

Wpływ popiołu lotnego krzemionkowego na właściwości fizyczne i mechaniczne betonu niskoemisyjnego

Effect of silica fly ash on the physical and mechanical properties of low carbon concrete



Joanna Filusz

Mgr inż.

filuszjoanna@gmail.com
ORCID: 0009-0000-0882-7211



Magdalena Piechówka-Mielnik

Dr inż.

Politechnika Wrocławska, Katedra
Konstrukcji Budowlanych

magdalena.piechowka-mielnik@pwr.edu.pl
ORCID: 0000-0003-1172-9238

Streszczenie: W artykule przedstawiono wyniki badań dotyczących wpływu dodatku popiołu lotnego krzemionkowego na właściwości fizyczne i mechaniczne betonu. Analizowano mieszanki zawierające od 0% do 70% popiołu w stosunku do masy cementu, oceniając m.in. wodoszczelność, nasiąkliwość, wytrzymałość na ściskanie oraz gęstość. Uzyskane wyniki wskazują, że większy udział popiołu (50-70%) poprawia szczelność i trwałość betonu przy jednoczesnym ograniczeniu jego śladu węglowego. Dodatek ten efektywnie wspiera rozwój zrównoważonego budownictwa.

Słowa kluczowe: Beton niskoemisyjny; Popiół lotny krzemionkowy; Zrównoważone budownictwo; Ślad węglowy

Abstract: The article presents the results of research on the impact of silica fly ash additive on the physical and mechanical properties of concrete. Mixtures containing 0% to 70% ash by weight of cement were analysed, assessing, among other things, watertightness, water absorption, compressive strength and density. The results indicate that a higher proportion of ash (50-70%) improves the impermeability and durability of concrete while reducing its carbon footprint. This additive effectively supports the development of sustainable construction.

Keywords: Low-carbon concrete; Silica fly ash; Sustainable construction; Carbon footprints

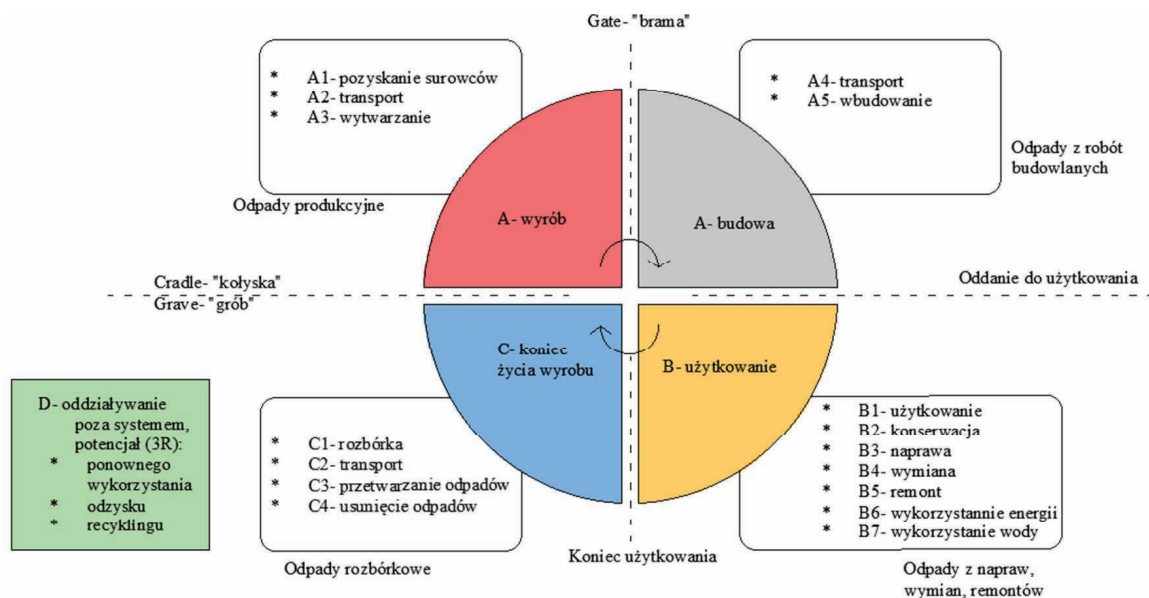
Wstęp

Możliwości i perspektywy wykorzystania betonu niskoemisyjnego powodują, że jest on coraz częściej stosowany w konstrukcjach masowych i hydrotechnicznych. Beton niskoemisyjny to nowoczesny kompozyt budowlany, który powstaje poprzez częściowe zastąpienie cementu portlandzkiego dodatkami mineralnymi, m.in. popiołem lotnym krzemionkowym. W kontekście ochrony środowiska, ten typ betonu odgrywa kluczową rolę w ograniczaniu emisji CO₂, która w dużej mierze pochodzi z energochłonnego procesu wypalania klinkieru cementowego.

