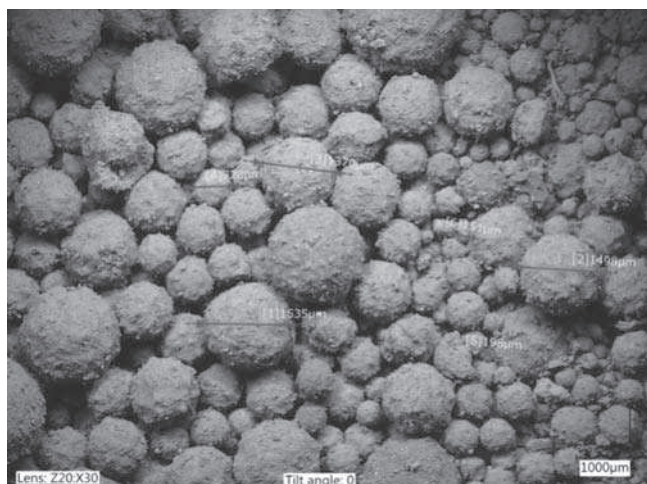


Rys. 1. Krzemionkowy popiół lotny pod mikroskopem skaningowym

się poprzez wytrącanie pylistych cząstek z gazów odłotowych z paleniska elektrowni opalanych pyłem węglowym. Charakteryzują się złożoną budową, w której przeważa faza krystaliczna. Zależy ona głównie od składu chemicznego oraz warunków spalania węgla. W trakcie tego procesu zachodzą przemiany fizykochemiczne części niepalnej węgla. Ilość powstałego szkła oraz rodzaj faz krystalicznych są związane z procesem topnienia i chłodzenia związków chemicznych w części niepalnej węgla. Fazami krystalicznymi w krzemionkowych popiołach lotnych z palenisk konwencjonalnych są m.in. kwarc, mulit, magnetyt, hematyt [16–18].

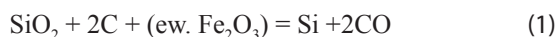
2.2. Mikrokrzemionka zagęszczona

Mikrokrzemionka (inaczej: pył krzemionkowy – stosowany zamiennie w literaturze) jest ditlenkiem krzemu (SiO_2) w postaci amorficznej z niewielką ilością tlenków glinu, żelaza i wapnia (rys. 2). Jest odpadem przemysłu hutniczego, odzyskanym z filtrów, powstającym przy obróbce krzemu metalicznego, żelazokrzemu czy innych stopów krzemowych w efekcie redukcji kwarcu przy wysokiej czystości dzięki węglowi w piecach łukowo-oporowych o działaniu ciągłym. Metaliczny krzem uzyskuje przy topieniu w piecach elektrycznych kwarcu z węglem oraz innymi różnymi materiałami



Rys. 2. Mikrokrzemionka zagęszczona pod mikroskopem optycznym

stopowymi (żelazo, rudy z zawartością żelaza) w przypadku produkcji stopów. Reakcja, jaka zachodzi przy wytwarzaniu pyłu, przedstawia wzór 1.



gdzie:

SiO₂ – kwarc,

C – mieszanka węgla, wiórek drzewnych,

Fe₂O₃ – tlenek żelaza (III) – dodatek w przypadku żelazokrzemów.

2.3. Złożona charakterystyka cementu oraz dodatków mineralnych spoiwa

W celu określenia parametrów krzemionkowych popiołów lotnych, mikrokrzemionki zagęszczonej oraz cementu wykonano badania: składu chemicznego oraz właściwości fizycznych (tab. 1 i 2).

2.4. Pozostałe składniki betonu

- Kruszywo – do wykonania mieszanki betonowej wykorzystano dodatkowo kruszywo drobne w postaci piasku kwarcowego o uziarnieniu do 2 mm oraz kruszywo grube – żwir o uziarnieniu od 2 do 8 mm. Skład ziarnowy kruszywa przedstawiono w tabeli 3.
- Spoiwo – jako spoiwa do produkcji próbek wykorzystano cement portlandzki CEM I 32,5 R, a także omówione wcześniej dodatki mineralne.
- Woda – woda została pobrana z wodociągu miejskiego.

