

dr inż. Grzegorz Bajorek, Prof. PRz

Politechnika Rzeszowska

Centrum Technologiczne Budownictwa Instytut Badań i Certyfikacji

ORCID 000-0001-5312-8866

inż. Maciej Barć

Centrum Technologiczne Budownictwa Instytut Badań i Certyfikacji

ORCID 000-0002-5921-4930

mgr inż. Sabina Warchoń

Centrum Technologiczne Budownictwa Instytut Badań i Certyfikacji

ORCID 0009-0001-9841-2606

mgr inż. Łukasz Kosturkiewicz

Stowarzyszenie Przemysłu Wapienniczego

ORCID 000-0003-2174-8256

dr hab. inż. Izabela Skrzypczak

Politechnika Rzeszowska

ORCID 0000-0003-0978-3040

dr inż. Marta Kiernia-Hnat

Centrum Technologiczne Budownictwa Instytut Badań i Certyfikacji

dr inż. Wanda Kokoszka

Politechnika Rzeszowska

ORCID:0000-0003-0486-9881

Analiza wpływu mączek wapiennych stosowanych poza branżą betonową na wybrane właściwości mieszanek i betonów zwykłych – studium przypadku dwuetapowego programu badawczego

Analysis of the impact of limestone powders used outside the concrete industry on selected properties of mixtures and ordinary concretes – a case study of a two-stage research program

Streszczenie

Celem artykułu było zbadanie możliwości wykorzystania wybranych mączek wapiennych dotychczas stosowanych głównie poza branżą betonową, jako częściowego lub całkowitego zamiennika popiołu lotnego w recepturach betonu zwykłego. Praca oparta jest na dwuetapowym programie badawczym przeprowadzonym w warunkach jednego węzła betoniarskiego w którym przeanalizowano wpływ ośmiu różnych mączek wapiennych na właściwości mieszanki betonowej oraz betonu stwardniałego. Badania objęły wykonanie 55 zarobów na podstawie których przeprowadzono ocenę konsystencji, urabialności, wytrzymałości na ściskanie oraz wybranych cech trwałościowych, przy uwzględnieniu zmiennego poziomu zastąpienia popiołu lotnego (50% i 100%). Wyniki wskazują na istotne różnice pomiędzy analizowanymi mączkami, zależne m.in. od ich składu chemicznego,

uziarnienia oraz pochodzenia przemysłowego. Wyniki potwierdzają możliwość zastosowania mączek wapiennych jako składnika receptur betonu, przy zachowaniu wymaganych właściwości użytkowych. Artykuł wskazuje potencjał technologiczny i środowiskowy tych dodatków w kontekście redukcji śladu węglowego i zgodności z założeniami strategii „5C”. Praca ma charakter aplikacyjny i stanowi punkt wyjścia do dalszych badań mikrostrukturalnych (SEM, MIP) oraz analiz ekonomicznych i środowiskowych (m.in. ślad węglowy).

Abstract

The aim of the article was to investigate the potential use of selected limestone powders, previously applied mainly outside the concrete industry, as partial or complete replacements for fly ash in ordinary concrete mixtures designs. The study is based on a two-stage research program conducted at a single concrete batching plant, where the influence of eight different limestone powders on the properties of fresh and hardened concrete was analyzed. The experimental campaign included the production of 55 concrete batches, on the basis of which workability, consistency, compressive strength, and selected durability characteristics were assessed, considering two levels of fly ash replacement (50% and 100%). The results revealed significant differences between the tested powders, depending on their chemical composition, particle size distribution, and industrial origin. The findings confirm the feasibility of using limestone powders as components in concrete formulations while maintaining the required performance criteria. The article highlights the technological and environmental potential of these additives, particularly in terms of carbon footprint reduction and compliance with the "5C" strategy. This is an application-oriented study and provides a foundation for further microstructural investigations (SEM, MIP) as well as economic and environmental analyses (e.g., carbon footprint assessment).

1. Wstęp

Produkcja cementów i betonu jest istotnym źródłem emisji CO₂ i zużycia surowców, co w obliczu wyzwań klimatycznych i ograniczonych zasobów naturalnych wymaga zmian technologicznych. Coraz większe znaczenie zyskują cementy kompozytowe (w których znaczną część klinkieru zastępuje się materiałami pucolanowymi lub prawie obojętnymi np. popiołem lotnym lub mączką wapienną) [1]. Jednocześnie obserwuje się malejącą dostępność popiołu lotnego (w związku m.in. z redukcją spalania węgla), co stwarza potrzebę poszukiwania alternatywnych dodatków mineralnych [2, 3]. W tej sytuacji mączka wapienna stanowi korzystny materiał, ponieważ jest ubocznym produktem mielenia skał wapiennych, łatwo dostępnym w dużych ilościach i po atrakcyjnej cenie [2, 3]. Jej stosowanie może poprawić strukturę porów i gęstość betonu, zwiększając szczelność oraz wytrzymałość mechaniczną konstrukcji [4]. Przykładowo badania nad betonem ultrawytrzymałym (UHPC) z udziałem mączki wapiennej pokazują, że nawet bardzo wysoki udział tego dodatku pozwala uzyskać beton o wysokich parametrach technicznych przy jednoczesnym zmniejszeniu śladu węglowego i kosztów produkcji [5]. Zauważono ponadto, że dodatek mączki wapiennej poprawia uplastycznianie mieszanki i przyspiesza hydratację cementu, co sprzyja przyrostowi wytrzymałości i trwałości betonu [4].

Mechanizmy działania mączki wapiennej w betonie są dobrze udokumentowane. Drobne cząstki CaCO_3 pełnią funkcję wypełniacza i mikroagregatu, wypełniają pory między ziarnami cementu, poprawiając stopień upakowania i zmniejszając porowatość [6]. Ponadto mączka wapienna działa jako „nukleator”, czyli zarodki krystalizacji produktów hydratacji (głównie CH oraz C–S–H), co przyspiesza proces wiązania cementu [1, 2]. Część CaCO_3 może wchodzić w reakcje wtórne: modyfikując hydratację faz wodorotlenkowych i glinianów, prowadząc do tworzenia dodatkowych faz karboaluminianowych wapnia i karbo-silikatowych [1, 2]. W efekcie zastąpienie do 5–10% cementu mączką wapienną prowadzi do bardziej jednorodnej i gęstszej struktury matrycy cementowej, co w praktyce przekłada się na zwiększoną trwałość betonu [6]. Co istotne, badania Giergicznego i Piechówki [7] wykazały, że stopień zmielenia mączki wapiennej oraz jej udział procentowy wpływają istotnie na właściwości reologiczne zaczynu cementowego i zapraw, w tym granicę płynięcia oraz lepkość plastyczną. Wyniki te potwierdzają konieczność indywidualnej oceny materiału przed jego wprowadzeniem do receptur betonowych, szczególnie w kontekście współdziałania z domieszkami chemicznymi oraz dodatkami aktywnymi. W przypadku stosowania mączek wapiennych, należy pamiętać również o efekcie rozcieńczenia: przy zbyt dużym udziale mączki obniża się udział reaktywnych produktów hydratacji i tym samym spada wytrzymałość początkowa. Współdziałanie mączki wapiennej z innymi dodatkami (np. popiołem lotnym) jest obiecujące, mączka podnosi wytrzymałość wczesną przez wspomniany efekt przyspieszenia hydratacji, a popiół odpowiada za wzrost wytrzymałości w późniejszym okresie dzięki reaktywności pucolanowej [1]. W innym badaniu [8], analizowano zasadność stosowania mączki wapiennej jako substytutu cementu w betonach o niskim współczynniku woda/cement (w/c), wykorzystując model porowatości Powersa. Główna teza pracy opierała się na obserwacji, że w przypadku betonów wysokiej jakości (np. betonach mostowych czy przemysłowych), w których w/c spada poniżej 0,42, znaczna część cementu nie ulega pełnej hydratacji z powodu niedoboru wody lub ograniczonej przestrzeni porowej. W efekcie cement działa jedynie jako kosztowny wypełniacz, którego funkcję może przejąć tańsza i powszechnie dostępna mączka wapienna (CaCO_3). Natomiast, w [9] przeprowadzono szczegółowe badania nad wykorzystaniem cementu portlandzkiego wapiennego (CEM II/A-LL 42,5 R-NA) w konstrukcyjnym betonie mostowym. Wykazano, że cement tego rodzaju może znacząco ograniczyć ślad węglowy w porównaniu z tradycyjnym cementem CEM I i to średnio o 12%. Badania potwierdzają, że beton z cementem wapiennym charakteryzuje się dobrą urabialnością, wysoką szczelnością, odpornością na cykliczne zamrażanie-odmrażanie i działanie soli odladzających, a także wyższą wytrzymałością wczesną dzięki efektowi zarodnikowania. Pomimo niższego ciepła hydratacji, beton ten spełnia wymagania normowe dla obiektów inżynierskich. Autorzy tych badań apelują o szersze stosowanie cementów niskoemisyjnych jako standardu w zrównoważonym budownictwie infrastrukturalnym. Również, z przeprowadzonych analiz w [7, 10] wynika, że zamiana nawet 10–15% cementu na mączkę wapienną nie prowadzi do pogorszenia właściwości wytrzymałościowych betonu po 28 dniach dojrzewania. Wręcz przeciwnie, przy odpowiednim stopniu rozdrobnienia mączki obserwuje się korzystne efekty związane z poprawą struktury porowej i zmniejszeniem porowatości kapilarnej. Co istotne, zastosowanie mączki wapiennej prowadzi także do istotnych korzyści środowiskowych, takich jak redukcja emisji CO_2 oraz zmniejszenie zużycia klinkieru portlandzkiego. Praca [10] potwierdza, że w nowoczesnych recepturach