Zastosowanie popiołów lotnych przyczynia się do poprawy szczelno-

ści, trwałości oraz parametrów mechanicznych betonu, przy jednoczesnym obniżeniu śladu węglowego. W badaniach wskazano, że zastąpienie cementu popiołem może obniżyć emisję CO₂ nawet o 21–25 % w stosunku do tradycyjnych mieszanek [1, 2]. Takie podejście wpisuje się w cele zrównoważonego rozwoju i jest odpowiedzią na rosnące wymagania środowiskowe stawiane budownictwu [3, 4]. Beton niskoemisyjny oferuje szereg korzyści, takich jak niższe ciepło hydratacji, lepsza szczelność i długoterminowa wytrzymałość. Zrównoważone projektowanie mieszanki betonowej zakłada użycie cementów o obniżonej zawartości klinkieru, dodatków pochodzenia odpadowego oraz lokalnych surowców,

co zmniejsza koszty transportu i ślad węglowy. Ponadto, preferuje się betony trwałe i odporne, które wydłużają cykl życia konstrukcji i ograniczają konieczność napraw [5]. Produkcja cementu jest jednym z głównych źródeł emisji CO₂ w branży budowlanej – aż 90 % emisji pochodzi z wytwarzania klinkieru i spalania paliw w piecach obrotowych [6]. Zastosowanie nowoczesnych technologii, takich jak wypalanie w niższych temperaturach, zamiana paliw konwencjonalnych na alternatywne czy ograniczenie udziału klinkieru, pozwala znacznie zmniejszyć emisyjność procesu [7, 8]. Ważną rolę odgrywa także optymalizacja składu mieszanki betonowej. Redukcja ilości cementu, zwiększenie udziału dodatków mineralnych oraz



1. Podział na etapy cyklu życia wyrobów budowlanych [6]

zastosowanie superplastyfikatorów umożliwiają poprawę właściwości betonu bez zwiększania jego śladu środowiskowego [9]. Jednym z kluczowych elementów strategii niskoemisyjnej jest podejście cyklu życia (LCA), które pozwala ocenić wpływ materiału budowlanego na środowisko w całym okresie jego użytkowania [10], rys. 1. W przemyśle cementowym coraz większe znaczenie ma gospodarka o obiegu zamkniętym, polegająca na wtórnym wykorzystywaniu produktów odpadowych, takich jak popiół lotny krzemionkowy. Dzięki temu możliwe jest ograniczenie zużycia surowców naturalnych, emisji CO₂ i kosztów produkcji [11].

Badania

W ramach badań wykonano pięć mieszanek betonowych, do których dodawano popiół lotny krzemionkowy (V) w różnych ilościach w sto-

sunku do masy cementu, aby ocenić jego wpływ na właściwości betonu. Mieszanki wykonano z zastosowaniem cementu portlandzkiego CEM I 42,5R oraz kruszywa żwirowego o frakcji 0/2 i 8/16. W każdej mieszance zastosowano domieszkę upłynniającą FM 6 firmy SIKA w ilości 3% m.c., natomiast współczynnik w/c lub w/s wynosił 0,4 dla wszystkich wykonanych mieszanek betonowych. Składy mieszanek są następujące:

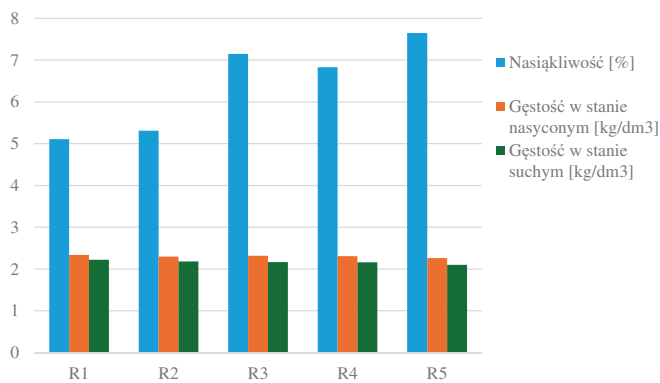
- R1 – próbka referencyjna, bez dodatku popiołu lotnego krzemionkowego
- R2 - +10% V m.c.
- R3 - +30% V m.c.
- R4 - +50% V m.c.
- R5 - +70% V m.c.

