

# Wpływ zmiennego stosunku popiołu lotnego krzemionkowego do granulowanego żużla wielkopieczowego na właściwości cementu

## Streszczenie

Celem badań było ustalenie optymalnego stosunku krzemionkowego popiołu lotnego do granulowanego żużla wielkopieczowego w składzie cementu o niskiej zawartości klinkieru portlandzkiego. Niniejsza praca stanowi pierwszy etap badań określający możliwości zastosowania cementów wieloskładnikowych w zaprawach budowlanych w tym zapraw specjalnych. Zastosowane w badaniach dodatki główne w postaci mielonego granulowanego żużla wielkopieczowego oraz popiołu lotnego krzemionkowego charakteryzowały się zbliżonym składem ziarnowym wynoszącym poniżej 40 µm. Wprowadzono je do zapraw jako zamiennik cementu portlandzkiego w ilości 50 oraz 70% oraz ich mieszanin w ilościach nieprzekraczających 70%. W części eksperymentalnej scharakteryzowano główne składniki: cementu CEM I, krzemionkowego popiołu lotnego, mielonego granulowanego żużla wielkopieczowego pod względem fizyko-chemicznym. Wytworzono 7 cementów, które stanowiły podstawą do wykonania badań fizycznych cementów obejmujących właściwości wytrzymałościowe. Najbardziej optymalne wyniki uzyskano w przypadku mieszanek, gdzie cement CEM I zastąpiono granulowanym żużlem wielkopieczowym na poziomie 50 i 70 % oraz w przypadku cementów trójskładnikowych przy cemencie zawierającym mieszaninę 20% popiołu i 50% żużla.

## Słowa kluczowe:

cement, żużel granulowany, popiół lotny krzemionkowy, właściwości cementu, zaprawa specjalna

## Abstract

The aim of the research was to determine the optimal ratio of silica fly ash to granulated blast furnace slag in the composition of cement with a low Portland clinker content. This paper is the first stage of research determining the possibilities of using multi-component cements in construction mortars, including special mortars. The main additives used in the research in the form of ground granulated blast furnace slag and silica fly ash were characterized by a similar grain composition, amounting to less than 40 µm. They were introduced into mortars as a replacement for Portland cement in the amount of 50 and 70% and their mixtures in amounts not exceeding 70%. In the experimental part, the main components of: CEM I cement, silica fly ash, and ground granulated blast furnace slag in terms of physical and chemical characteristics were characterized. Seven cements were produced, which were the basis for the physical tests of cements, including the strength properties. The most optimal results were obtained for mixtures where CEM I cement was replaced with granulated blast furnace slag at the level of 50 and 70%, and for three-component cements with a cement containing a mixture of 20% ash and 50% slag.

## Keywords:

cement, granulated blast slag, fly silica ash, properties of cement, mortars

## 1. Wstęp

Celem zrównoważonego rozwoju jest dążenie w kierunku gospodarki efektywnie korzystającej z zasobów, a także konkurencyjnej i bardziej przyjaznej dla środowiska. Rosnące wymagania środowiskowe, które dotyczą przede wszystkim ograniczenia emisji pyłów i gazów cieplarnianych, dotyczą szczególnie przemysł cementowy. Produkcja klinkieru portlandzkiego wiąże się z emisją do atmosfery dużych ilości CO<sub>2</sub> powstającego podczas spalania paliw i rozkładu węgla wapnia [1]. Wyprodukowanie 1 tony klinkieru portlandzkiego, który stanowi nawet do 95% masy cementu portlandzkiego CEM I, wymaga zużycia około 1,7 tony surowców naturalnych i powoduje emisję około 800÷900 kg CO<sub>2</sub> [2, 3]. Ograniczenia tej emisji są możliwe poprzez zmiany w procesie wytwarzania cementu [4]. Należy do nich między innymi produkcja cementów wieloskładnikowych z dużą ilością dodatków mineralnych. Na liście celów znajdujących się w Mapie Drogowej 2050 CEMBUREAU jest między innymi obniżenie zawartości klinkieru w cemencie ze średniej 77% do 74% do roku 2030 i dalej do 65% do roku 2050 [5], co jest zgodne z założeniami Europejskiego Zielonego Ładu [6].

Możliwości znacznego obniżenia emisji CO<sub>2</sub> na jednostkę produktu finalnego – cementu realizowane są

poprzez wzrastającą w ostatnich latach skalę produkcji cementów wieloskładnikowych CEM II ÷ CEM V z dużym udziałem składników głównych, innych niż klinkier portlandzki. Stosowanie cementów o niskiej zawartości klinkieru portlandzkiego uwzględnia przesłanki ekologiczne, jak również względy technologiczne i ekonomiczne. Stosowanie dodatków mineralnych o potwierdzonych utajonych właściwościach hydraulicznych dla żużli wielkopieczowych oraz właściwościach pucolanowych w przypadku popiołów lotnych krzemionkowych umożliwia uzyskanie znacznie wyższych właściwości wytrzymałościowych, zwłaszcza po dłuższych okresach dojrzewania. Stosowanie więcej niż jednego dodatku mineralnego pozwala na połączenie właściwości poszczególnych składników głównych cementu, efektywne kształtowanie procesu twardnienia i otrzymanie cementów o interesujących właściwościach użytkowych, co pozwala na kształtowanie właściwości cementu jak i również betonu [7-10].

