

Mgr inż. Dominika Karkus
Mgr inż. Adrian Kamiński
Mgr inż. Krzysztof Wrzecion
Mgr inż. Jakub Boroński
Holcim Polska S.A.

Realizowanie gospodarki obiegu zamkniętego z wykorzystaniem recyklingowego gruzu betonowego - CDM (construction demolition materials) w produktach chemii budowlanej z kruszywem do 8mm

Implementing a circular economy by utilizing recycled concrete demolition materials (CDM) in dry mortars products with aggregates up to 8 mm

Streszczenie

Obecne wyzwania ekologiczne związane z ograniczoną ilością zasobów naturalnych zmuszają branżę materiałów budowlanych do podjęcia kwestii wprowadzania gospodarki obiegu zamkniętego. W związku z koniecznością ograniczania śladu węglowego, dekarbonizacji produkcji oraz zmniejszania eksploatacji złóż, naturalnym krokiem wydaje się wykorzystanie obecnych w obiegu materiałów rozbiórkowych. Zagadnienie CDM, czyli construction demolition materials jest wielokrotnie poruszane w pracach naukowych, zarówno w kontekście produkcji cementu, jak i betonu towarowego, mało jednak mówi się o zastosowaniu tego rodzaju surowca w branży chemii budowlanej.

W referacie poruszono temat zastąpienia kruszywa grubego 2/8mm w produkcji betonu workowanego kruszywem z przemysłowej obróbki gruzu rozbiórkowego. Celem referatu było wykazanie, że przy odpowiednim dobraniu parametrów kruszywa i mieszanki, CDM z powodzeniem zastępuje kruszywo grube naturalnego pochodzenia. Określone zostały podstawowe wymagania dotyczące wykorzystywanego kruszywa w aspekcie technologicznym, produkcyjnym oraz końcowego użytkownika, pozwalające na wykorzystanie go w procesie. Poddano ocenie wpływ zamiany kruszywa na najważniejsze właściwości mieszanki betonowej, takie jak konsystencja, urabialność, napowietrzenie oraz trwałość i wytrzymałość stwardniałego betonu. Przeanalizowano również ocenę użyteczności kruszywa w kontekście procesu produkcyjnego (suszenie, pakowanie) i odbiór przez wykonawcę (właściwości użytkowe).

Przedstawione w referacie wyniki pozwalają stwierdzić że wykorzystanie materiałów rozbiórkowych CDM jest nie tylko możliwe produkcyjnie, ale korzystne dla właściwości końcowego produktu. Udowodniono, że materiały pochodzące z rozbiórki, przy utrzymaniu odpowiedniego reżimu technologicznego, odpowiedniej tolerancji przesiewu, właściwych: magazynowania, obróbki i warunków dostaw, z powodzeniem wpływają na obniżenie sumarycznego śladu węglowego. Jest to kolejnym pionierskim krokiem po produkcji cementu z RCF oraz betonu towarowego z CDM i RCF, do osiągnięcia neutralności klimatycznej, zgodnie z założeniami Europejskiego Zielonego Ładu.

Summary

Current ecological challenges related to the limited amount of natural resources force the construction materials industry to address the issue of introducing a circular economy. Due to the need to reduce the carbon footprint, decarbonize production and reduce the exploitation of deposits, the natural step seems to be to use the demolition materials currently present in circulation. The issue of CDM (construction demolition materials), is often discussed in scientific works, both in the context of cement production and ready-mix concrete, but the topic of using this type of raw material in the construction chemicals industry is rarely discussed.

The paper discusses the replacement of 2/8 mm coarse aggregate in the production of bagged concrete with aggregate from the industrial processing of demolition rubble. The aim of the paper was to demonstrate that with the appropriate selection of aggregate and mix parameters, CDM successfully replaces coarse aggregate of natural origin. Basic requirements for the aggregate used in the technological, production and end-user aspects were defined, allowing its use in the process. The impact of aggregate replacement on the most important properties of the concrete mix, such as consistency, workability, air entrainment and durability and strength of hardened concrete, was assessed. The assessment of the aggregate usability in the context of the production process (drying, packaging) and acceptance by the contractor (performance properties) was also analysed.

The results presented in the paper allow us to conclude that the use of CDM demolition materials is not only possible in terms of production, but also beneficial for the properties of the final product. It has been proven that materials from demolition, while maintaining an appropriate technological regime, appropriate screening tolerance, proper storage, processing and delivery conditions, successfully reduce the total carbon footprint. This is another pioneering step after the production of cement from RCF and ready-mix concrete from CDM and RCF, towards achieving climate neutrality, in accordance with the assumptions of the European Green Deal.