Dla każdej mieszanki wykonano około 6 próbek o boku 100 mm do badań wytrzymałości na ściskanie i nasiąkliwości oraz po 3 próbki o boku 150 mm do badania wodoszczelności.

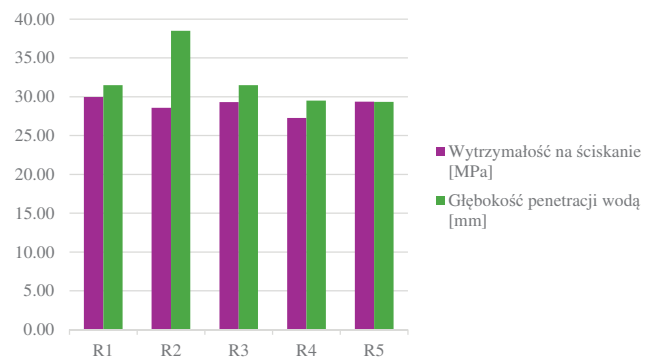
Próbki formowano poprzez układanie dwóch warstw mieszanki, z których każdą zagęszczano osobno. Konsystencję mieszanek określono metodą opadu stożka. Po 24 godzinach próbki rozformowano i umieszczono w wodzie na 27 dni, gdzie dojrzewały w warunkach laboratoryjnych. Następnie wykonano badanie wytrzymałości na ściskanie oraz zważono kolejne próbki w stanie pełnego nasycenia wodą. Próbki przeznaczone do badania nasiąkliwości umieszczono w suszarkach i suszono w temperaturze 105±5°C do stałej masy. Próbki przeznaczone do badania wodoszczelności pozostawiono na 14 dni do wysuszenia w stanie powietrzno-suchym w temperaturze otoczenia. Następnie odpowiednio je przygotowano, skuwając górną powierzchnię i pokrywając ściany boczne warstwą ochronną zabezpieczającą przed wnikiem wody. Gotowe próbki umieszczono w maszynie badawczej i poddano wstępnemu ciśnieniu 0,2 MPa. Ciśnienie zwiększano, o kolejne 0,2 MPa co 24 godziny, aż do osiągnięcia poziomu 0,8 MPa. W trakcie badania obserwowano próbki pod kątem przenikania wody przed osiągnięciem ostatecznego poziomu ciśnienia.

Tab. 1. Uzyskane wyniki badań

Próbka	Rozplływ mieszanki [mm]	Gęstość objętościowa stwardniałego betonu w stanie:		Nasiąkliwość [%]	Wytrzymałość na ściskanie [MPa]	Głębokość penetracji wodą [mm]
		nasycenym [kg/dm ³]	suchym [kg/dm ³]			
R1	45	2.34	2.22	5.11	29.95	32
R2	139	2.30	2.18	5.31	28.56	39
R3	210	2.32	2.16	7.15	29.30	32
R4	93	2.31	2.16	6.83	27.26	30
R5	143	2.26	2.10	7.65	29.36	29



2. Otrzymane wyniki dla badania gęstości objętościowych stwardniałego betonu oraz nasiąkliwości



3. Otrzymane wyniki dla badania wytrzymałości na ściskanie oraz wodoszczelności

Wyniki badań oraz ich analiza

Otrzymane wyniki badań zestawiono w tabeli 1. Można zaobserwować upłynnienie konsystencji wraz ze wzrostem ilości popiołu lotnego krzemionkowego do poziomu 30% m.c. Zastosowanie większej ilości dodatku (50% oraz 70%) powodowało dalsze doszczelnienie struktury betonu, czyniąc go bardziej zwartym. Wynika to ze zwiększonej ilości materiałów o drobnej frakcji. Podobne wyniki odnotowano również w artykule [12]. Gęstość objętościowa betonu w stanie nasyconym dla wszystkich mieszanek betonowych malała w porównaniu z gęstością mieszanki referencyjnej, bez dodatku. Popiół uszczelnił strukturę betonu, co spowodowało zmniejszenie ilości porów. Dla gęstości objętościowej w stanie suchym zaobserwowano podobną tendencję spadkową wraz ze wzrostem udziału popiołu w składzie. Zawartość popiołu lotnego krzemionkowego miała również wpływ na czas suszenia próbek – jego wzrost wydłużał proces suszenia od 7 dni dla mieszanki R1 do 11 dni dla mieszanki R5.