W przypadku produkcji cementów wieloskładnikowych CEM II ÷ CEM V stosowane są dodatki takie jak: żużel wielkopieczowy, popiół lotny krzemionkowy (lub wapienny), wapień oraz pył krzemionkowy. Norma PN-EN 197-1:2012 uwzględnia bardzo szeroką grupę cementów zawierających w swoim składzie granulowane żużel wielkopieczowy, popiół lotny krzemionkowy lub ich mieszaninę. Są to cementy hutnicze, pucolanowe lub portlandzkie wieloskładnikowe CEM II zawierające do 35% składników nieklinkierowych oraz cementy wieloskładnikowe CEM V z zawartością sięgającą do 80%.

Uwzględnienie działań na rzecz zrównoważonego rozwoju a także dążenie do udoskonalania cementów o bardziej użytecznych właściwościach powoduje powstawanie nowych regulacji dotyczących cementów. Wynikiem tego jest dalsze rozwijaniu asortymentu w zakresie cementów wieloskładnikowych. Omawiane cementy były przedmiotem badań, które wykazały wpływ wielkości frakcji ziarnowych popiołów lotnych oraz granulowanego żużla wielkopieczowego na reaktywność i wzrost wytrzymałości zapraw i betonów [13-18]. Wykazano, iż ziarna popiołu o wymiarach poniżej 45 µm mają istotny wpływ na narastanie wytrzymałości, zatem w miarę wzrostu mianości popiołów lotnych wzrasta ich pucolanowość [14]. Badania Tkaczewskiej i Małolepszego [13] wykazały dodatkowo, że popioły z trzeciej, najbardziej oddalonej od paleniska strefy odpylenia, charakteryzują się najwyższą aktywnością pucolanową, co jest uwarunkowane nie tylko rozdrobnieniem popiołów i wzajemnym stosunkiem faz krystalicznej i amorficznej, ale również strukturą fazy szklistej. W przypadku popiołów lotnych tej samej frakcji ziarnowej, o ich aktywności pucolanowej decyduje struktura fazy szklistej [13]. Podjęte badania określające wpływ wybranych frakcji ziarnowych granulowanego żużla wielkopieczowego na właściwości użytkowe cementów hutniczych wskazały natomiast, iż obecność w cemencie drobnej frakcji

Tabela 1. Skład chemiczny cementu portlandzkiego CEM I

Składnik	Zawartość [% wag.]
SiO <sub>2</sub>	20,12 ±0,20*
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2,88 ±0,20*
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	5,49 ±0,21*
CaO	63,91 ±0,30*
MgO	1,42 ±0,20*
SO <sub>3</sub>	3,26 ±0,14*
Na <sub>2</sub> O	0,19 ±0,02 *
K <sub>2</sub> O	0,86 ±0,04*
CaO <sub>wolne</sub>	1,50 ± 0,10*

\* Niepewność na podstawie testów statystycznych laboratorium dla k=2, p=95%

żuźła 0-10 μm powoduje przyspieszenie jego hydratacji w początkowym stadium, proporcjonalnie do jego udziału [18]. Rozkład wielkości cząstek jest bardzo istotny, również pod względem ekonomicznych aspektów projektowania mieszanek betonowych.

Celem badań było ustalenie optymalnego stosunku krzemionkowego popiołu lotnego do granulowanego żuźła wielkopieczowego w składzie cementu o niskiej zawartości klinkieru portlandzkiego. Jest to zagadnienie związane z najbardziej efektywnym wykorzystaniem tych surowców stosowanych jako osobny dodatek lub ich mieszanin. Przedmiotem badań były cementy z dodatkiem popiołu lotnego krzemionkowego V oraz granulowanego żuźła wielkopieczowego S. Badania wykonano dla cementów laboratoryjnych zawierających zmienną ilość tych dodatków. Wprowadzono je do zapraw jako zamiennik cementu portlandzkiego w ilości 50 oraz 70% oraz ich mieszanin w ilościach nieprzekraczających 70%.

## 2. Materiały do badań

### 2.1. Cement

Do badań zastosowano przemysłowy cement portlandzki CEM I niezawierający w swoim składzie składników drugorzędnych. Cement charakteryzował się składem fazowym zawierającym odpowiednio: 51% C3S, 18% C2S, 10% C3A i 9% C4AF. Skład chemiczny podano w tabeli 1, natomiast jego charakterystykę właściwości fizycznych i mechanicznych przedstawiono w tabeli 2. Cement portlandzki charakteryzował się wysoką wytrzymałością wczesną oraz wytrzymałością normową odpowiadającą klasie 52,5.

### 2.2. Popiół lotny krzemionkowy

Do badań wykorzystano podróbkę popiołu lotnego krzemionkowego z III sekcji odpylania elektrofiltrów (licząc od kotła). Do dalszych badań popiół lotny został dodatkowo rozfrakcjonowany w drodze odsiania (odrzućenia) grubych frakcji powyżej 40 μm w celu uzyskania frakcji 0-40 μm. Skład chemiczny przedstawiono w tabeli 3.

W przypadku popiołu obserwuje się rozkład ziaren z wartością modalną odpowiadającą wielkości ziarna ok. 3 μm. Udział frakcji poniżej 45 μm stanowił 100% objętości (rysunek 1).