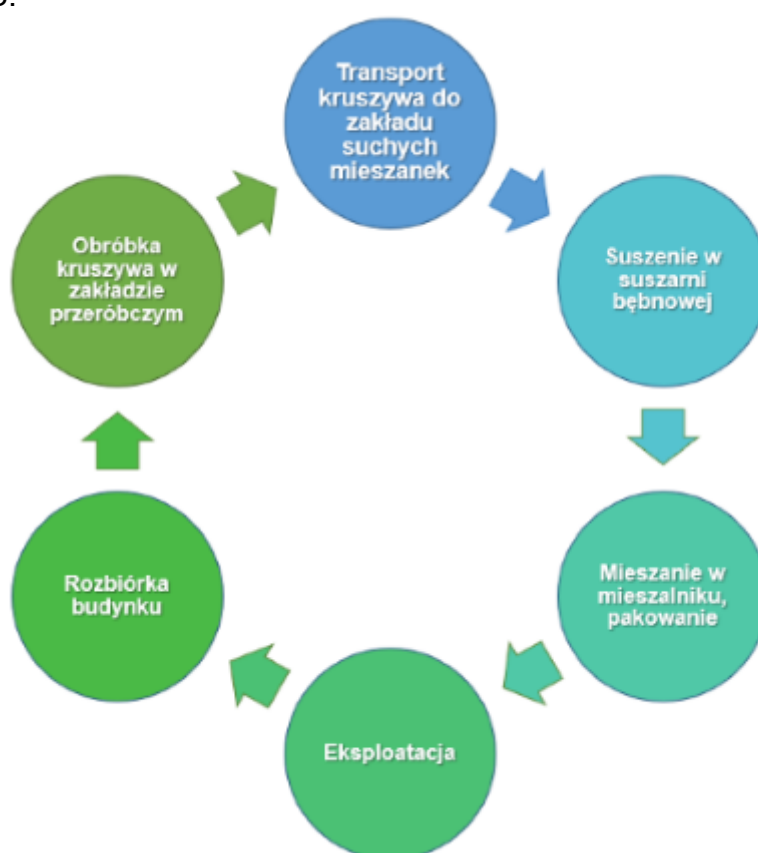
1. Wprowadzenie

Przyszłość świata materiałów budowlanych zmierza w kierunku materiałów niskoemisyjnych. Sektor ten, odpowiadający za znaczną część globalnej emisji CO₂ oraz zużycia surowców naturalnych, powinien dążyć do stania się liderem zrównoważonego rozwoju. W obliczu narastających wyzwań związanych ze zmianami klimatycznymi, kurczącymi się zasobami naturalnymi oraz koniecznością transformacji przemysłu, projektowanie nowych materiałów należy oprzeć na trzech filarach - dekarbonizacji, cyrkularności i innowacyjności.

Najbardziej wpływającym czynnikiem na niskoemisyjność materiałów cementowych jest stosowanie cementów o obniżonym śladzie węglowym; od stosowania w ich produkcji CDF, czyli mielonego pyłu recyklingowego, do wychwytywania dwutlenku węgla przy wypale klinkieru portlandzkiego (instalacje CCS). Celem osiągnięcia ekologicznej gospodarki obiegu zamkniętego, materiały cementowe należy traktować jako kompozyty, podchodząc do zagadnienia w pełni kompleksowo - uznając ostateczne rozwiązanie za wypadkową emisji każdego składnika wykorzystanego przy

produkcji, przez co należy również skupić się na pozostałych składowych końcowego produktu.

Zastosowanie kruszyw pochodzących z recyklingu nie tylko pozwala na obniżenie śladu węglowego, ale również zapobiega nadmiernej eksploatacji złóż poprzez ograniczenie zużycia skał naturalnych. Surowiec rozbiórkowy pozyskiwany może być z niedalekich odległości, a zakłady przeróbcze zlokalizowane mogą być bezpośrednio w miejscach zapotrzebowania, w związku z czym ograniczony zostaje ślad węglowy związany z transportem kruszywa [1]. Podchodząc do tematu holistycznie, gospodarka cyrkularna powinna skupiać się na każdej gałęzi branży. W związku z tym, przeanalizowano możliwość całkowitego zastąpienia kruszywa grubego 2/8mm w produkcji betonu workowanego kruszywem z przemysłowej obróbki gruzu rozbiórkowego.



Rys. 1 - Cykl życia cementowego materiału budowlanego

2. Parametry kruszywa oraz obróbka w zakładzie produkcji suchych mieszanek

Pierwszym krokiem wprowadzenia do wyrobu surowca recyklingowego było zadanie odpowiednich wymagań dla jego parametrów jakościowych. Specyfikacja techniczna dla kruszyw recyklingowych 4/8 mm określała wytyczne kruszywa zgodnie z normą PN-EN 12620 "Kruszywa do betonu" [2], tak, by było ono jak najbardziej zbliżone do kruszywa naturalnego stosowanego dotychczas w produkcji. W związku z charakterystyką materiałów rozbiórkowych, określono podział składników w składzie kruszywa:

Podział składników	
Betony, wyroby betonowe, zaprawy	Rc50
Beton, wyroby betonowe, zaprawy, kruszywo niezwiązane i związane	Rc+Ru 95
Ceramika, beton napowietrzony niepływający	Rb10
Materiały bitumiczne - brak zanieczyszczeń	Ra
Szkło - brak zanieczyszczeń	X+Rg
Grube zanieczyszczenia lekkie PN-EN 1744-1	mLPC0,1
Nasiąkliwość, kategoria PN-EN 1097-6, zał. B	WA ₂₄ 4

Rys. 2 - Wymagania dla kruszywa recyklingowego

Zawartość materiałów bitumicznych w kruszywie recyklingowym była szczególnie ważnym parametrem produkcyjnym, ze względu na fakt poddawania kruszywa procesowi suszenia w suszarni bębnowej. Temperatura wyjścia na suszarni dochodzi do 170°C, co powodować może zanieczyszczanie instalacji stopionym materiałem bitumicznym, a w konsekwencji zmniejszenie sprawności suszarni, a nawet jej uszkodzenie.



Rys. 3 - Zanieczyszczenia bitumiczne - podstawa do odrzucenia partii kruszywa



Rys. 4 - Zanieczyszczenia organiczne/bitumiczne - podstawa do odrzucenia partii kruszywa

Drugim z parametrów jakościowych kruszywa mających znaczenie dla procesu był brak zawartości szkła. Wpływa to zarówno na możliwość pakowania produktów chemii budowlanej do papierowych worków, jak i na bezpieczeństwo wykonawców, którzy często ręcznie dokonują końcowej obróbki betonu workowanego. Ważnym parametrem przy obróbce i wytrzymałości betonu w worku z kruszywem recyklingowym jest zawartość organicznych zanieczyszczeń grubych, które po dodaniu wody będą wpływać na powierzchnię mieszanki (Rys 5, 6).



Rys 5. – Zanieczyszczenia organiczne w kruszywie recyklingowym – podstawa do odrzucenia partii kruszywa



Rys 6. - Zanieczyszczenia organiczne w kruszywie recyklingowym – podstawa do odrzucenia partii kruszywa

Docelowa bliska odległość zakładu przeróbki kruszywa recyklingowego oraz określona w specyfikacji technicznej maksymalna zawartość wilgoci na poziomie 5% może spowodować mniejsze zapotrzebowanie na ciepło wykorzystywane do suszenia, co całłościowo również wpłynie na ślad węglowy ostatecznego produktu.

Sito [mm]	Udział procentowy – kruszywo naturalne 2/8 [%]	Udział procentowy – kruszywo recyklingowe 4/8 [%]
8	4,39	0,93
4	49,24	89,95
2,8	19,58	3,23
2	12,82	0,50
1,25	7,61	0,35
0,8	2,44	0,39
0	3,92	4,66
SUMA	100	100

Rys. 7 - Przesiew kruszywa naturalnego 2/8 oraz kruszywa recyklingowego 4/8 wytypowanego do przeprowadzenia badań

3. Składy produktów i przeprowadzone badania

Przedstawione poniżej wyniki badań wykazują możliwość zastąpienia użytego standardowo kruszywa otoczkowego na kruszywo recyklingowe. Przygotowano zaroby referencyjne z kruszywem naturalnym, w trzech klasach wytrzymałości - C20, C25 i C30, odpowiadające kolejno 20, 25 i 30 MPa po 28 dniach, oraz zaroby badawcze z kruszywem recyklingowym. W obu rodzajach zarobów ustalono to samo dozowanie wody na poziomie 10% masy suchej. W skład mieszanek wchodziły następujące składniki:

- cement portlandzki - wieloskładnikowy,
- domieszki upłynniająco-napowietrzające,
- dodatki mineralne,
- kruszywo drobne 0/2 mm,
- kruszywo grube: naturalne otoczkowe 2/8 mm dla mieszanki referencyjnej; kruszywo recyklingowe 4/8 dla mieszanki badanej.

Rodzaj próbki	Deklarowana wytrzymałość po 28 dniach	Oznaczenie próbki
Beton workowany z kruszywem recyklingowym 4/8 mm	>20 MPa	Próbka badawcza - C20
Beton workowany z kruszywem recyklingowym 4/8 mm	>25 MPa	Próbka badawcza - C25
Beton workowany z kruszywem recyklingowym 4/8 mm	>30 MPa	Próbka badawcza - C30
Beton workowany z kruszywem naturalnym 2/8 mm	>20 MPa	Próbka referencyjna - C20
Beton workowany z kruszywem naturalnym 2/8 mm	>25 MPa	Próbka referencyjna - C25
Beton workowany z kruszywem naturalnym 2/8 mm	>30 MPa	Próbka referencyjna - C30

Rys. 8 - Tabela oznaczenia i charakterystyki próbek

Dla wszystkich produktów suchych zastosowano ten sam model opracowania składu i ujednoludnienia mieszanki. Każda z próbek mieszana była za pomocą mieszarki laboratoryjnej na niskich obrotach, w cyklu:

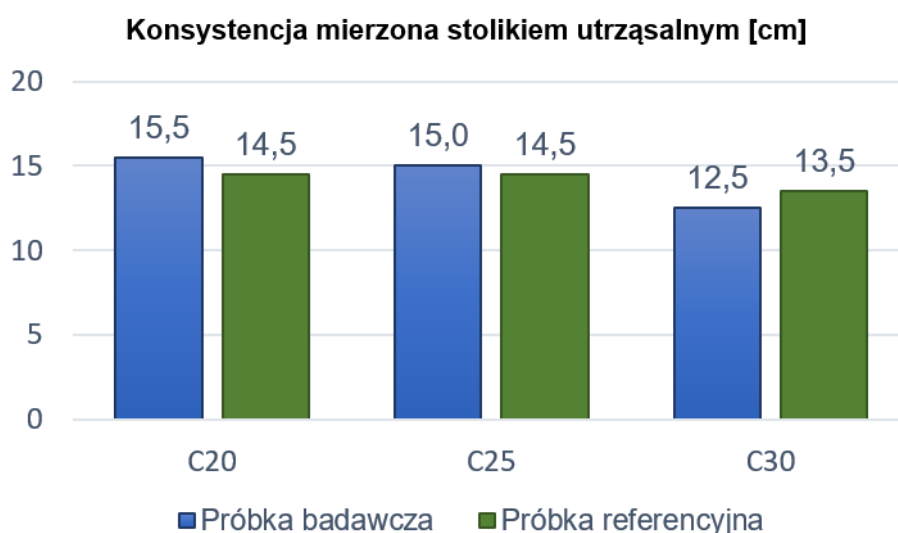
- 1,5 minuty mieszania,
- 1 minuta przerwy na zebranie materiału ze ścianek misy,
- 1 minuta mieszania.

Dla wszystkich próbek przebadano następujące parametry:

- konsystencja metodą stolika rozpliwowego zgodnie z normą PN-EN 1015-3:2000 [3],
- określenie zawartości powietrza w świeżej zaprawie zgodnie z normą PN-EN 1015-7:2000 [4],
- wytrzymałość na ściskanie dla belek 40x40x160mm - po 1, 7 i 28 dniach - procedura badania wytrzymałości zgodnie z PN-EN 13892-2 [5],
- oznaczenie kompatybilności cieplnej: cykliczne zamrażanie-rozmrażanie przy zanurzeniu w roztworze soli odladzającej zgodnie z normą PN-EN 13687-1:2008 [6]
- oznaczenie odporności na absorpcję kapilarną zgodnie z normą PN-EN 13057:2002 [7].

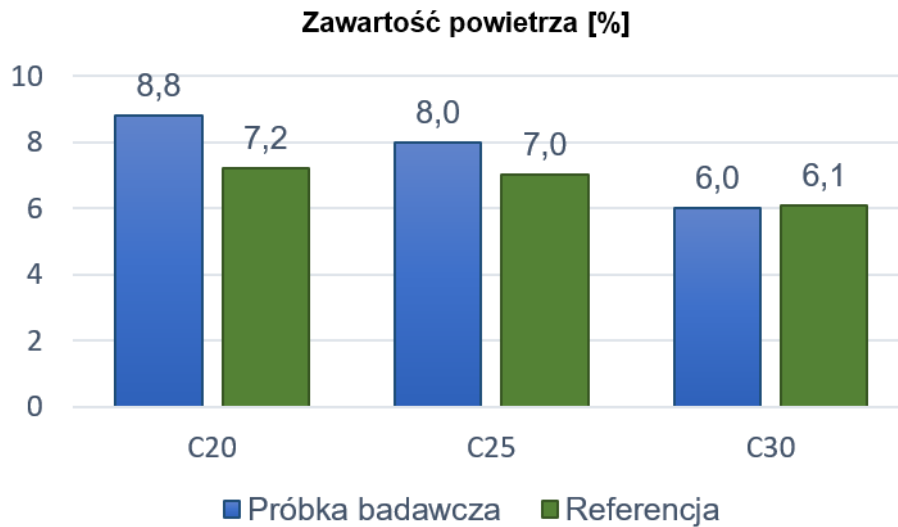
4. Wyniki

4.1. Konsystencja metodą stolika rozpliwowego zgodnie z normą PN-EN 1015-3:2000 [3] i określenie zawartości powietrza w świeżej zaprawie zgodnie z normą PN-EN 1015-7:2000 [4]