betonów niskoemisyjnych mączka wapienna może pełnić istotną rolę technologiczną i ekologiczną, stanowiąc ważny składnik strategii dekarbonizacji materiałów budowlanych.

Stosowanie mączki wapiennej ma też istotne znaczenie dla zrównoważonego rozwoju i realizacji strategii 5C (Klinkier–Cement–Beton–Budownictwo–Karbonatyzacja). W ramach tego podejścia beton wysokowartościowy (o wysokiej wytrzymałości i szczelności) pozwala na zmniejszenie zużycia cementu i wydłużenie trwałości konstrukcji, co redukuje emisje CO₂ oraz odpady budowlane [11]. Mączka wapienna wpisuje się w tę strategię, ponieważ przyczynia się do obniżenia zapotrzebowania na czysty cement i zwiększa odporność konstrukcji na czynniki korozyjne. Holistyczne podejście 5C podkreśla rolę cementu w ostatecznym produkcie (betonie) jako kluczowego materiału wpływającego na emisje CO₂ w budownictwie oraz potrzebę poszukiwania alternatywnych rozwiązań materiałowych, które umożliwiają jej skuteczną redukcję [11]. Przykładem takiego podejścia są badania przedstawione w pracy [12], w której analizowano zastosowanie mączki wapiennej uzyskanej z kamienia pochodzącego z rozbiórek w spoiwach cementowo-wapiennych, wskazujące na potencjał wtórnych surowców mineralnych jako elementu strategii dekarbonizacji. Również w pracy [2] częściowo zastępowano popiół lotny mączką wapienną, potwierdzając możliwość zmniejszenia ilości cementu i popiołu bez negatywnego wpływu na jakość betonu. W świetle zaprezentowanych danych, zasadne wydaje się prowadzenie dalszych badań aplikacyjnych nad wykorzystaniem mączek wapiennych spoza sektora cementowego, celem pełnej oceny ich właściwości i potencjału technologicznego. W związku z tym konieczne są wieloaspektowe badania (takie jak przedstawiony poniżej dwuetapowy program badawczy) w warunkach praktycznych, aby zweryfikować wpływ różnych rodzajów mączki wapiennej na właściwości mieszanek i betonów zwykłych oraz w pełni ocenić ich przydatność dla niskoemisyjnego budownictwa.

Pomimo wielu artykułów naukowych oraz popularno-naukowych dotyczących ogólnych właściwości mączek wapiennych, nadal brakuje badań analizujących praktyczną przydatność mączek stosowanych dotychczas poza branżą betonową, np. w przemyśle szklarskim, papierniczym czy stalowym. Tego rodzaju materiały, dostępne na rynku w formie gotowych produktów, mogą stanowić lokalne źródło zamienników dla dodatków typu II, takich jak popiół lotny, którego dostępność w Polsce systematycznie się zmniejsza. Istnieje zatem potrzeba zweryfikowania, czy takie mączki, nieprodukowane z myślą o zastosowaniu w betonie, mogą spełniać wymagania technologiczne oraz normowe w produkcji betonu towarowego. Dlatego, celem niniejszej pracy było przeprowadzenie aplikacyjnego badania porównawczego obejmującego ocenę wpływu ośmiu różnych mączek wapiennych, stosowanych dotąd głównie poza branżą betonową, na wybrane właściwości świeżej mieszanki betonowej oraz betonu stwardniałego. Program badawczy miał charakter dwuetapowy i został zrealizowany w warunkach produkcyjnych jednego z węzłów betoniarskich, z wykorzystaniem dwóch wyjściowych receptur betonu zwykłego i jednej receptury docelowej. Analizowano parametry takie jak konsystencja, wytrzymałość na ściskanie, wnikanie wody pod ciśnieniem, z uwzględnieniem zmiennego poziomu zastąpienia popiołu lotnego, 50% oraz 100%.

Hipotezy badawcze przyjęte w pracy zakładały, że:

- ☐ Niektóre mączki wapienne stosowane poza branżą betonową mogą być wykorzystane jako skuteczny zamiennik popiołu lotnego w betonie zwykłym bez pogorszenia jego kluczowych właściwości użytkowych.
- ☐ Właściwości mączek, takie jak uziarnienie i pochodzenie, mogą mieć istotny wpływ na parametry mieszanki betonowej i betonu.
- ☐ Różnice pomiędzy mączkami mają charakter istotny technologicznie i umożliwiają selektywny dobór materiału w zależności od oczekiwanych właściwości betonu.

Praca ma charakter aplikacyjny i stanowi punkt wyjścia do dalszych analiz mikrostrukturalnych (SEM, MIP) oraz ocen ekonomiczno-środowiskowych, w tym związanych z bilansem śladu węglowego i efektywnością kosztową transportu materiałów.

2. Podstawy formalne stosowania mączki wapiennej w betonie

Zgodnie z normą PN-EN 206 [13], beton to kompozyt składający się z cementu, kruszyw grubych i drobnych, wody oraz opcjonalnie domieszek, dodatków lub włókien. Składniki te mogą być stosowane, o ile ich przydatność została wykazana zgodnie z wymaganiami norm europejskich. W przypadku braku odpowiednich norm EN, dopuszcza się alternatywne podstawy dopuszczenia, takie jak Europejska Ocena Techniczna (EOT) lub krajowe regulacje, np. Polska Norma (PN) czy Krajowa Ocena Techniczna (KOT).

Ze względu na bardzo drobne uziarnienie, mączki wapienne mieszczą się w definicji dodatku według PN-EN 206 [13], czyli nieorganicznego składnika droбноziarnistego dodawanego w celu modyfikacji właściwości betonu. Wyróżnia się dwa typy dodatków:

- ☐ Typ I – niemal obojętny,
- ☐ Typ II – pucolanowy lub o właściwościach hydraulicznych utajonych.

Dodatki typu II, takie jak popiół lotny, pył krzemionkowy czy zmielony żużel wielkopiecowy, posiadają status wyrobów budowlanych zgodnie z odpowiednimi normami EN (np. EN 450-1 [14], EN 13263-1 [15], EN 15167-1 [16]) i są znakowane znakiem CE.