Fazy krystaliczne popiołu lotnego stanowi głównie kwarc i mullit, a także hematyt oraz anhydryt (refleksy o małej intensywności) - rysunek 2. Zidentyfikowano także magnetyt - intensywność refleksów tej fazy wskazuje na śladowe jej ilości w badanych próbkach. W zakresie właściwości fizycznych uży-

Tabela 2. Właściwości fizyczne i wytrzymałościowe cementu portlandzkiego CEM I

Właściwość		Wynik
Powierzchnia właściwa (wg Blaine'a) [cm <sup>2</sup> /g]		5100
Konsystencja [%]		32
Początek czasu wiązania	[min]	195
Koniec czasu wiązania		230
Staość objętości [mm]		1,0
Wytrzymałość na ściskanie po 2 dniach	[MPa]	39,8
Wytrzymałość na ściskanie po 28 dniach		64,1

Tabela 3. Skład chemiczny popiołu lotnego

Składnik	Zawartość [% wag.]
SiO <sub>2</sub>	51,75 ±0,20*
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	27,80 ±0,20*
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	6,60 ±0,20*
CaO	3,10 ±0,20*
MgO	2,20 ±0,20*
TiO <sub>2</sub>	1,00 ±0,02*
SO <sub>3</sub>	0,56 ±0,14*
Na <sub>2</sub> O	1,25 ±0,02*
K <sub>2</sub> O	3,26 ±0,04*
Strata prażenia	1,75 ±0,08*
CaO <sub>wolne</sub>	0,00

\* Niepewność na podstawie testów statystycznych laboratorium dla k=2, p=95%

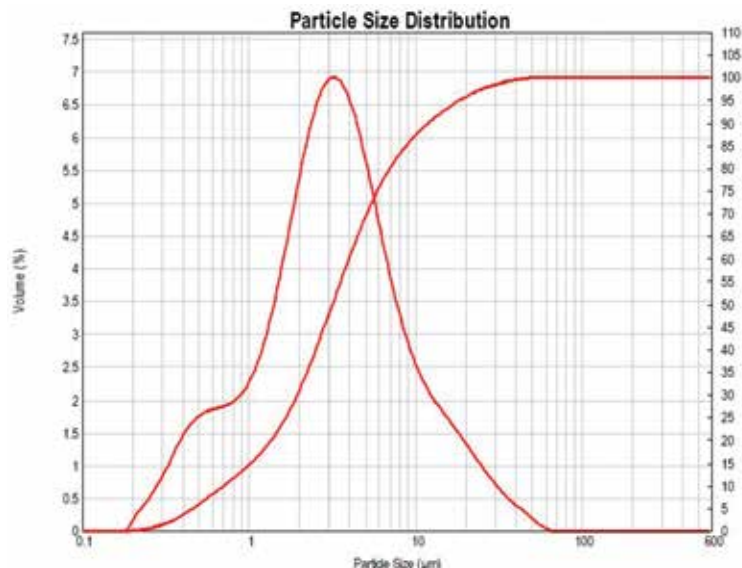
skano następujące wyniki: gęstość 2,431 g/cm<sup>3</sup> natomiast powierzchnia określona metodą Blaine'a 6 200 cm<sup>2</sup>/g. Istotnym aspektem jest tutaj struktura fazy szklistej frakcji z trzeciej, najbardziej oddalonej od paleniska strefy odpylania, charakteryzująca się najwyższą aktywnością pucolanową, co jest uwarunkowane nie tylko rozdrobnieniem popiołów i wzajemnym stosunkiem faz krystalicznej i amorficznej, ale również strukturą fazy szklistej. [13, 14]

### 2.3. Granulowany żuźel wielkopieczowy

Do badań zastosowano mielony granulowany żuźel wielkopieczowy (młyn pionowy misowo-rolowy), którego właściwości przedstawiono w tabeli 4. Wartości współczynników zasadowości i aktywności kwalifikują go do grupy materiałów zasadowych o średniej aktywności.

Granulowany żuźel wielkopieczowy został rozfrakcjonowany w klasyfikatorze powietrznym na frakcje ziarnowe: 0-40 μm oraz powyżej 40 μm. Do badań wybrano, analogicznie jak w przypadku

Rys. 1. Różniczkowy i skumulowany skład ziarnowy popiołu lotnego krzemionkowego z III sekcji odpylania – po procesie separacji