Rys. 9 - Porównanie wyników konsystencji próbki badawczej i próbki referencyjnej

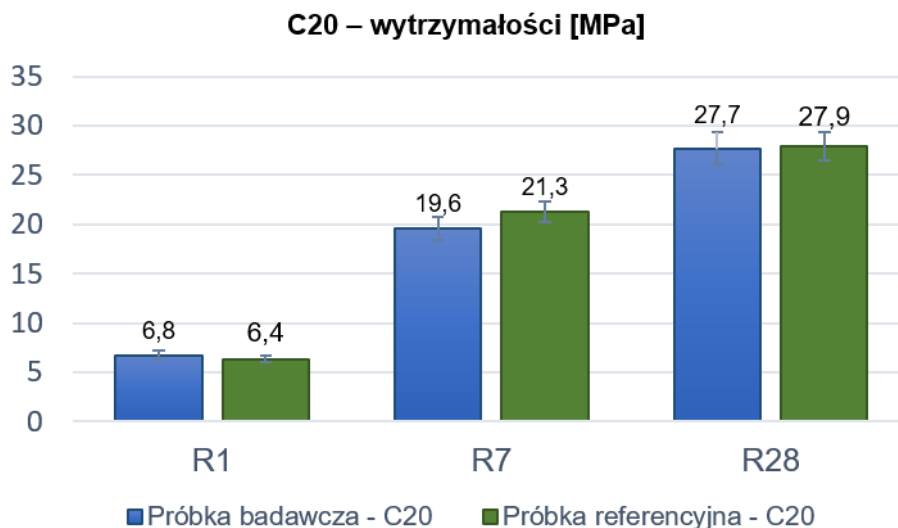
Próbki referencyjne i badawcze dla danej klasy przygotowano na tej samej ilości wody oraz cementu. Dla mieszanek o celowanej niższej klasie wytrzymałości, próbki badawcze cechowały się nieznacznie lepszą urabialnością. Wraz z rosnącym udziałem cementu, różnice zanikają, a próbka referencyjna C30 wykazuje odwrotną tendencję.



Rys. 10 - Porównanie wyników zawartości powietrza próbki badawczej i próbki referencyjnej

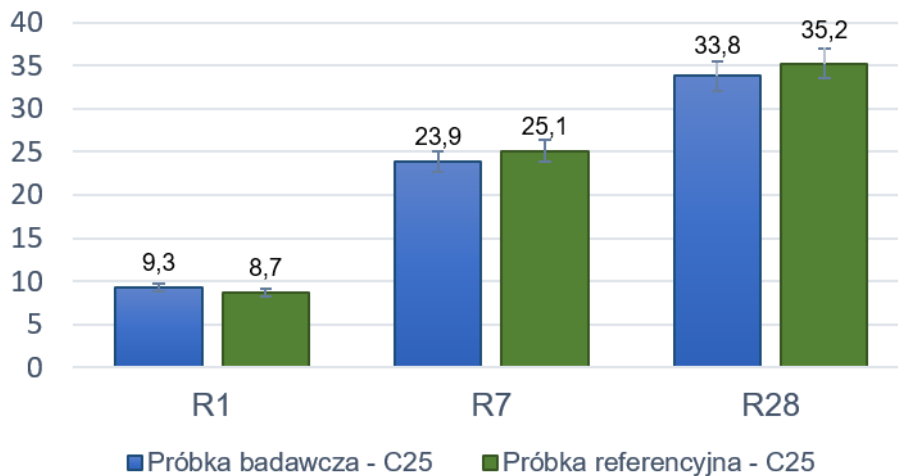
Różnice w napowietrzeniu zauważalne są wyłącznie dla próbek oznaczonych C20. Dla próbek referencyjnych i badawczych C25 oraz C30 różnica zawartości powietrza wynosiła $\leq 1\%$, co mieści się w granicy dokładności pomiarowej.

4.2. Wytrzymałość na ściskanie dla belek 40x40x160mm - po 1, 7 i 28 dniach - procedura badania wytrzymałości zgodnie z PN-EN 13892-2 [5]



Rys. 11 - Wyniki wytrzymałości na ściskanie dla próbek referencyjnych i badawczych C20 po 1, 7 i 28 dniach

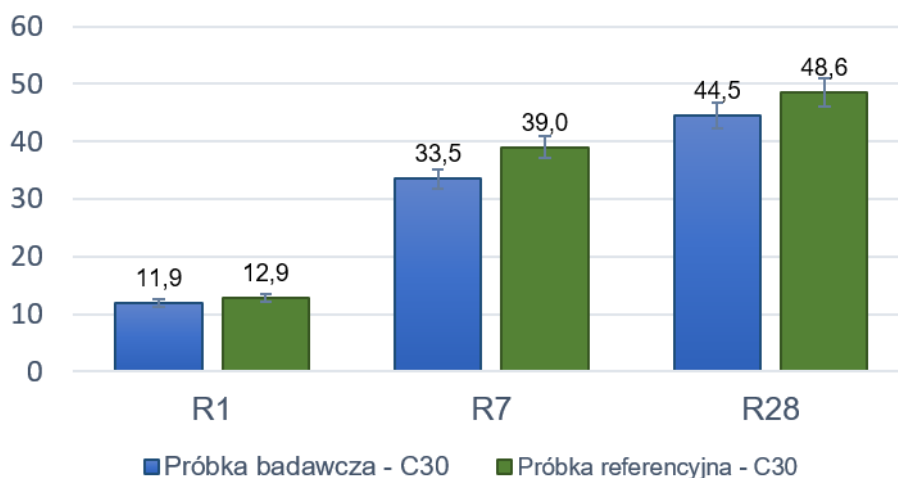
C25 – wytrzymałości na ściskanie [MPa]