Mączki wapienne, pozbawione aktywności pucolanowej i hydraulicznej, kwalifikują się jako dodatki typu I. Ich przydatność ocenia się według wymagań dla kruszywa wypełniającego, zgodnie z PN-EN 12620 [17]. Zgodnie z definicją, kruszywo wypełniające to frakcja, której większość przechodzi przez sito o oczku 0,063 mm, i która wpływa na właściwości materiałów budowlanych. Istotne jest, by nie utożsamiać tych produktów z pyłami, które są jedynie podzbiorem tej kategorii. Wymagania dla uziarnienia kruszywa wypełniającego przedstawiono w tabeli 1.

Tab. 1. Wymagania dotyczące uziarnienia kruszywa wypełniającego (wg PN-EN 12620 [17])

Wymiar sita (mm)	Ogólny zakres przechodzącej masy (%)	Maksymalny zakres deklarowany przez producenta ^{a)}	Wymiar sita (mm)
2	100	–	2
0.125	85–100	10	0.125
0.063	70–100	10	0.063
Uwaga: ^{a)} Zakres uziarnienia deklarowany na podstawie ostatnich 20 wyników. 90% z nich musi mieścić się w zakresie deklarowanym, wszystkie muszą spełniać wymagania ogólne.			

Ponadto zgodnie z p. 4.7 normy PN-EN 12620 [17], należy ocenić potencjalną szkodliwość pyłów. W tym celu norma oferuje cztery kryteria oceny, z których najtrafniejsze w przypadku mączek wapiennych jest potwierdzenie ich nieszkodliwości przez wykazanie udanego zastosowania w betonie. W praktyce oznacza to przeprowadzenie badań wstępnych zgodnie z załącznikiem A normy PN-EN 206 [13], które obejmują ocenę wpływu mączki na konsystencję, wytrzymałość i trwałość betonu.

3. Zakres badań

Z uwagi na cel badawczy, jakim było potwierdzenie przydatności dostępnych na rynku mączek wapiennych stosowanych dotychczas poza branżą betonową, opracowano dwuetapowy program eksperymentalny. Końcowym efektem była ocena możliwości zastosowania tych mączek jako zamiennika popiołu lotnego oraz częściowo cementu w betonie zwykłym, wraz z opracowaniem gotowych receptur.

W pierwszym etapie przebadano osiem mączek wapiennych, wytypowanych przez producentów zrzeszonych w Stowarzyszeniu Przemysłu Wapienniczego. Ich zróżnicowane pochodzenie oraz uziarnienie miało kluczowe znaczenie dla właściwości mieszanki i betonu stwardniałego. Do badań wybrano dwie wzorcowe receptury betonu klasy C12/15 i C20/25, w których zastosowano cement CEM I 42,5R oraz popiół lotny w maksymalnej normowej ilości 33% masy cementu.

Popiół zastępowano mączkami wapiennymi w ilości 50% oraz 100%, co dało łącznie 34 zaroby. Dla każdej mieszanki analizowano konsystencję, napowietrzenie, wytrzymałość na ściskanie po 7 i 28 dniach oraz głębokość penetracji wody.

Na podstawie uzyskanych wyników wytypowano trzy mączki (C, D, H), które w drugim etapie wykorzystano w recepturze betonu klasy C30/37 i klasie ekspozycji XC4. Popiół lotny w tej recepturze zastąpiono mączkami w ilości odpowiadającej 7,5% oraz 15% masy cementu, co przełożyło się na 6 wariantów betonu. Dla każdej z receptur wykonano 3 niezależne zaroby (łącznie 21), a uzyskane wyniki przedstawiono jako wartości średnie. Badaniom w tym etapie poddano konsystencję, napowietrzenie, wytrzymałość na ściskanie (28 dni), wytrzymałość na zginanie, rozciąganie przy rozłupywaniu, penetrację wody oraz mrozoodporność (F150).

W celu obiektywnej oceny wpływu mączek wapiennych zastosowano testy statystyczne, w tym test Levene'a do oceny homogeniczności wariancji oraz analizę wariancji ANOVA. Test Levene'a pozwolił ocenić, czy zmienność wyników w różnych wariantach (50%, 100%, wzorcowy) jest porównywalna. Wyniki wykazały brak istotnych różnic między poszczególnymi parametrami analizowanych betonów.

Wyniki szczegółowych analiz statystycznych zestawiono w tabeli 2.

Tab. 2. Zestawienie wartości testu Levene'a przeprowadzonego dla wybranych właściwości betonów klasy C12/15 oraz C20/25 modyfikowanych dodatkiem mączki wapiennej

Beton klasy C12/15 z 50% udziałem mączki						
	Źródło zmienności	Liczba stopni swobody (df)	Suma kwadratów	Średnia kwadratów	Statystyka F	Wartość p
Wytrzymałość na ściskanie po 7 dniach	Grupy (między grupami)	8	0.3585	0.04481	0.6436	0.732
	Błąd (wewnątrz grup)	18	1.2533	0.06963		
	Razem	26	1.6119	0.06199		
	Źródło zmienności	Liczba stopni swobody (df)	Suma kwadratów	Średnia kwadratów	Statystyka F	Wartość p
Wytrzymałość na ściskanie po 28 dniach	Grupy (między grupami)	8	0.5741	0.07176	0.3784	0.9184
	Błąd (wewnątrz grup)	18	3.4133	0.1896		
	Razem	26	3.9874	0.1534		
	Źródło zmienności	Liczba stopni swobody (df)	Suma kwadratów	Średnia kwadratów	Statystyka F	Wartość p
Głębokość penetracji wody [mm]	Grupy (między grupami)	8	80	10		
	Błąd (wewnątrz grup)	18	286.6666	15.9259		
	Razem	26	366.6666	14.1026	0.6279	0.7442
Beton klasy C12/15 z 100 % udziałem mączki						
	Źródło zmienności	Liczba stopni swobody (df)	Suma kwadratów	Średnia kwadratów	Statystyka F	Wartość p
Wytrzymałość na ściskanie po 7 dniach	Grupy (między grupami)	8	1.2319	0.154	1.1517	0.3782
	Błąd (wewnątrz grup)	18	2.4067	0.1337		
	Razem	26	3.6385	0.1399		
	Źródło zmienności	Liczba stopni swobody (df)	Suma kwadratów	Średnia kwadratów	Statystyka F	Wartość p
Wytrzymałość na ściskanie po 28 dniach	Grupy (między grupami)	8	0.6341	0.07926	0.3985	0.9069
	Błąd (wewnątrz grup)	18	3.58	0.1989		
	Razem	26	4.2141	0.1621		
	Źródło zmienności	Liczba stopni swobody (df)	Suma kwadratów	Średnia kwadratów	Statystyka F	Wartość p
Głębokość penetracji wody [mm]	Grupy (między grupami)	8	112.9629	14.1204	0.8009	0.6097
	Błąd (wewnątrz grup)	18	317.3333	17.6296		
	Razem	26	430.2963	16.5499		
Beton klasy C20/25 z 50% udziałem mączki						
	Źródło zmienności	Liczba stopni swobody (df)	Suma kwadratów	Średnia kwadratów	Statystyka F	Wartość p