Rys. 2. Dyfraktogram popiołu lotnego krzemionkowego

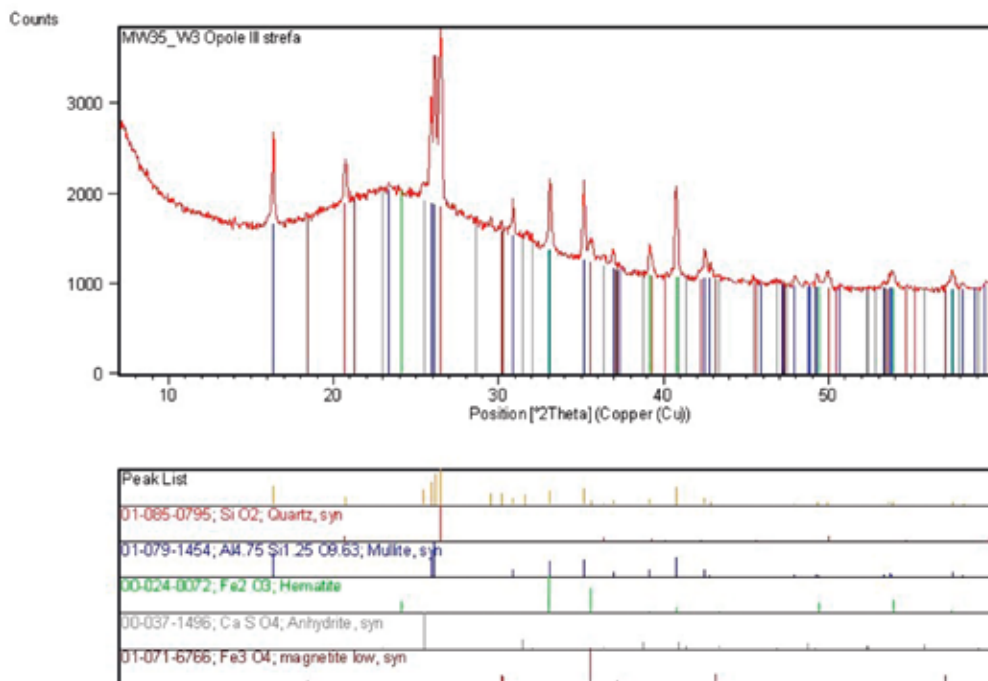


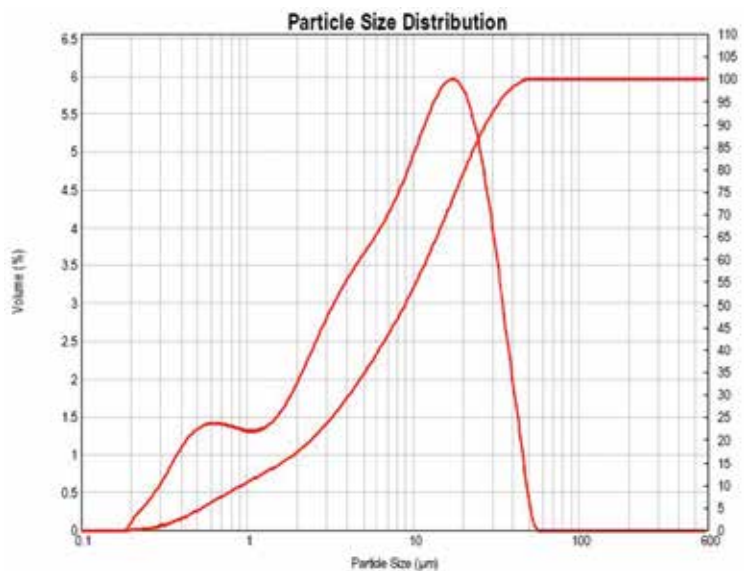
Tabela 4. Skład chemiczny granulowanego żużla wielkopieczowego

Składnik	Zawartość [%]
SiO <sub>2</sub>	39,48 ± 0,20*
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	7,82 ± 0,20*
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,57 ± 0,20*
CaO	41,56 ± 0,20*
MgO	9,06 ± 0,20*
Zawartość fazy szklistej	94
CaO+ MgO+ SiO <sub>2</sub> ≥ 67%	90,1
CaO+ MgO/SiO <sub>2</sub> > 1,0	1,3 [-]
Mz	1,07 [-]
Ma	1,48 [-]

\* Niepewność na podstawie testów statystycznych laboratorium dla k=2, p=95%

Rys. 3. Różniczkowy i skumulowany skład żużla po procesie separacji dla frakcji 0–40 μm. Dyfraktogram frakcji ziarnowej 0-40 μm wskazał obecność faz krystalicznych w postaci akermanitu oraz merwinitu (rysunek 4).

popiołu, frakcję 0–40 μm. Uzyskana frakcja charakteryzuje się dwumodalnym rozkładem ziaren z wartościami modalnymi odpowiadającymi wielkości ziaren ok. 0,6 oraz 11 μm (rysunek 3). Zastosowane w badaniach składniki główne charakteryzowały się składem ziarnowym o udziale frakcji <10 μm na poziomie 87% w przypad-



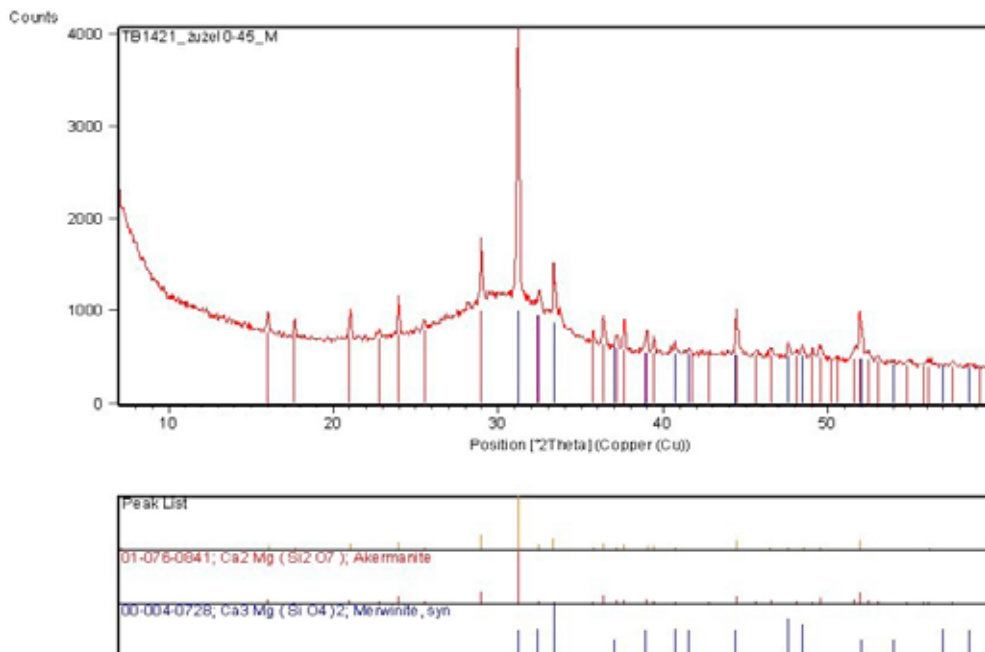
ku popiołu lotnego krzemionkowego, natomiast w przypadku granulowanego żużla wielkopieczowego frakcja ta stanowiła 53% (tabela 5).