Rys. 12 - Wyniki wytrzymałości na ściskanie dla próbek referencyjnych i badawczych C25 po 1, 7 i 28 dniach

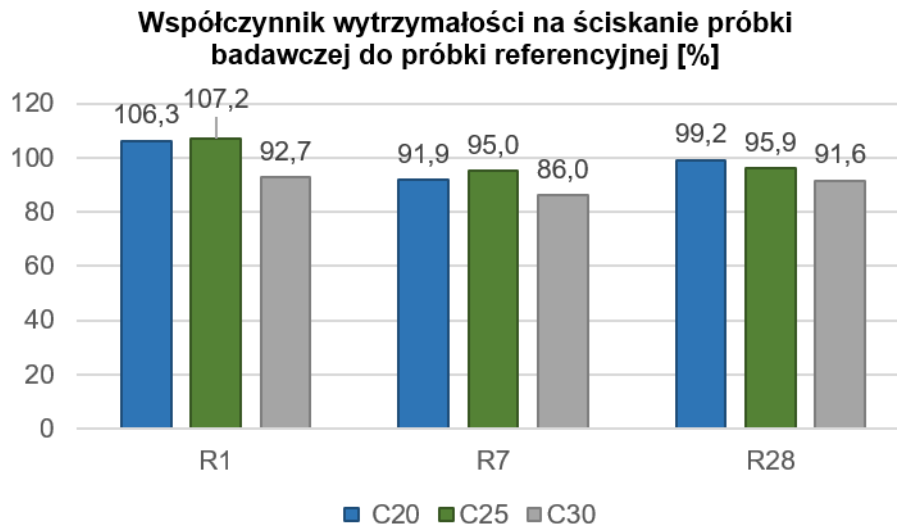
Analizując wyniki próbek C20 i C25, wyniki jednodniowe dla próbek referencyjnych okazały się o 6-6,5% niższe niż wyniki próbek badawczych, mimo nieznacznie wyższej zawartości powietrza w próbkach z kruszywem recyklingowym. Tendencja odwraca się w przypadku wyników wytrzymałości po 7 i 28 dniach - próbka badawcza C20 po 7 dniach osiąga 92% wytrzymałości próbki referencyjnej C20, a próbka badawcza C25 95% wytrzymałości próbki referencyjnej C25. Wraz z upływem czasu dojrzewania próbki, różnice zmniejszają się - po 28 dniach między próbką referencyjną a badawczą różnica wynosiła: dla C20 - 0,2 MPa; dla C25 - 1,4 MPa. Na podstawie powyższych danych można stwierdzić, że uzyskane wyniki są w pełni porównywalne. Wynikające różnice zaliczyć można do błędu pomiarowego.

C30 – wytrzymałości na ściskanie [MPa]



Rys. 13 - Wyniki wytrzymałości na ściskanie dla próbek referencyjnych i badawczych C30 po 1, 7 i 28 dniach

Analiza wyników otrzymanych przy porównywaniu klasy C30 przedstawia się podobnie. Różnica względem poprzednio opisanych przypadków dotyczy wyników wczesnych - jednodniowych. Dla tego czasu dojrzewania widać nieznaczny spadek wytrzymałości, względem referencji - 7,3 %. Wyniki po 7 i 28 dniach wykazują zbliżoną tendencję do klas C20 oraz C25, finalna wytrzymałość niższa o niespełna 8%.