Wytrzymałość na ściskanie po 7 dniach	Grupy (między grupami)	8	0.68	0.085	0.219	0.9829
	Błąd (wewnątrz grup)	18	6.9867	0.3881		
	Razem	26	7.6667	0.2949		
Wytrzymałość na ściskanie po 28 dniach	Źródło zmienności	Liczba stopni swobody (df)	Suma kwadratów	Średnia kwadratów	Statystyka F	Wartość p
	Grupy (między grupami)	8	0.4007	0.05009	0.1791	0.991
	Błąd (wewnątrz grup)	18	5.0333	0.2796		
	Razem	26	5.4341	0.209		
Głębokość penetracji wody [mm]	Źródło zmienności	Liczba stopni swobody (df)	Suma kwadratów	Średnia kwadratów	Statystyka F	Wartość p
	Grupy (między grupami)	8	113.333	14.1667	0.5933	0.7733
	Błąd (wewnątrz grup)	18	430.667	23.926		
	Razem	26	544	20.923		
Beton klasy C12/15 z 100 % udziałem mączki						
Wytrzymałość na ściskanie po 7 dniach	Źródło zmienności	Liczba stopni swobody (df)	Suma kwadratów	Średnia kwadratów	Statystyka F	Wartość p
	Grupy (między grupami)	8	0.4956	0.06195	0.7624	0.6320
	Błąd (wewnątrz grup)	18	1.462	0.0812		
	Razem	26	1.9576	0.0753		
Wytrzymałość na ściskanie po 28 dniach	Źródło zmienności	Liczba stopni swobody (df)	Suma kwadratów	Średnia kwadratów	Statystyka F	Wartość p
	Grupy (między grupami)	8	0.4785	0.05981	0.6333	0.7350
	Błąd (wewnątrz grup)	18	1.702	0.0946		
	Razem	26	2.1805	0.0839		
Głębokość penetracji wody [mm]	Źródło zmienności	Liczba stopni swobody (df)	Suma kwadratów	Średnia kwadratów	Statystyka F	Wartość p
	Grupy (między grupami)	8	112.0000	14.0000	0.7018	0.6690
	Błąd (wewnątrz grup)	18	286.667	15.926		
	Razem	26	398.667	15.307		

We wszystkich analizowanych przypadkach wartość p przekracza próg istotności ($\alpha = 0.05$), co oznacza brak podstaw do odrzucenia hipotezy zerowej (H_0) o jednorodności wariancji między grupami. Otrzymane wartości statystyki F mieszczą się w przedziale akceptacji, a sumy kwadratów międzygrupowych są relatywnie niewielkie. Test Levene'a potwierdził brak statystycznie istotnych różnic wariancji pomiędzy mieszankami betonowymi z dodatkiem mączki wapiennej. Otrzymane wyniki

umożliwiają dalsze porównywanie średnich z założeniem homogeniczności wariancji. Mączki wapienne, stosowane w ilości 50% i 100% jako zamiennik popiołu lotnego, nie powodują istotnych statystycznie różnic w zmienności kluczowych parametrów betonu. Potwierdza to ich potencjał jako pełnowartościowego składnika mieszanek betonowych, zgodnego z założeniami zrównoważonego rozwoju i obniżania śladu węglowego.