### 3. Zakres badań

Ze składników opisanych w poprzednim punkcie do badań przygotowano osiem rodzajów cementów laboratoryjnych. Skład cementów dobrano w taki sposób, aby zawartość: żużla oraz popiołu lotnego determinowała w znacznym stopniu właściwości uzyskanego cementu (spoiwa). Wykonano cementy o zawartości popiołu lotnego lub żużla w ilości 50 i 70% wag. w składzie cementu. Ponadto wykonano cementy wieloskładnikowe o zmiennej zawartości tych składników głównych. Składy cementów podano w tabeli 6. Mieszanki do badań homogenizowano w pojemnikach plastikowych wypełnionych korkami gumowymi na mieszadle rolkowym przez ok. 30 minut. Przygotowane cementy zostały poddane badaniom normowym obejmującym oznaczenia czasu wiązania oraz badaniom wytrzymałościowym po 2, 7, 28 i 90 dniach, zgodnie z metodami zawartymi w normach, odpowiednio, PN-EN 196-3 [20] oraz PN-EN 196-1 [19]. Badania wytrzymałościowe przeprowadzono na beleczkach o wymiarach 25x25x110 mm, a następnie przeliczono wartości sił niszczących tak, aby uzyskane wyniki wytrzymałości odpowiadały wartościom dla beleczek normowych.

### 4. Wyniki badań i dyskusja

Badania wytrzymałościowe przeprowadzono na próbkach zapraw cementowych przy stosunku w/c wynoszącym 0,5. Wyniki badań w postaci zmian wytrzymałości na zginanie oraz na ściskanie przedstawiono na rysunku 5 i 6 oraz 7 i 8. Uzyskane wyniki wskazują na wyraźną zależność pomiędzy wynikami wytrzymałości na zginanie oraz na ściskanie. Należy podkreślić, że cement z dodatkami ma wolniejsze tempo narastania wytrzymałości, szczególnie w początkowym okresie hydratacji. Wytrzymałość w obu przypadkach jest w tym okresie tym większa, im mniejsza jest zawartość dodatku w cemencie. Daje się to zauwa-



Rys. 4 Dyfraktogram granulowanego żuźla wielkopieczowego

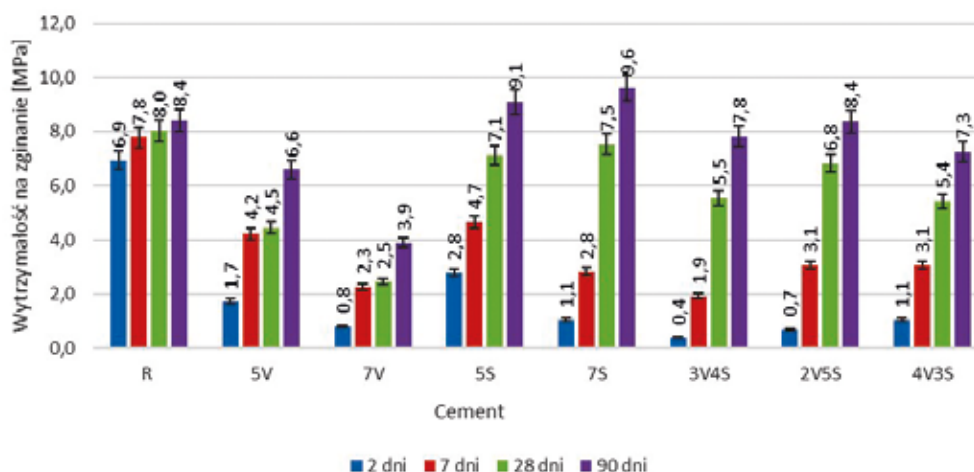
żyć szczególnie w przypadku popiołu, co wynika z reakcji pucolanowej. Po 90 dniach cementy zawierające wyłącznie ten dodatek osiągnęły, odpowiednio, 78 i 46% wartości wytrzymałości na zginanie cementu referencyjnego oraz 59 i 40% w przypadku wytrzymałości na ściskanie. W przypadku mieszanin, gdzie zastosowano dodatek popiołu i żuźla, uzyskano po 90 dniach wartości od 100 do 65% wytrzymałości cementu referencyjnego. Należy zwrócić uwagę na zbliżoną dynamikę narastania wytrzymałości dla cementów z dodatkiem żuźla oraz cementów trójskładnikowych mieszanin trójskładnikowych wraz ze wzrostem udziału granulowanego żuźla wielkopieczowego wzrastała wytrzymałość cementu. Dla cementów trójskładnikowych najbardziej optymalne wyniki uzyskano przy cemencie zawierającym mieszaninę 20% popiołu i 50% żuźla. W tym przypadku, jak i w przypadku mieszaniny Z7S (70% żuźla) stwierdzono również największą dynamikę narastania wytrzymałości w okresie 90 dni. Wytrzymałość normową (po 28 dniach dojrzewania) na poziomie klasy wytrzymałościowej 52,5 uzyskano wyłącznie dla cementu Z5S (50% żuźla), natomiast klasę 42,5 dla cementu Z7S (70% żuźla). W przypadku cementów z dodatkiem zarówno żuźla jak i popiołu

Tablica 5. Skład ziarnowy popiołu lotnego oraz granulowanego żuźla wielkopieczowego po separacji