Nasiąkliwość próbek wzrastała do poziomu 30% dodatku mineralnego, natomiast przy większych ilościach stabilizowała się. Bezpośredni wpływ na nasiąkliwość ma różnica gęstości stwardniałego betonu, gdzie większa różnica pomiędzy stanem nasyconym a suchym, tym wyższa nasiąkliwość. Wyniki dotyczące gęstości objętościowej oraz nasiąkliwości

przedstawiono na rysunku 2.

Zniszczenie próbek w badaniu wytrzymałości na ściskanie miało charakter stożkowo-pryzmatyczny, a przekątne pęknięcia prowadziły do powstania dwóch lub większej liczby odłamków w kształcie klina. Najwyższe wartości wytrzymałości uzyskano dla próbek R1, R3 oraz R5, natomiast spadek odnotowano w przypadku R2 i R4. Próbkę bez dodatku popiołu lotnego krzemionkowego wykazywały nieco wyższe wytrzymałości po 28 dniach, jednak różnica w wynikach była niewielka i wynosiła około 2,7 MPa. Penetracja wody w próbkach wynosiła 29–39 mm. Dodatek popiołu lotnego krzemionkowego powyżej 50% zredukował głębokość wnikania wody, natomiast największą wartość uzyskano przy udziale dodatku mineralnego w ilości 10% masy cementu. Wyniki te zilustrowano na rysunku 3 wraz z wartościami wytrzymałości na ściskanie. Wykazuje to na zoptymalizowaną strukturę porów oraz lepsze właściwości reologiczne betonu przy wysokich zawartościach popiołu lotnego krzemionkowego.

Wnioski

Dodatek popiołu lotnego krzemionkowego stosowany w mieszankach betonowych jest jednym z najsukcesowniejzych sposobów redukcji śladu węglowego i uzyskania betonu niskoemisyjnego. Popiół lotny krzemionkowy, będący produktem ubocznym spalania węgla kamien-

nego, pełni funkcję składnika pucolanowego betonu i może częściowo zastępować klinkier cementowy, co bezpośrednio przyczynia się do zmniejszenia całkowitej emisyjności mieszanki. Z punktu widzenia zrównoważonego budownictwa dodatek ten stanowi korzystne rozwiązanie technologiczne - pozwala zagospodarować odpad przemysłowy w sposób zgodny z ideą gospodarki o obiegu zamkniętym. W rezultacie możliwe jest uzyskanie betonu o niższym śladzie węglowym przy zachowaniu, a nawet poprawie, długoterminowej trwałości elementów betonowych.

Podsumowując uzyskane wyniki:

- Zastosowanie popiołów lotnych wpływa na konsystencję mieszanek betonowych, przy czym większe ilości popiołu lotnego krzemionkowego skutkują zmniejszeniem klasy konsystencji. Dzięki drobniejszej frakcji uzyskuje się konsystencję spoiwą, a wydzielanie mleczka cementowego jest ograniczone [7, 13]. Efekt ten wynika ze szczelnego wypełnienia struktury mieszanki drobnymi frakcjami popiołu.
- Zastosowanie popiołu w składzie betonu przyczynia się do uszczelnienia jego struktury poprzez zmniejszenie ilości porów, a także do obniżenia masy mieszanki, co przekłada się na mniejsze gęstości objętościowe w betonach zawierających ilość popiołu lotnego krzemionkowego.
- Różnice w gęstościach stward-

niałego betonu w stanie i suchym mają bezpośredni wpływ na nasiąkliwość – im większa różnica gęstości, tym większa nasiąkliwość [14].

- Zawartość popiołu lotnego krzemionkowego w mieszance zwiększa jego nasiąkliwość betonu [2].
- Wytrzymałość na ściskanie betonów z dodatkiem popiołu lotnego krzemionkowego nieznacznie różni się od betonów referencyjnych; średnie wartości po 28 dniach wynoszą 27,3-29,9 MPa. Podobne obserwacje odnotowano w literaturze, gdzie beton z dodatkiem popiołu wykazywał nieco niższe wartości wytrzymałości w porównaniu z betonem referencyjnym [12].
- Próbkę osiągnęły klasę wodoszczelności W8 przy maksymalnej penetracji wody 39 mm. Optymalny zakres dodatku popiołu lotnego, zapewniający równowagę pomiędzy wodoszczelnością a wytrzymałością na ściskanie, wynosi 50 – 70 %.
- Większy udział dodatku mineralnego może poprawić szczelność betonu bez utraty jego wytrzymałości na ściskanie oraz stanowić barierę na przenikanie cieczy agresywnych [12]. Jest to związane z uszczelnieniem matrycy cementowej przez drobne frakcje popiołu.