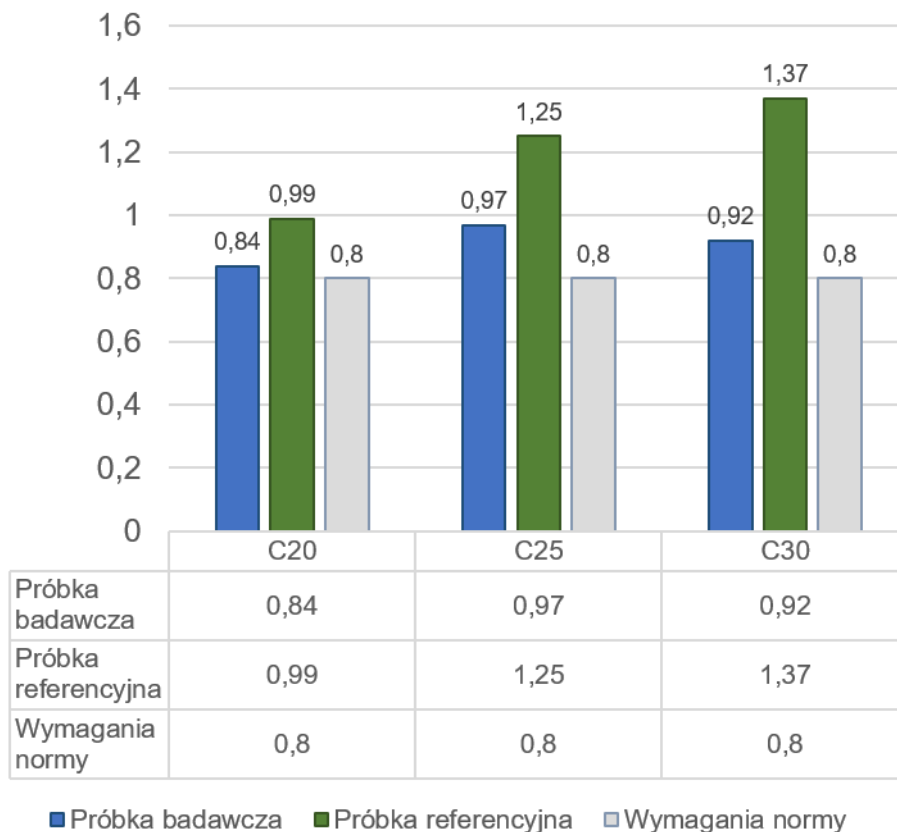


Rys. 14 - Stosunek wytrzymałości na ściskanie próbek z kruszywem recyklingowym względem próbek z kruszywem naturalnym

Powyższy wykres przedstawia współczynnik wytrzymałości na ściskanie próbki badawczej względem próbki referencyjnej. Najmniejszą widoczną różnicę względem wytrzymałości zaobserwowano na próbce klasy C20, największa na próbce klasy C30. Dla czasu dojrzewania 28 dni zaobserwować można wprost proporcjonalną liniową zależność spadku wytrzymałości względem celowanej klasy wytrzymałości. Nadmienić jednak należy, że spadek ten wynikać może z różnicy krzywej uziarnienia pomiędzy badanymi próbkami a ich referencyjnymi odpowiednikami.

4.3. Oznaczenie kompatybilności cieplnej: cykliczne zamrażanie-rozmrażanie przy zanurzeniu w roztworze soli odladzającej zgodnie z normą PN-EN 13687-1:2008

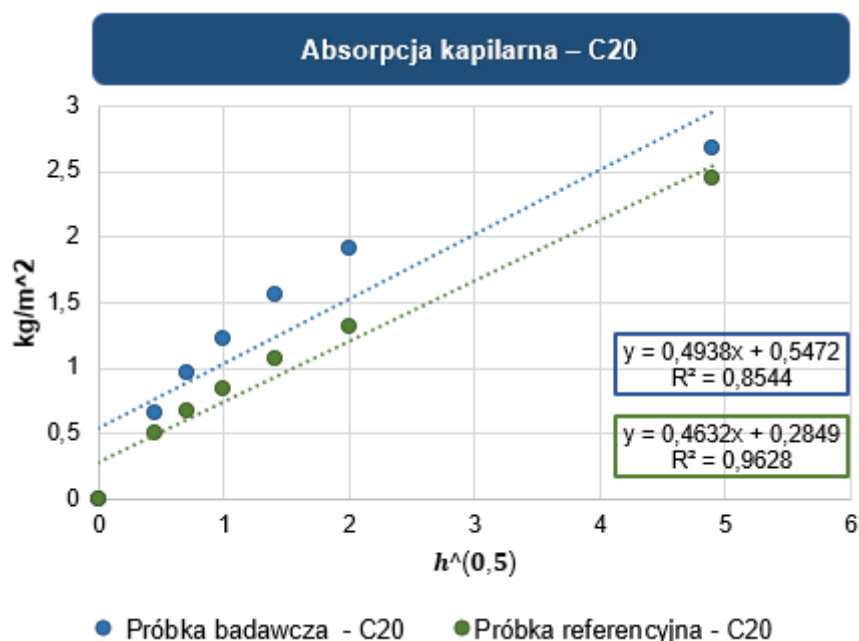
Wyniki przyczepności po cyklach zamrażania-rozmrażania [MPa]