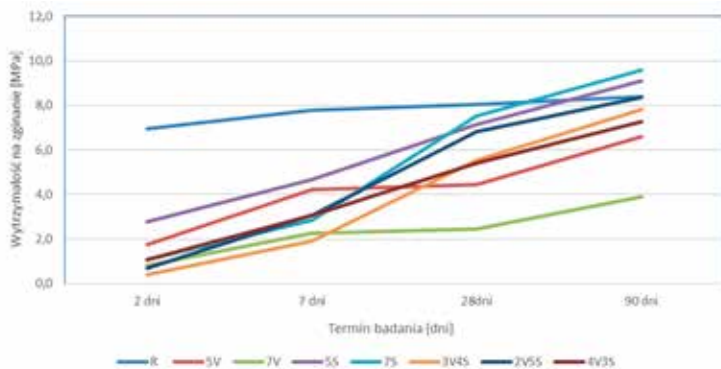
Frakcja [μm]	popiół lotny krzemionkowy – po separacji [% wag.]	mielony granulowany żuźel wielkopieczowy – po separacji [% wag.]
<10	87,13	53,31
10-40	12,55	46,93
>40	0,32	0,64

Tablica 6. Skład cementów z udziałem składników głównych.

Oznaczenie cementu	Udział poszczególnych składników cementu [% m. c.]		
	Cement CEM I	Popiół lotny krzemionkowy (V)	Granulowany żuźel wielkopieczowy (S)
R (cement referencyjny)	100	-	-
5V	50	50	-
7V	30	70	-
5S	50	-	50
7S	30	-	70
3V4S	30	30	40
2V5S	30	20	50
4V3S	30	40	30



Rys. 5. Wytrzymałość na zginanie cementów o zmiennym udziale dodatków głównych

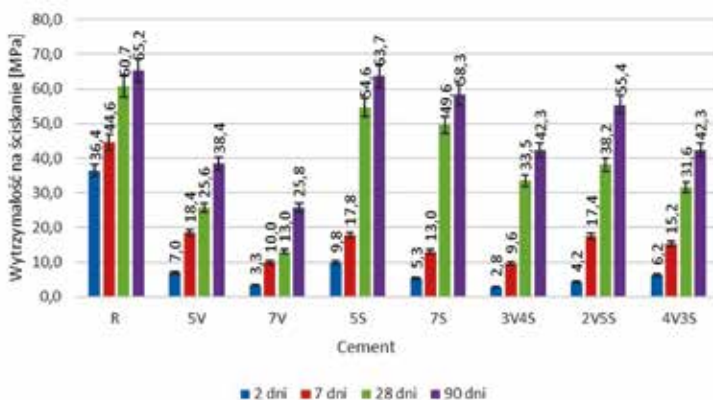


Rys. 6. Zmiany wytrzymałości na zginanie cementów o zmiennym udziale dodatków głównych

uzyskano we wszystkich przypadkach klasę wytrzymałościową 32,5. Biorąc pod uwagę wyniki wytrzymałości na zginanie dla mieszanek Z4 oraz Z5 (odpowiednio, 50% i 70% dodatku granulowanego żuźla wielkopieczowego) uzyskano wartości wyższe niż w przypadku CEM I o 8 i 14%.

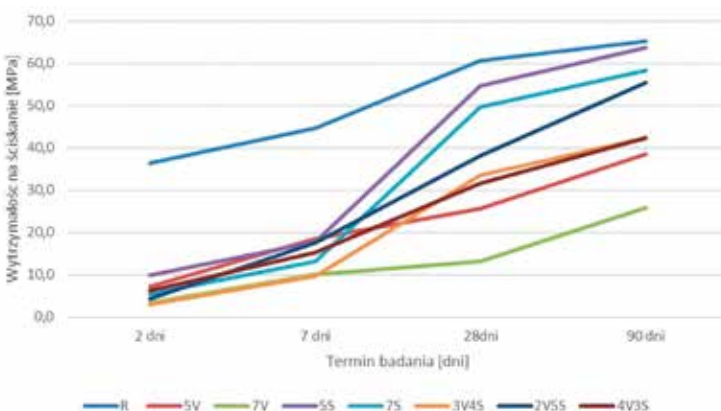
Na podstawie uzyskanych wyników badań przeprowadzono analizę efektywności zastosowania dodatku popiołu lotnego krzemionkowego oraz granulowanego żuźla wielkopieczowego na różnych poziomach zastąpienia cementu. Została określona jako stosunek różnicy uzyskanego wyniku dla cementu z dodatkami do cementu referen-

Rys. 7. Wytrzymałość na ściskanie cementów o zmiennym udziale dodatków głównych



Rys. 8. Zmiany wytrzymałości na ściskanie cementów o zmiennym udziale dodatków głównych

cyjnego. Najlepsze wyniki efektywności uzyskano w przypadku obu mieszanek, gdzie cement zastąpiono granulowanym żużlem wielkopieczowym na poziomie 50 i 70%. Najbardziej jest to wyraźne dla badań wytrzymałości na zginanie, gdzie w obu przypadkach po 90 dniach uzyskano wyniki przewyższające wartości dla cementu referencyjnego, odpowiednio o 8 i 14%. Natomiast cementy z dodatkiem popiołu lotnego uzyskały po 90 dniach



78 i 46% wartości cementu referencyjnego dla poziomów zastąpienia, odpowiednio, 50 i 70%. W przypadku cementów trójskładnikowych największą efektywność uzyskano dla cementu z dodatkiem 20% popiołu oraz 50% żuźla.