3. Program badawczy

Ze względu na ograniczone informacje dotyczące badań z wykorzystaniem łącznego dodatku mikrokrzemionki zagęszczonej i krzemionkowych popiołów lotnych do betonu, jako substytutu cementu, podjęto się analizy wpływu dodatków pucolanowych na wybrane właściwości betonu, tj. wytrzymałości na ściskanie i rozciąganie oraz odporności na pękanie, zgodnie z II modelem pękania, np. [19].

Tabela 1. Skład chemiczny dodatków mineralnych i cementu (% wagowo)

Składnik	SF	FA	CEM I 32,5 R
SiO ₂	91,90	55,27	15,00
Al ₂ O ₃	0,71	26,72	2,78
Fe ₂ O ₃	2,54	6,66	2,72
K ₂ O	1,53	3,01	1,21
SO ₃	0,45	0,47	4,56
MgO	1,14	0,81	1,38
CaO	0,31	2,35	71,06
P ₂ O ₅	0,63	1,92	-
Cl	0,28	-	0,08
Ag ₂ O	0,07	0,10	-
TiO ₂	0,01	1,89	-
MnO	0,26	-	-

Tabela 2. Właściwości fizyczne dodatków mineralnych i cementu

Składnik	SF	FA	CEM I 32,5 R
Gęstość właściwa [g/cm ³]	2,21	1,90	3,23
Powierzchnia właściwa [cm ² /g]	26230	2944	4294
Straty prażenia [%]	3,83	4,66	3,64
Barwa	Czarny	Ciemno szary	Jasno szary

Tabela 3. Skład ziarnowy kruszywa wykorzystanego do wykonania mieszanki

Fracja [mm]	Zawartość frakcji [%]		
	Piasek	Kruszywo grube	Mieszanka
0–0,125	4,9	0,4	2,0
0,125–0,25	36,3	0,1	13,1
0,25–0,5	57,9	0,2	21,0
0,5–1,0	0,8	0,9	0,8
1,0–2,0	0,1	4,1	2,6
2,0–4,0	0,0	33,9	21,7
4,0–8,0	0,0	53,2	38,7
8,0–16,00	0,0	7,3	0,0
Punkt piaskowy	100,0	5,6	39,6

Wszystkie testy wykonano na próbkach sześciennych o wymiarach 150x150x150 mm. W próbkach sześciennych przeznaczonych do wyznaczenia parametru K_{IIc}, wykonano w trakcie formowania dwie równoległe szczeliny na całej szerokości próbki o głębokości 60 mm. Analizie poddano po 6 próbek z każdej mieszanki dla każdego rodzaju badania w trzech okresach dojrzewania, tzn. po: 3, 7 oraz 28 dniach. We wszystkich mieszankach, których szczegółowe składy podano w tabeli 4 zachowano stały wskaźnik w/s=0,4. Badania wytrzymałościowe wykonano na prasie hydraulicznej Controls Advantest 9, natomiast odporności na pękanie na maszynie wytrzymałościowej MTS 809. Schemat badanej próbki przedstawiono na rysunku 3.

Tabela 4. Skład mieszanek betonowych [kg/m³]

Oznaczenie mieszanki	FA00+SF00	FA00+SF10	FA10+SF10	FA20+SF10
Składnik mieszanki [kg/m ³]				
Cement portlandzki CEM I 32,5R, Cementownia Ożarów	352	317	282	246
Krzemionkowy popiół lotny, Elektrociepłownia Puławy	0	0	35	70
Pył krzemionkowy – zagęszczony, Huta Łaziska	0	35	35	35
Woda – z wodociągu miejskiego	141	141	141	141
Piasek 0–2 mm	676	676	676	676
Żwir 2–8 mm	1205	1205	1205	1205

Rys. 3. Próbkę do badania odporności na pękanie przy II modelu pękania:

a) schemat statyczny i obciążenia,
b) i c) geometria z wymiarami

Na podstawie znajomości sił krytycznych, powodujących rozwój rys pierwotnych, odporność na pękanie K_{IIC} wyznaczono z poniższego wzoru, podanego przez Watkinsa [20].

$$K_{IIC} = \frac{5,11 F_Q}{2Bb} \sqrt{\pi a} \quad [2]$$

gdzie:

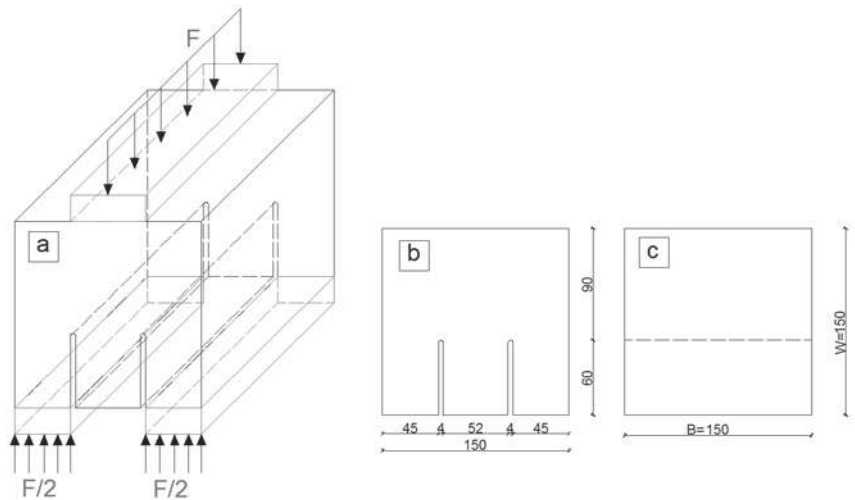
F_Q – siła krytyczna powodująca rozwój rys pierwotnej;
B – grubość próbki,
b – wysokość próbki powyżej rysy pierwotnej,
a – długość rysy pierwotnej.

4. Wyniki badań i ich analiza

Wyniki badań w formie graficznej przedstawiono na rysunkach 4–6.

Na podstawie otrzymanych wyników f_{cm} można stwierdzić, że największy wzrost 28-dniowej wytrzymałości na ściskanie w stosunku do trzydniowej był w betonie referencyjnym (o 96,1%). Betony z 30-procentowym dodatkiem pulcolan wykazały wzrost wytrzymałości na ściskanie o 77,6%. Przy tym samym porównaniu pozostałe mieszanki osiągnęły wzrost odpowiednio dla betonów FA10+SF10 i FA20+SF10 o 56,1% i 52,9%.

Większe różnice w uzyskanych wynikach wykazało badanie wytrzymałości na rozciąganie. Przy porównaniu f_{ctm} 3- i 28-dniowych największy przyrost zaobserwowano dla betonu FA20+SF10 (o 8,9%). W przypadku kompozytów z 10% dodatkiem SF i 20% dodatkiem obu składników wzrost był na poziomie 29,1% oraz 10,0%, natomiast największym przyrostem charakteryzował się beton referencyjny – o 74,6%. Beton bez dodatków osiągnął największy przyrost parametrów wytrzymałościowych w stosunku do pozostałych



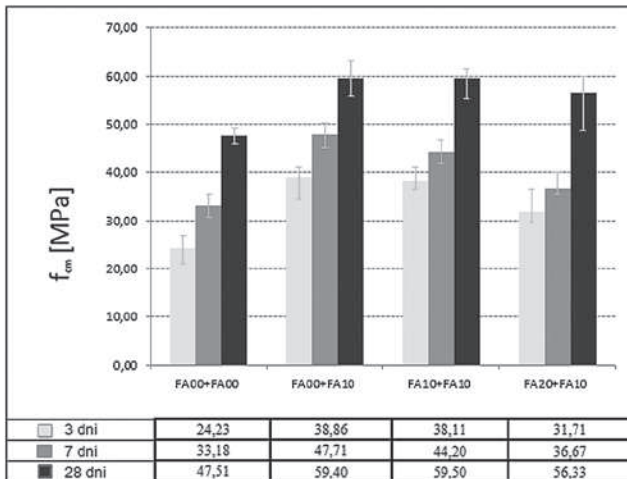
betonów ze względu na stosunkowo niskie wartości f_{cm} oraz f_{ct} po 72 godzinach dojrzewania w stosunku do betonów z dodatkiem mikrokrzemionki.