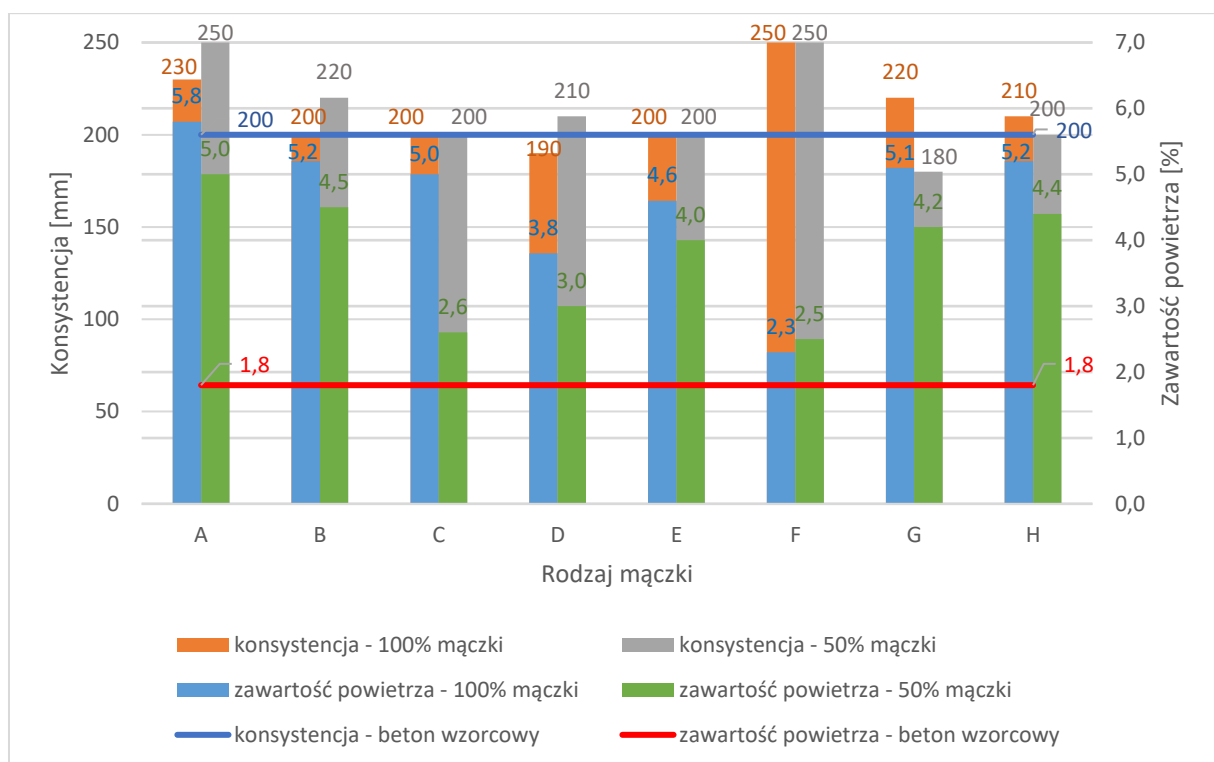
4. Wyniki badań i ich ocena

4.1. Etap 1 badań

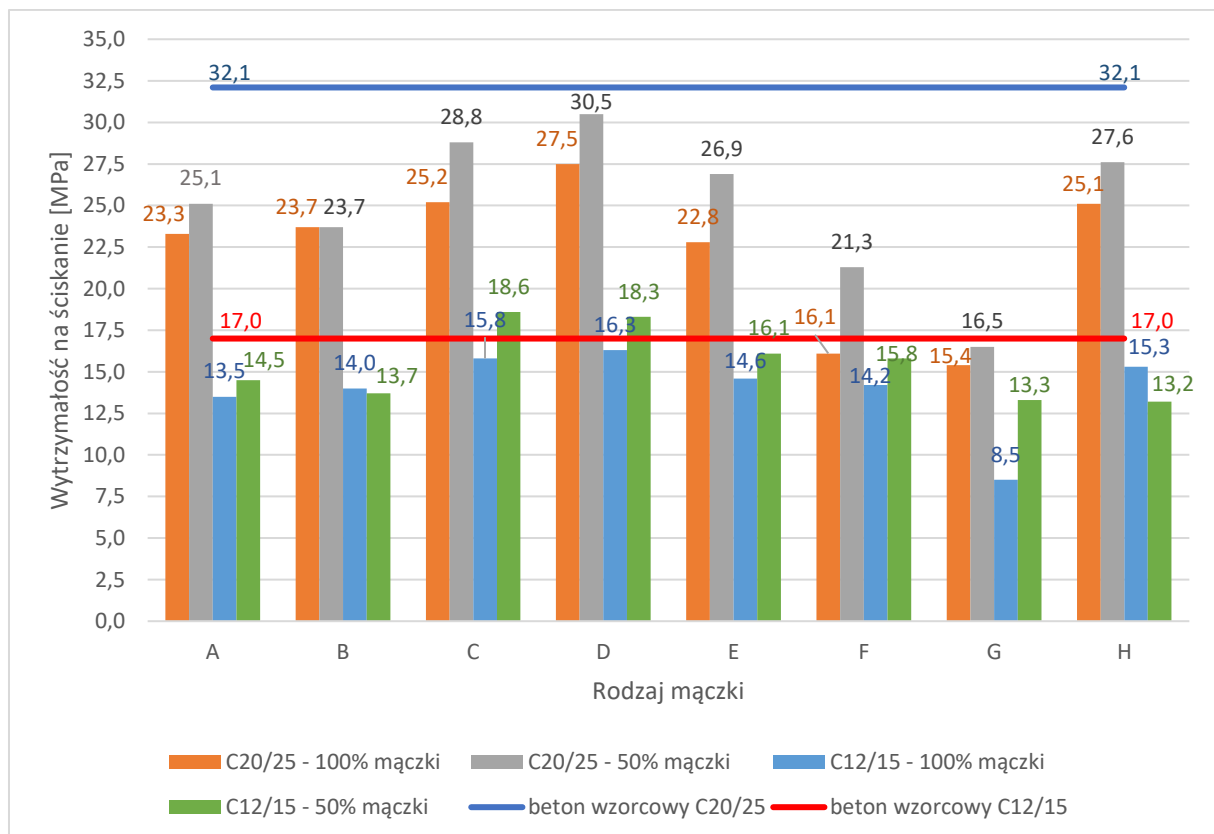
We wszystkich wariantach badanych receptur zastosowano stały skład mieszanki, bez korekt wynikających z różnic w gęstości dodatków oraz bez dostosowywania zawartości wody zarobowej. W efekcie zachowano stały wskaźnik w/c przy zmiennej, niekiedy istotnie, zawartości powietrza. Analiza właściwości mieszanki betonowej wymagała jednoczesnego uwzględnienia zarówno konsystencji, jak i stopnia jej napowietrzenia, ze względu na wzajemne powiązania tych parametrów i ich wpływ na właściwości stwardniałego betonu. Wyniki przedstawione na rysunku 1 wskazują, że zastosowanie mączek wapiennych nie miało negatywnego wpływu na urabialność mieszanki betonowej, ocenianą na podstawie opadu stożka. Zaobserwowano wręcz tendencję do jej lekkiego upłynnienia, co może świadczyć o zbliżonej wodożądności mączek wapiennych względem popiołu lotnego. Dodatkowo, wyższy poziom napowietrzenia mógł pozytywnie wpływać na konsystencję, pełniąc funkcję „smarującą” w strukturze mieszanki i ułatwiając jej przepływ. Wpływ mączek wapiennych na stopień napowietrzenia był zróżnicowany, jednak ogólnie obserwowano tendencję do ułatwionego wprowadzania powietrza do mieszanki, co mogło istotnie wpływać zarówno na uzyskiwane wartości wytrzymałości na ściskanie (rys. 2), jak i na szczelność struktury betonu (rys. 3).

Wytrzymałość na ściskanie w 28. dniu dojrzewania wykazywała obniżenie względem betonu wzorcowego, jednak pomimo znacznych dawek mączki wapiennej (odpowiednio 16,5% i 33% masy cementu dla 50% i 100% zastąpienia popiołu lotnego), spadki te nie przekroczyły kilkunastu procent. Takie rezultaty należy uznać za satysfakcjonujące i akceptowalne z inżynierskiego punktu widzenia. Przeprowadzona analiza statystyczna z wykorzystaniem testu Levene’a potwierdziła jednorodność wariancji oraz brak istotnych różnic pomiędzy grupami, co wzmacnia wiarygodność uzyskanych danych (tab. 2). Tym samym potwierdza się klasyfikacja mączek wapiennych jako dodatków typu I, zgodnie z normą PN-EN 206 [13], chemicznie prawie obojętnych, lecz ze względu na zróżnicowaną mineralogię i uziarnienie mogących pełnić funkcję zarodków krystalizacji faz C–S–H, wspomagając proces hydratacji i korzystnie wpływając na trwałość struktury cementowej.

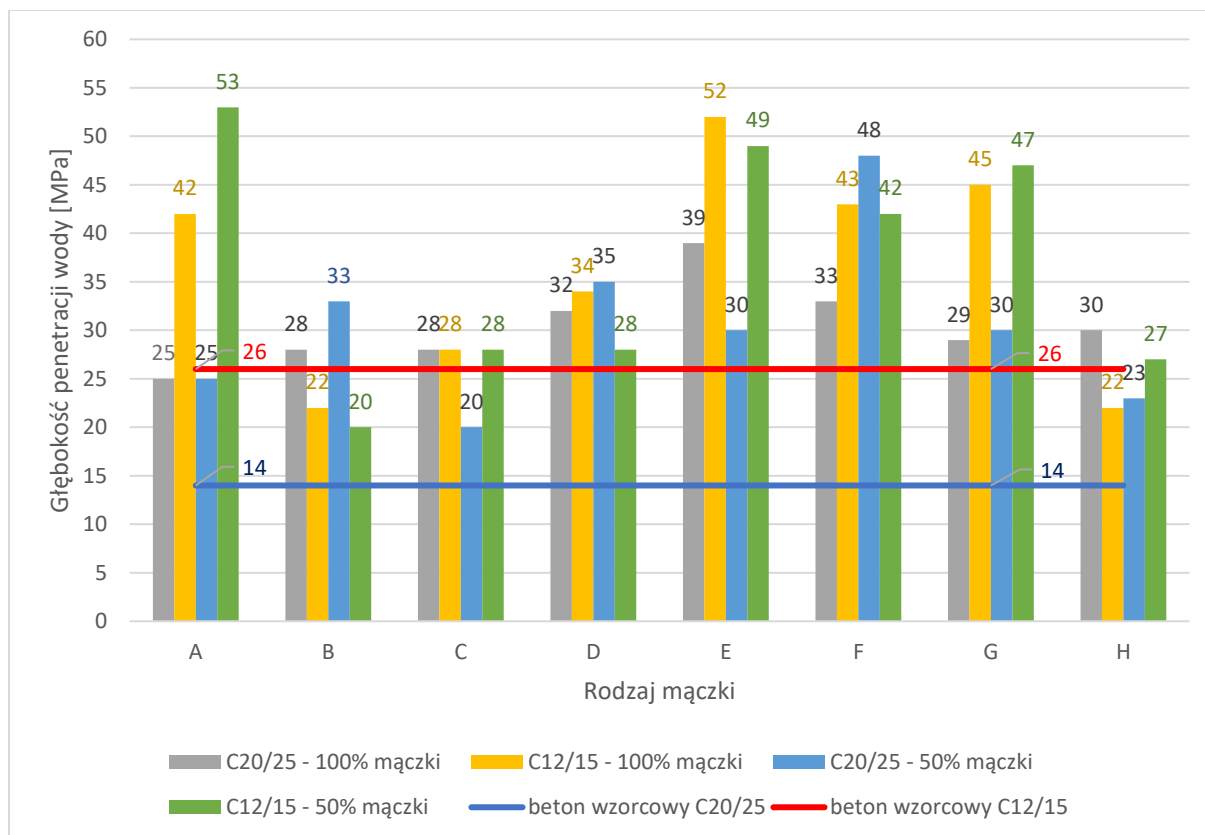
Z kolei wyniki dotyczące głębokości penetracji wody (rys. 3) wskazują na pewne pogorszenie szczelności w porównaniu do betonu referencyjnego, co jest uzasadnione zastąpieniem aktywnego dodatku pucolanowego mniej reaktywną mączką wapienną. Niemniej jednak, we wszystkich przypadkach wartości te nie przekraczały 60 mm, a większość mieściła się poniżej 40 mm, co oznacza spełnienie wymagań stawianych betonowi w klasie ekspozycji XA3 według dokumentu WWiORB GDDKiA [18].