Analizę regresji pomiędzy wytrzymałością na zginanie oraz wytrzymałością na ściskanie a ilością dodatku popiołu i żuźla przedstawiono na rysunkach 9 i 10. Stwierdzono silny związek między wartościami uzyskanych wytrzymałości a ilością dodatku popiołu, na co wskazuje wartość współczynnika determinacji R-kwadrat 0,9472 oraz 0,9746. Ma to miejsce niezależnie od poziomu zastąpienia cementu, zarówno dla wytrzymałości na zginanie, jak i na ściskanie. W przypadku dodatku granulowanego żuźla wielkopieczowego dobrą korelację stwierdzono dla wyników wytrzymałości na zginanie (0,8959), a słabszą dla wyników dla ściskania (0,5568). Zaobserwowano tutaj zmianę zależności pomiędzy ilością dodatku a wartością wytrzymałości na ściskanie na poziomie zastąpienia 50%, co może wskazywać na optymalną ilość żuźla zarówno w układach dwuskładnikowych, jak i trójskładnikowych. Należy zaznaczyć, że analiza regresji została wykonana w odniesieniu do poszczególnych poziomów zastąpienia cementu, niezależnie od tego, czy popiół lotny i żużel wprowadzono do cementu jako pojedynczy składnik czy jako składnik mieszaniny. Na rysunku 11 przedstawiono początek oraz koniec wiązania cementów z udziałem granulowanego żuźla wielkopieczowego. Wprowadzenie od 20 do 40% tego dodatku spowodowało ponaddwukrotne wydłużenie zarówno początku, jak i końca wiązania. Wyraźnie daje się zauważyć zależność pomiędzy ilością wprowadzonego popiołu a czasem wiązania. Najdłuższy czas przekraczający 16 h wykazują cementy z dodatkiem 40% popiołu lotnego.

## 5. Podsumowanie

Cementy z dodatkiem granulowanego żuźla wielkopieczowego wykazują krótszy czas wiązania oraz szybsze tempo narastania wytrzymałości w porównaniu z mieszanekami, gdzie zastosowano popiół lotny. Zjawisko to jest proporcjonalne do poziomu zastąpienia cementu CEM I poprzez jeden jak i drugi nie klinkierowy dodatek główny. Uzyskane wyniki wytrzymałościowe związane są z dużą aktywnością zastosowanych dodatków mineralnych, w szczególności dotyczy to dobrania optymalnej proporcji popiołu do żuźla.

W oparciu o wyniki badań przeprowadzonych na zaprawach przygotowanych cementów można stwierdzić, iż najlepsze wyniki uzyskano w przypadku mieszanek, gdzie cement CEM I zastąpiono granulowanym żużlem wielkopieczowym na poziomie 50 i 70%. Zwraca tu uwagę wytrzymałość na zginanie, gdzie w obu przypadkach po 90 dniach uzyskano wyniki przewyższające wartości dla cementu referencyjnego, odpowiednio o 8 i 14%. Jest to niewątpliwie przesłanką do możliwości zmniejszenia stosowanego zbrojenia w przypadku zastosowania tego typu cementów. W przypadku cementów trójskładnikowych najbardziej optymalne wyniki uzyskano przy cemencie zawierającym mieszaninę 20% popiołu i 50% żuźla. W tym przypadku, jak i cementu zawierającego 70% żuźla, stwierdzono również największą dynamikę narastania wytrzymałości w okresie 90 dni.

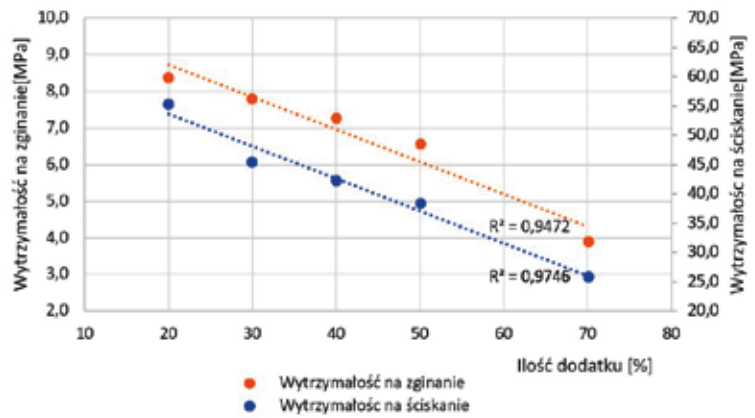
Przeprowadzone badania wykazały, że dynamika narastania wytrzymałości jest znacznie większa w przypadku zastosowania w mieszance również granulowanego żużla wielkopieczowego. Uzyskane wyniki badań wytrzymałości prawdopodobnie związane są z bardziej zawartą mikrostrukturą w późniejszym okresie narastania wytrzymałości stwardniałych zapraw cementowych niż w przypadku cementu CEM I bez dodatków, co będzie przedmiotem dalszych badań.

**mgr inż. Michał Wieczorek**  
**dr hab. inż. Paweł Pichniarczyk**  
**Sieć Badawcza Łukasiewicz**  
**Instytut Ceramiki i Materiałów Budowlanych**