W betonach z dodatkami wartości K_{IIC} we wczesnym okresie dojrzewania osiągnęły wyższe wartości (od 3,78 MN/m^{3/2} do 4,82 MN/m^{3/2}). Zaobserwowano wzrost K_{IIC} betonu z różnym dodatkiem popiołów lotnych między 3 a 7 dniem dojrzewania, przy czym beton referencyjny oraz z dodatkiem tylko mikrokrzemionki wykazał się równomiernym przyrostem do 28 dnia. Najniższą odporność na pękanie miał beton referencyjny – w każdym okresie badawczym.

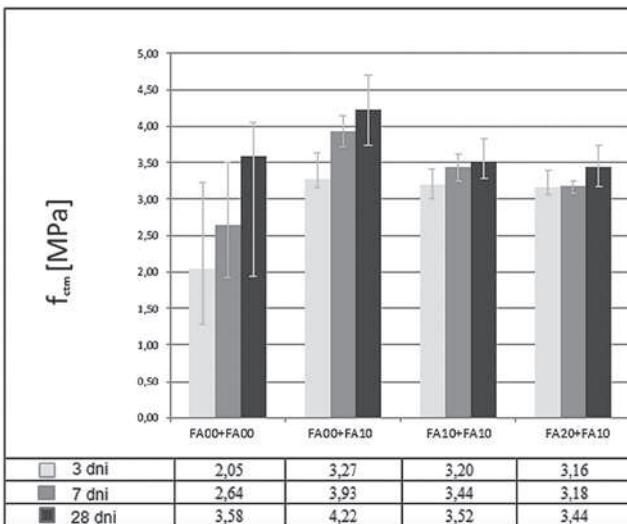
5. Podsumowanie

Na podstawie przeprowadzonych badań można wyprowadzić poniższe wnioski.

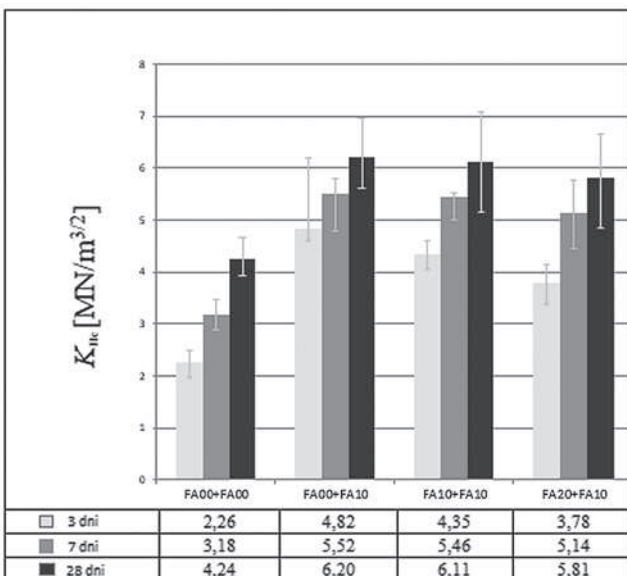
- Zastosowanie mikrokrzemionki do betonu poprawia jego parametry wytrzymałościowe, a także odporność na pękanie według II modelu pękania.
- Największą początkową wytrzymałość na ściskanie oraz na rozciąganie, a także K_{IIC} uzyskał beton z dodatkiem tylko mikrokrzemionki w każdym okresie badawczym.
- Wykorzystanie popiołów lotnych do betonu obniża jego parametry wytrzymałościowe, natomiast są one znacznie wyższe niż uzyskane dla betonu referencyjnego.
- Istnieje współzależność pomiędzy uzyskanymi wartościami wytrzymałościowymi f_{cm} i f_{ctm} oraz K_{IIC} .