Rys. 1. Wpływ rodzaju i zawartości mączki na konsystencję mieszanki betonowej oraz zawartość powietrza - klasa betonu C20/25



Rys. 2. Wpływ rodzaju i zawartości mączki na wytrzymałość betonu na ściskanie po 28 dniach pielęgnacji



Rys. 3. Wpływ rodzaju i zawartości mączki na głębokość penetracji wody pod ciśnieniem

4.2. Etap 2 badań

Na podstawie wyników uzyskanych w etapie 1 wytypowano trzy mączki wapienne: C, D oraz H wykazujące najwyższą stabilność parametrów oraz najlepszą kompatybilność z cementem CEM I. W oparciu o te dodatki przeprowadzono pełny zakres badań wstępnych, zgodnie z wymaganiami załącznika A normy PN-EN 206 [13].

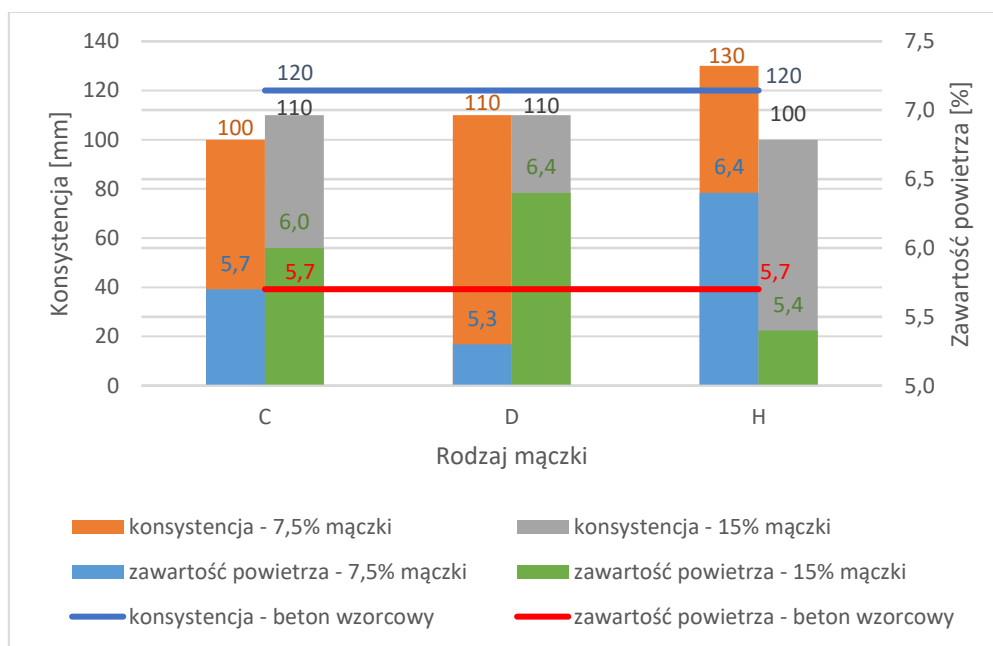
W ramach dwuetapowego programu badawczego mączki C, D i H poddano szczegółowej analizie technologicznej i materiałowej. Ich charakterystyka fizyczna, obejmująca uziarnienie i pochodzenie geologiczne, została zestawiona w tabeli 3. Zróżnicowanie stopnia rozdrobnienia oraz rodzaju surowca pierwotnego może mieć istotny wpływ na właściwości reologiczne mieszanki betonowej, jak również na mikrostrukturę i parametry wytrzymałościowe betonu stwardniałego.

Tab. 3. Uziarnienie badanych mączek oraz ich pochodzenie geologiczne

Uziarnienie [mm]	Rodzaj mączki [%]		
	C	D	H
2.000	100	100	100
0.125	90	97	97
0.063	82	90	85
Pochodzenie	Dewon/Jura	Jura	Dewon

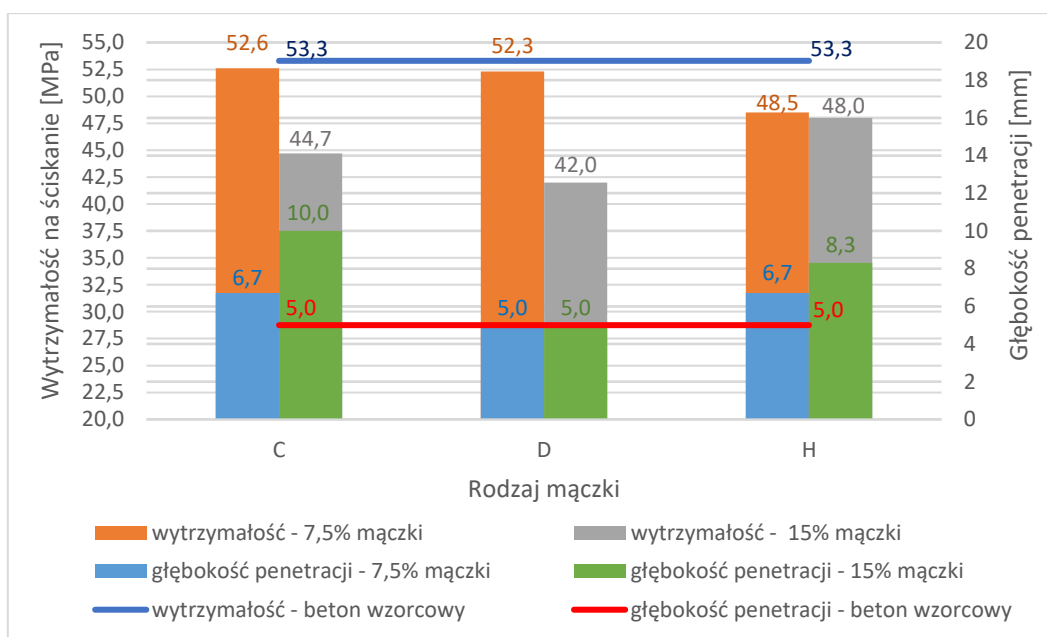
Wszystkie analizowane mączki wapienne charakteryzowały się pełnym przejściem przez sito o oczku 2 mm, jednak różniły się udziałem najdrobniejszej frakcji (<0,063 mm). Największy udział tej frakcji odnotowano dla mączki D (90%), natomiast najmniejszy dla mączki C (82%). Różnice w uziarnieniu mogą wpływać na efektywność wypełniania przestrzeni porowej w matrycy cementowej, a tym samym na szczelność betonu oraz wodożądność mieszanki. Istotne znaczenie może mieć również pochodzenie geologiczne surowca: Jura, Devon lub ich kombinacja (Devon/Jura), które determinują mineralogiczny skład mączki m.in. zawartość kalcytu i dolomitu wpływając tym samym na właściwości reologiczne mieszanki oraz trwałość betonu. Charakterystyka geologiczna i znajomość parametrów fizycznych pozwala określić potencjalny wpływ tych dodatków na kluczowe właściwości technologiczne: konsystencję, napowietrzenie oraz szczelność struktury betonu.

Badania mieszanki betonowej klasy C30/37 (rys. 4) nie wykazały negatywnego wpływu zastosowanych mączek wapiennych na urabialność mieszanki ani na możliwość uzyskania stabilnego napowietrzenia, niezbędnego w betonach mrozoodpornych.