Betony z dodatkiem mineralnym, jakim jest popiół lotny krzemionkowy, znajdują zastosowanie w środowiskach agresywnych i narażonych na działanie wody. Wykorzystanie tego dodatku jest jednocześnie skutecznym sposobem na redukcję śladu węglowego betonu, ponieważ popiół stanowi produkt uboczny spalania węgla kamiennego, mogący zastąpić klinkier cementowy i zmniejszyć emisyjność mieszanki. Dla zrównoważonego budownictwa jest to rozwiązanie korzystne technolo-

gicznie - pozwala wykorzystać odpad przemysłowy. W rezultacie możliwe jest uzyskanie betonu o niższej emisyjności CO₂ przy zachowaniu lub poprawie trwałości elementów betonowych. ◀

Materiały źródłowe

- [1] „Beton niskoemisyjny- perspektywy rozwoju” dr inż. Maciej Gruszczyński, Materiały Budowlane 11/2023 strona 55
- [2] „Wpływ stosowania cementów niskoemisyjnych na właściwości betonu oraz trwałość drobnomiarowych dwuwarstwowych elementów wibroprasowanych” mgr inż. Michał Oleksik, mgr inż. Arkadiusz Ignerowicz, mgr inż. Arkadiusz Fornal, dr inż. Maciej Batog, mgr inż. Jakub Baklarz, mgr inż. Wioletta Wojtkiewicz, Dni Betonu 2023 strony 1033-1047
- [3] „Możliwości zastosowania nowych rodzajów cementów wieloskładnikowych CEM II/C-M (S-V) oraz CEM VI (S-V) w budownictwie” mgr inż. Michał Tałaj, mgr inż. Karol Wandoch, Materiały Budowlane 10/2018 strony 10-12
- [4] „Korzyści ekologiczne i ekonomiczne z wykorzystania w betonie krzemionkowych popiołów lotnych i mikrokrzemionki zagęszczanej” mgr inż. Damian Marek Gil, dr hab. inż. Grzegorz Ludwik Golewski, prof. PL, Materiały Budowlane 10/2018 strony 22-24
- [5] „Wybór receptury mieszanki betonowej w aspekcie trzech obszarów formułowania celu” mgr inż. Wioletta Dobaczewska, dr hab. inż. Karol Prałat, dr inż. Wojciech Kubissa, mgr inż. Tomasz Dobaczewski, Przegląd Budowlany 7-8/2023 strony 137-142
- [6] „Zrównoważony rozwój budownictwa w świetle wyzwań klimatycznych” dr inż. Robert Geryło, prof. dr hab. Inż. Andrzej Garbacz,

Materiały Budowlane 9/2022 strony 15-18

- [7] „Badanie wybranych właściwości betonu z popiołem lotnym ze współspalania biomasy drzewnej i węgla kamiennego” dr inż. Bogdan Langier, dr inż. Jacek Halbiński, dr hab. inż. Maciej Major, prof. PCz, dr hab. inż. Izabela Major, Materiały Budowlane 12/2022 strony 131-135
- [8] „Wpływ składu mieszanek betonowych nowej generacji na ich ślad węglowy” dr inż. Daniel Wałach, Materiały Budowlane 6/2023 strony 28-31
- [9] „Problem wodożądności mieszanki betonowej” inż. Edmund Horała, Przegląd Budowlany 11-12/2021 strony 44-45
- [10] „Cement i beton- niskoemisyjne materiały budowlane” Krystyna Wiśniewska, Materiały Budowlane 5/2019 strony 82-83
- [11] „Wykorzystanie odpadów w cementowni a polityka klimatyczna” dr inż. Bożena Środa, Materiały Budowlane 12/2021 strony 28-29
- [12] „Ocena wpływu dodatku popiołu lotnego na szczelność i migrację jonów chlorkowych w betonie na bazie cementu hutniczego CEM IIIA 42,5N” mgr inż. Jacek Zycho-wicz, dr inż. Anna Szcześniak, prof. dr hab. inż. Adam Stolarski, Materiały Budowlane 12/2016 strony 13-17
- [13] „Betony z dużą zawartością dodatków mineralnych, wyróżniające się małą emisją CO₂ w procesie produkcji ich składników” dr inż. Mikołaj Ostrowski, dr inż. Tomasz Baran, dr hab. inż. Paweł Pichniarczyk, Dni Betonu 2021 strony 625-635
- [14] „Popiół lotny w składzie cementu i betonu” Z. Giergiczny