Rys. 4. Wyniki wytrzymałości na ściskanie



Rys. 5. Wyniki wytrzymałości na rozciąganie



Rys. 6. Wyniki odporności na pękanie

- Stosując dodatki mineralne do betonu, takie jak mikrokrzemionka i krzemionkowe popioły lotne, w odpowiednich proporcjach, można uzyskać wyższe parametry wytrzymałościowe oraz wyższą odporność na pękanie materiału.
- Zastosowanie odpadów przemysłowych w betonie, takich jak krzemionkowe popioły lotne, czy mikrokrzemionka, poprawia jego analizowane właściwości. Dodatkowo zmniejsza się zużycie cementu oraz zaoszczędza złoża zasobów mineralnych.
- Substytucja spoiw cementowych aktywnymi pucolanowo odpadami przemysłowymi nosi wyraźne znamiona działań proekologicznych.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Liew K. M., Sojubi A. O., Zhang L.W., Green concrete: Prospects and challenges. *Construction and Building Materials* 156/2017
- [2] Ajdukiewicz A., Zielony beton w konstrukcjach – aspekty materiałowe i technologiczne, *Materiały Budowlane* 12/2012, str. 2–6
- [3] Ajdukiewicz A., Zielony beton w konstrukcjach – aspekty projektowe i przykłady, *Materiały Budowlane* 1/2013, str. 76–79
- [4] Golewski G. L., Green concrete composite incorporating fly ash with high strength and fracture toughness, *Journals of Cleaner Production* 172/2018
- [5] Runkiewicz L., Realizacja obiektów budowlanych zgodnie z zasadami zrównoważonego rozwoju, *Przegląd Budowlany* 2/2010, str. 17–23
- [6] Giergiczny Z., Dodatki mineralne – niezastąpione składniki współczesnego cementu i betonu, *Materiały Budowlane* 3/2009, str. 46–50
- [7] Kosior-Kazberuk M., Nowe dodatki mineralne do betonu, *Civil and Environmental Engineering (Budownictwo i Inżynieria Środowiska)* 2/2010, str. 47–55
- [8] Giergiczny Z., Małolepszy J., Szwabowski J., Śliwiński J., *Cementy z dodatkami mineralnymi w technologii betonów nowej generacji*, Instytut Śląski Sp. z o.o. w Opolu, Opole, 2002
- [9] Bołtryk M., Krupa A., Kompozyty cementowe z wypełniaczem organicznym modyfikowane domieszkami, *Materiały Budowlane* 10/2015, str. 46–48
- [10] Łukowski P., *Modyfikacja materiałowa betonu*, Stowarzyszenie Producentów Cementu, Kraków, 2016
- [11] Gołaszewski J., *Domieszki do betonu. Efekty działania, ocena i badania efektywności, stosowanie*, Politechnika Śląska, Gliwice, 2013
- [12] Gil D., Golewski G. L., Analiza odporności na pękanie betonów z dodatkiem popiołów lotnych i mikrokrzemionki, *Materiały budowlane* 11/2016, str. 116–117
- [13] Gil D., Golewski G. L., Badania odporności na pękanie i wielkości mikrorys w betonie ze zmiennym dodatkiem pyłu krzemionkowego i popiołów lotnych, *Materiały Budowlane* 10/2017, str. 12–14
- [14] Gil D., Golewski G. L., Wpływ dodatku pyłu krzemionkowego (SF) i krzemionkowych popiołów lotnych (FA) na krytyczny współczynnik intensywności naprężeń betonu, *Materiały Budowlane* 7/2017, str. 48–49
- [15] Giergiczny Z., Rola popiołów lotnych wapniowych i krzemionkowych w kształtowaniu właściwości współczesnych spoiw budowlanych i tworzyw cementowych. Seria: Inżynieria Lądowa. Monografia 325, Politechnika Krakowska, Kraków, 2006
- [16] Giergiczny Z., Gawlicki M. (eds.), *Popiół lotny jako aktywny składnik cementów i dodatek mineralny do betonu. Dni betonu. Tradycja i nowoczesność*, Wiśła, 11–13 października 2004
- [17] Kurdowski W., *Chemia cementu i betonu*, Stowarzyszenie Producentów Cementu, PWN, Kraków, Warszawa, 2010
- [18] Giergiczny Z., *Popiół lotny w składzie cementu i betonu*, Politechnika Śląska, Gliwice, 2013
- [19] Golewski G. L., Analiza procesów pękania w kompozytach betonowych z dodatkiem popiołów lotnych, *Materiały Budowlane*, 10/2011, str. 39–42
- [20] Watkins J., Fracture toughness test for soil-cement samples in mode II, *International Journal of Fracture*, 1983, tom 23, R135–R138