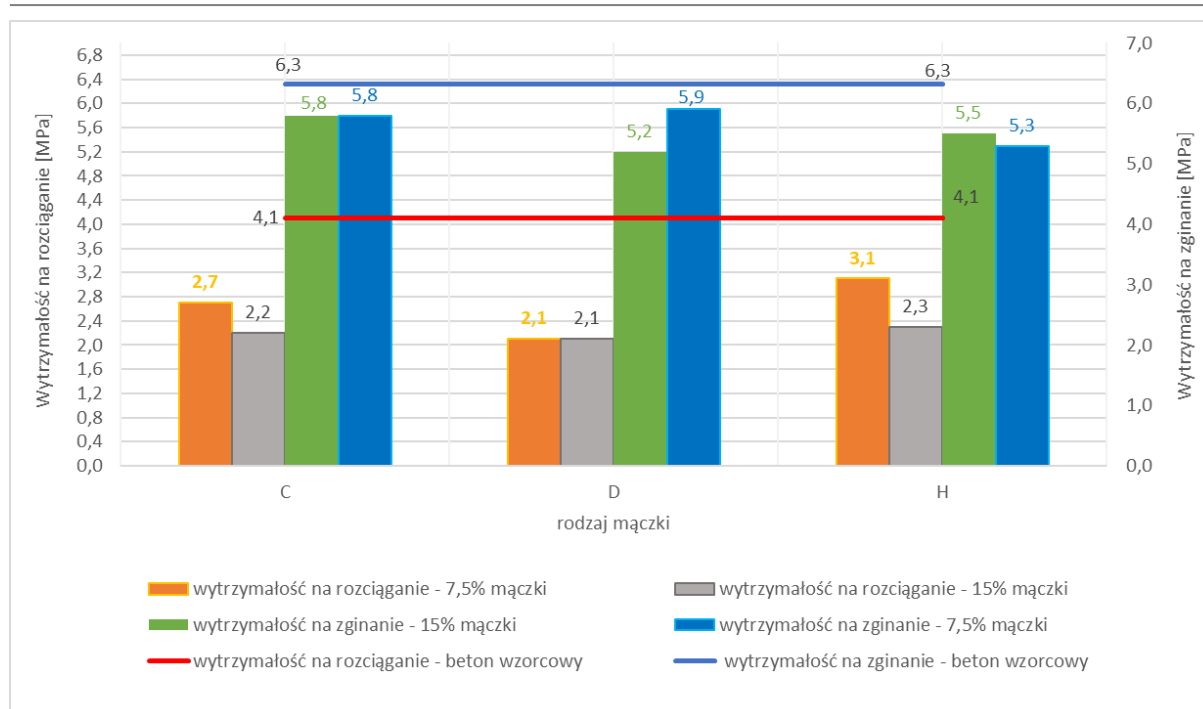
Rys. 4. Wpływ rodzaju i zawartości mączki na konsystencję mieszanki betonowej oraz zawartość powietrza - klasa betonu C30/37

Wytrzymałość na ściskanie (rys. 5) uległa jedynie nieznacznemu obniżeniu przy dozowaniu mączki wapiennej na poziomie 7,5% masy cementu, spadek ten był pomijalny z punktu widzenia oceny zgodności receptury. Nawet przy zwiększeniu udziału mączki do 15%, wszystkie próbki spełniły wymagania dla klasy wytrzymałości C30/37, co jednoznacznie potwierdza możliwość zastosowania wytypowanych mączek wapiennych w projektowaniu betonów konstrukcyjnych.



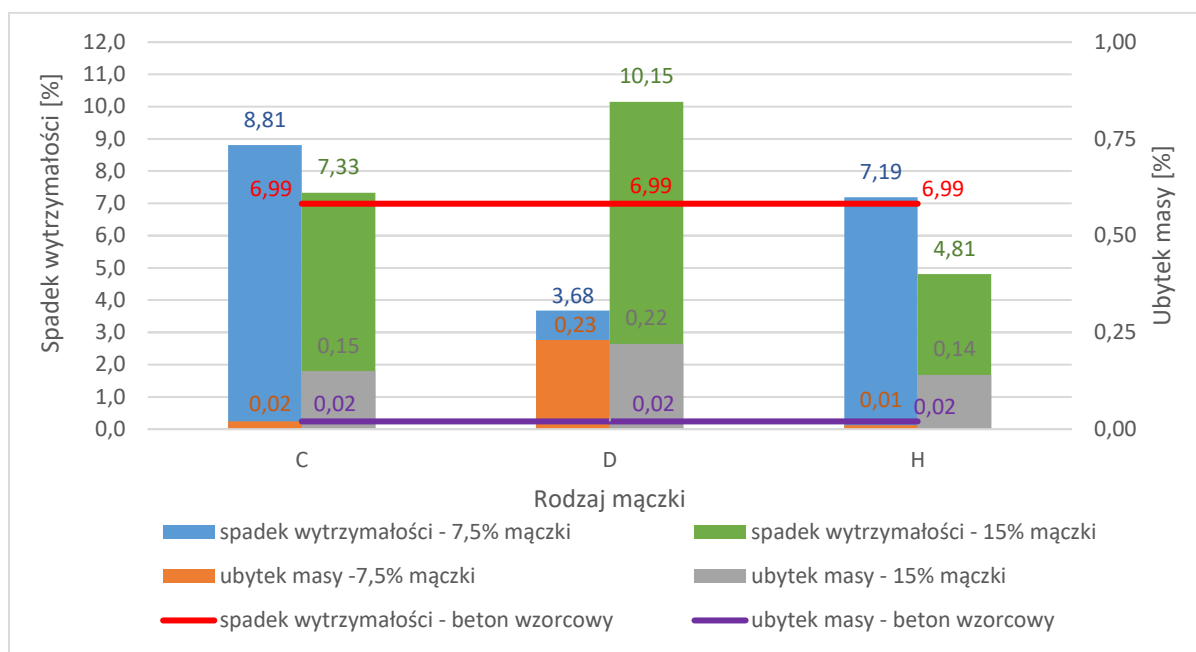
Rys. 5. Wpływ rodzaju i zawartości mączki na wytrzymałość betonu na ściskanie oraz głębokość penetracji wody pod ciśnieniem po 28 dniach pielęgnacji - klasa betonu C30/37

W przypadku wytrzymałości na zginanie i rozciąganie (rys. 6), mieszanki zawierające mączki wapienne wykazywały nieznaczne obniżenie wartości, przy czym efekt ten był bardziej zauważalny w przypadku rozciągania. Ponieważ jednak właściwości te nie zostały określone w pierwotnym projekcie betonu wzorcowego, ich ocena powinna być każdorazowo uzależniona od wymagań i specyfikacji technicznej zamawiającego. W praktyce może to mieć znaczenie przede wszystkim w elementach konstrukcyjnych narażonych na działanie sił rozciągających, takich jak belki zginane, płyty, nawierzchnie drogowe czy elementy prefabrykowane, gdzie spadek wytrzymałości na rozciąganie może wpływać na podatność na zarysowanie lub zmniejszenie nośności. W takich przypadkach wskazane jest rozważenie dodatkowego zbrojenia lub modyfikacji receptury.



Rys. 6. Wytrzymałość na zginanie oraz wytrzymałość na rozciąganie przy rozłupywaniu (beton klasy C30/37)

Badania odporności na penetrację wody oraz cykliczne zamrażanie i rozmrażanie (rys. 5 i 7) wykazały, że zastosowanie mączek wapiennych nie prowadzi do pogorszenia właściwości trwałościowych betonu. Uzyskane wyniki spełniają wymagania normowe dla betonu klasy C30/37, przeznaczonego do pracy w warunkach ekspozycji XC4, co potwierdza możliwość ich bezpiecznego stosowania w konstrukcjach narażonych na działanie cyklicznie zmiennych warunków wilgotnościowych i temperaturowych.