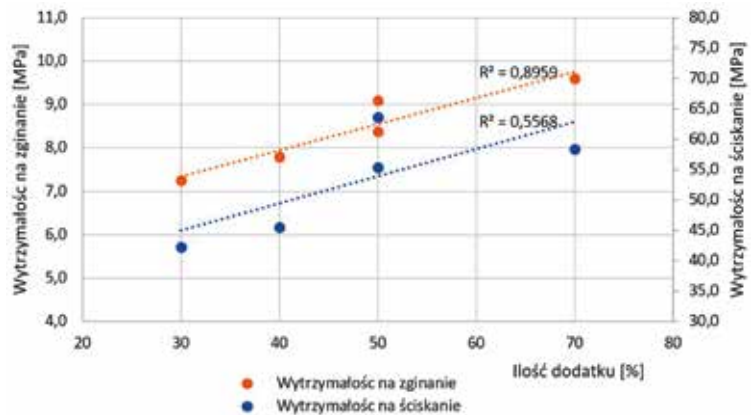
#### Literatura

1. Kurdowski W., *Chemia cementu i betonu*, Wyd. Polski Cement 2010
2. Czarnecki L., Kurdowski W., *Tendencje kształtujące przyszłość betonu*, Materiały Konferencyjne Dni Betonu 2006, Stowarzyszenie Producentów Cementu, Wista 2006, s. 47-64
3. Khan M. I., Lynsdale C. J., *Strength, permeability, and carbonation of high performance concrete*, *Cement and Concrete Research*, vol. 32 (2002), s. 123-131
4. Baran T., Garbacik A., Ostrowski M., Radelczuk H. *Rozwiązania produkcji klinkieru portlandzkiego o małej emisji CO<sub>2</sub>*. Materiały konferencyjne. Konferencja Dni Betonu, Wista 2016, s. 439-448
5. Gos P. *Mniej klinkieru w cemencie to mniejsza emisja CO<sub>2</sub>*. *Czasopismo „Budownictwo, Technologie, Architektura”*, 1/2021 str. 78.
6. *Spajamy Europejski Ład. Osiągnięcie neutralności emisyjnej w tróćchu wartości cementu i betonu do roku 2050*. Cembureau, wyd. Stowarzyszenie Producentów Cementu.
7. Lizarazo-Marriagaa J., Claisse P., Ganjian E., *Effect of steel slag and Portland Cement in the rate of hydration and strength of blast furnace slag pastes*, *Journal of Materials in Civil Engineering*, Volume 23, Issue 2 (2011), s. 153-160
8. Giergiczyński, Z., Garbacik A. *Efekt synergii dodatków mineralnych w składzie cementów wieloskładnikowych [w:]in:] Reologia w technologii betonu. XII Sympozjum Naukowo-Techniczne „Cement – właściwości i zastosowanie”*, Gliwice 2010, s. 5-23
9. Chłędziński, S., Garbacik, A. *Cementy wieloskładnikowe w budownictwie*. Kraków 2008, Wyd. Stowarzyszenia Producentów Cementu
10. Baran T., Drózd W., Pichniarczyk P., *The use of fly ash in cement and concrete manufacture*, *Cement Wapno Beton* 1/2012, s. 50-56.
11. Mueller Ch., Severins K., Hauer B. *New findings concerning the performance of cement containing limestone, granulated blast furnace slag and fly ash as main constituents* *Cement International* 3/2010 - Part 1 s. 81-86, 4/2010 - Part 2 s. 83-93
12. Kuterasińska J., Król A. *New types of low-carbon cements with reduced Portland clinker content as a result of ecological actions of cement industry towards sustainable development*, *Economic and Environmental Studies*, Vol. 16, No. 3 (39/2016), 403-419, September 2016
13. Tkaczewska E., Małolepszy J., *Właściwości szkła w krzemionkowych popiołach lotnych*, „Cement-Wapno-Beton”, 2009/3, 75
14. Tkaczewska E., *Wpływ właściwości fizykochemicznych krzemionkowych popiołów lotnych na proces hydratacji cementu*, Praca doktorska, AGH Kraków 2007

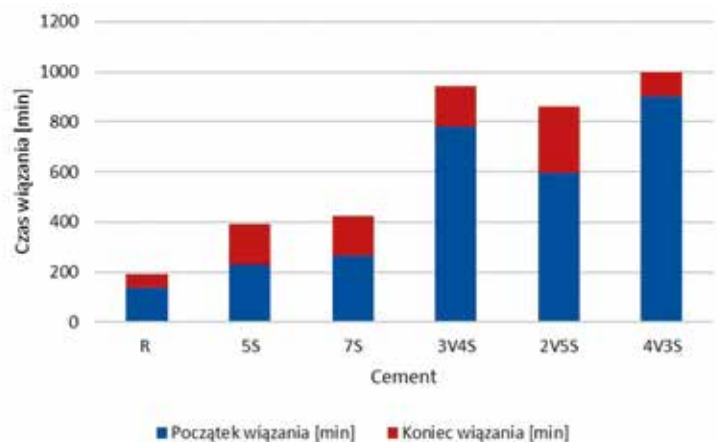
Rys. 9. Analiza regresji pomiędzy wytrzymałością na zginanie oraz wytrzymałością na ściskanie a ilością dodatku popiołu lotnego krzemionkowego



Rys. 10. Analiza regresji pomiędzy wytrzymałością na zginanie oraz wytrzymałością na ściskanie a ilością dodatku granulowanego żużla wielkopieczowego



Rys. 11. Początek oraz koniec wiązania cementów z dodatkiem granulowanego żużla wielkopieczowego



15. Slanička S, *The influence of fly ash fineness on the strength of concrete*, *Cement and Concrete Research* 21 (2-3) (1991) 285-296.
16. Monzo J., Paya J., Peris-Mora E., *A preliminary study of fly ash granulometric influence on mortar strength*, *Cement and Concrete Research* 24 (4) (1994) 791-796.
17. Erdoğdu K., Türker P., *Effects of fly ash particle size on strength of Portland cement fly ash mortars*, *Cement Concr. Res.* 28 (9) (1998) 1217-1222.
18. Oleškov M. *Wpływ uziarnienia granulowanego żużla wielkopieczowego na hydratację cementu hutniczego i jego właściwości*. *Materiały konferencyjne. Konferencja Dni Betonu, Wista 2018*, s. 651-664.