Rys. 7. Wpływ rodzaju i zawartości mączki na spadek wytrzymałości betonu oraz na ubytek masy próbek po badaniu odporności na działanie mrozu w stopniu F150 - klasa betonu C30/37

5. Podsumowanie i wnioski

Przeprowadzony dwuetapowy program badawczy jednoznacznie potwierdza możliwość wykorzystania wybranych dostępnych na rynku mączek wapiennych (gotowych produktów) jako funkcjonalnych składników w recepturach betonu zwykłego. Wnioski te opierają się na poniższych obserwacjach:

- Zastąpienie reaktywnego dodatku pucolanowego (popiołu lotnego) przez mączkę wapienną typu I (chemicznie niemal obojętną) skutkuje umiarkowanym spadkiem wytrzymałości na ściskanie. Nawet przy wysokim udziale (do 33% masy cementu), odpowiadającemu całkowitemu zastąpieniu popiołu, zaobserwowano jedynie kilkuprocentowe obniżenie parametrów mechanicznych. W przypadku częściowego zastąpienia cementu CEM I (7,5–15%), mieszanki spełniały wymagania założonej klasy C30/37.
- Charakterystyki uziarnienia i pochodzenia geologicznego mączek wapiennych (np. Jura, Devon) mają istotny wpływ na właściwości reologiczne oraz napowietrzenie mieszanki betonowej. W niższych klasach betonu (C12/15, C20/25) obserwowano wyraźniejszy efekt niekontrolowanego napowietrzenia, natomiast w betonie klasy C30/37, celowo napowietrzanym, wpływ ten był marginalny. Wodożądność mączek była zbliżona do popiołu lotnego, co pozwalało na utrzymanie stałego wskaźnika w/c bez konieczności korekty ilości wody zarobowej.
- Wyniki badań głębokości penetracji wody wykazały, że mączki wapienne nie poprawiają szczelności struktury betonu w takim stopniu, jak aktywne dodatki mineralne. Mimo to, uzyskane wartości mieściły się w granicach wymagań dla klasy

ekspozycji XA3, co umożliwia ich stosowanie w środowiskach agresywnych, przy odpowiednim dostosowaniu składu betonu.

- Warunkiem dopuszczenia danej mączki wapiennej do stosowania w betonie jest przeprowadzenie pełnego zakresu badań wstępnych zgodnie z załącznikiem A normy PN-EN 206 [13]. Procedura ta umożliwia ocenę zgodności właściwości użytkowych mieszanki z wymaganiami normowymi oraz weryfikację kompatybilności składników z cementem.
- W badaniach trwałościowych (odporność na cykliczne zamrażanie i rozmrażanie, penetracja wody pod ciśnieniem) nie odnotowano negatywnego wpływu mączek wapiennych. W zakresie właściwości mechanicznych odnotowano jedynie obniżenie wytrzymałości na rozciąganie przy rozłupywaniu, co wskazuje, że parametr ten powinien być uwzględniony przy doborze betonu do konkretnych zastosowań konstrukcyjnych.
- Zastosowanie mączek wapiennych wpisuje się w strategię dekarbonizacji budownictwa i dążenie do zrównoważonego rozwoju. Ograniczenie ilości klinkieru w mieszance betonowej pozwala na realną redukcję emisji CO₂, co jest zgodne z ideą modelu 5C (Clinker–Cement–Concrete–Construction–Carbonation), promowanego m.in. przez Giergiczego i współautorów [7,10].
- Mączki wapienne mogą pełnić funkcję alternatywy w odniesieniu do dodatków mineralnych pochodzenia przemysłowego, takich jak popiół lotny i granulowany żużel wielkopiecowy, których dostępność maleje w związku z transformacją sektora energetycznego i hutnictwa. Jako produkt uboczny przetwórstwa wapieni, mączki te stanowią cenny surowiec wtórny o potencjale zastosowania w nowoczesnych, niskoemisyjnych technologiach betonowych.

Powyższe obserwacje są zgodne z wynikami wcześniejszych badań Giergiczego [7,10], który wskazywał, że drobno zmielone mączki wapienne mogą pozytywnie wpływać na strukturę matrycy cementowej, poprawiać jej szczelność i trwałość oraz działać jako efektywne mikro-wypełniacze i zarodki krystalizacji faz C–S–H.

Niniejszy artykuł powstał z inicjatywy prof. Grzegorza Bajorka, pracownika Politechniki Rzeszowskiej oraz Centrum Technologicznego Budownictwa – Instytutu Badań i Certyfikacji. Profesor G. Bajorek odegrał kluczową rolę w zaprojektowaniu programu badawczego oraz określeniu jego celów aplikacyjnych. Współautorzy artykułu składają wyrazy uznania i wdzięczności za jego wkład merytoryczny i inspirację naukową.

Literatura

- [1] K. De Weerd, SINTEF REPORT, https://www.sintef.no/globalassets/sintef-byggforsk/coin/sintef-reports/sbf-bk-a07023_ternary-blended-cements-with-fly-ash-and-limestone-a.pdf, dostęp: 17.06.2025
- [2] M. A. Tarabishi, partially replacing fly ash with limestone powder in concrete – an experimental study, https://etd.ohiolink.edu/acprod/odb_etd/ws/send_file/send?accession=csu1643196612002884&disposition=inline#:~:text=has%20gained%20interest%20in%20research,for%20fly%20ash%20in%20light, dostęp: 17.06.2025
- [3] M. Hassan, Influence of limestone powder and fly ash on the freezing and thawing resistance of roller-compacted concrete. 2021, KSCE Journal of Civil Engineering, <https://doi.org/10.1007/S12205-021-1457-Z>
- [4] S.H. Liu, Z.Y. Gao, M.J. Rao, Study on ultra-high performance concrete containing limestone powder. 2011, Advanced Materials Research, 250-253:686-689, DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMR.250-253.686
- [5] P.P. Li, H.J.H. Brouwers, H.J.H. W. Chen, Q. Yu, Optimization and characterization of high-volume limestone powder in sustainable ultra-high performance concrete. 2020, Construction and Building Materials, 242:118112, DOI:10.1016/j.conbuildmat.2020.118112
- [6] J. Zheng, G. Liu, The influence and application of slag, fly ash, and limestone flour on compressive strength of concrete based on the concrete compressive strength development over time (CCSDOT) Model. 2020, Applied Sciences, 10(10), 3572, doi.org/10.3390/app10103572
- [7] M. Piechówka, Z. Giergiczny, Wpływ kamienia wapiennego na właściwości reologiczne zaczynu cementowego. 2011, Budownictwo Technologie Architektura, 1/2011, s. 58-61
- [8] D.P. Bentz, E.F. Irassar, B.E. Bucher, W.J. Weiss, Limestone fillers conserve cement. 2009, ACI Concrete International 31(12):35-39
- [9] P. Górak, P. Mofina, Ł. Guzikowski, Zielony potencjał cementu wapiennego w aspekcie redukcji śladu węglowego wbudowanego w konstrukcjach mostowych. 2022, Materiały Budowlane, 10/2022, s. 110-113, DOI: 10.15199/33.2022.10.27
- [10] Z. Giergiczny, Rola wapienia w kształtowaniu właściwości kompozytów cementowych. Go Green Concrete Sympozjum, Reologia w Technologii Betonów Niskoemisyjnych, Wrocław 2022
- [11] CRH Materials Polska/Cement Ożarów, Holistyczne podejście 5C do redukcji emisji branży cementowej i betonowej, BTA, https://www.bta-czasopismo.pl/wp-content/uploads/2025/02/52_Holistyczne-podejscie-5C-do-redukcji-emisji-branzy-cementowej-i-betonowej.pdf dostęp: 17.06.2025
- [12] B. Langier, J. Halbiniak, I. Major, Analysis of the use of recycled limestone flour for cement-lime binders and mortars. 2024, Materiały Budowlane, 11/2024, s.46-54. DOI: 10.15199/33.2024.11.06

- [13] PN-EN 206+A2:2021-08 Beton. Wymagania, właściwości użytkowe, produkcja zgodność
- [14] PN-EN 450-1:2012 Popiół lotny do betonu. Część 1: Definicje, specyfikacje i kryteria zgodności
- [15] PN-EN 13263-1+A1:2010 Pył krzemionkowy do betonu. Część 1: Definicje, specyfikacje i kryteria zgodności
- [16] PN-EN 15167-1:2007 Mielony granulowany żużel wielkopiecowy do stosowania w betonie, zaprawie i zaczynie. Część 1: Definicje, specyfikacje i kryteria zgodności
- [17] PN-EN 12620+A1:2010 Kruszywa do betonu
- [18] Warunki Wykonania i Odbioru Robót Budowlanych M-13.01.00 v04, Beton konstrukcyjny w drogowych obiektach inżynierskich, Generalna Dyrekcja Dróg Krajowych i Autostrad, Warszawa, sierpień 2022