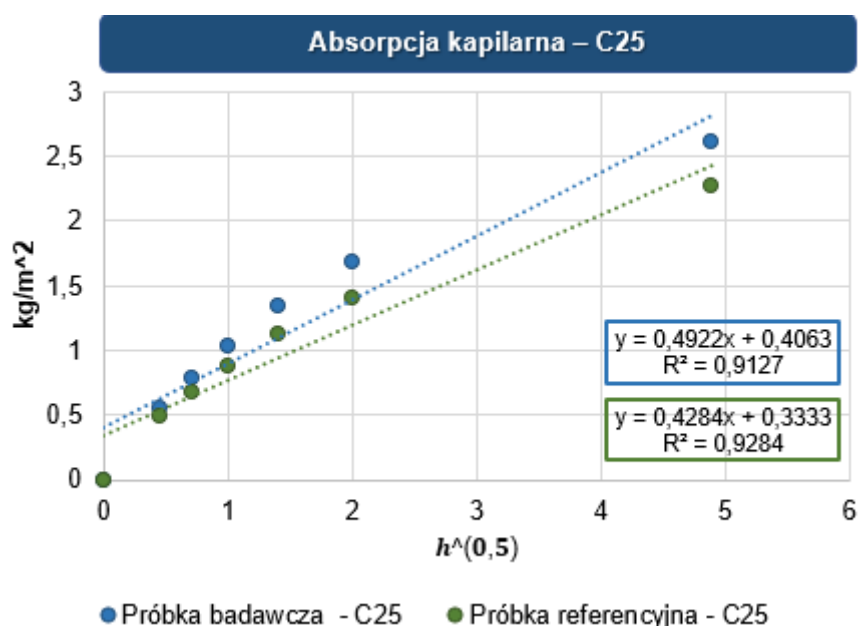
Rys. 15 - Wyniki przyczepności po cyklach zamrażania-rozmrażania przy zanurzeniu w roztworze soli odladzającej

Próbki poddano badaniu przyczepności po 28 dniach, jak i badaniu kompatybilności cieplnej po cyklicznym zamrażaniu-rozmrażaniu przy zanurzeniu w roztworze soli odladzającej. Wyniki dla przyczepności przekraczały wymaganą przez normę wartość i nie odbiegały od siebie w granicach dokładności pomiaru. Wyniki badania kompatybilności cieplnej dla mieszanek z kruszywem naturalnym wykazują wyższą odporność na warunki badania, jednak dla przygotowanej receptury, zaroby z kruszywem recyklingowym wciąż przekraczają wymaganą minimalną wartość.

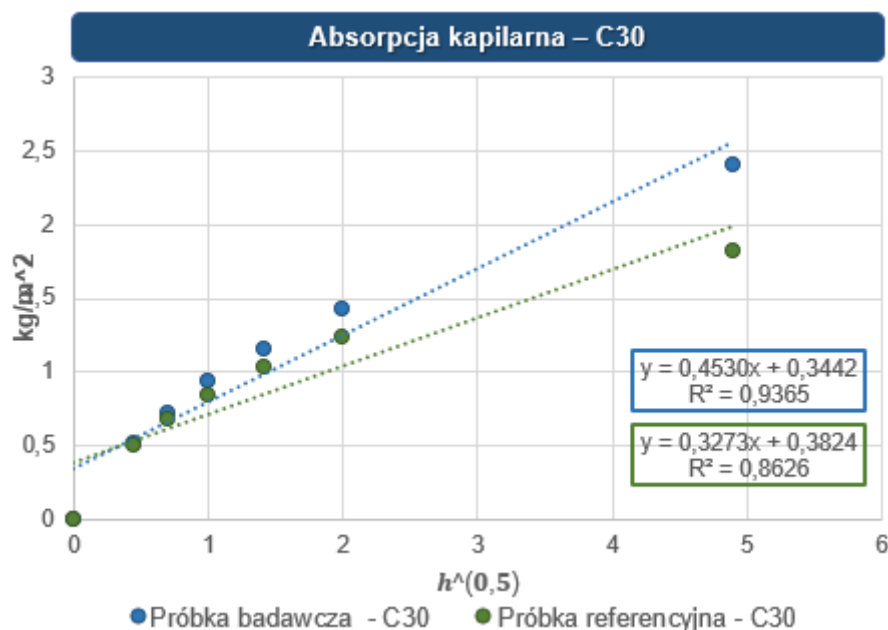
4.4. Oznaczenie odporności na absorpcję kapilarną zgodnie z normą PN-EN 13057:2002



Rys. 16 - Wykres: wyniki oznaczenia absorpcji kapilarnej dla próbek referencyjnych i badawczych C20



Rys. 17 - Wykres: wyniki oznaczenia absorpcji kapilarnej dla próbek referencyjnych i badawczych C25



Rys. 18 - Wykres: wyniki oznaczenia absorpcji kapilarnej dla próbek referencyjnych i badawczych C30

Absorpcja kapilarna dla próbek badawczych ma zauważalnie wyższą wartość niż wynik próbek referencyjnych, na granicy dopuszczalnej przez normę. Wraz z rosnącym udziałem cementu, a więc malejącym współczynnikiem w/c zwiększa się odporność na absorpcję kapilarną.

Badana próbka	C20		C25		C30	
Parametr	S [kg/(m² · h ^{0,5})]	R ²	S [kg/(m² · h ^{0,5})]	R ²	S [kg/(m² · h ^{0,5})]	R ²
Próbka referencyjna	0,4632	0,9628	0,4284	0,9284	0,3273	0,8626
Próbka badawcza	0,4938	0,8544	0,4922	0,9127	0,4530	0,9365

Rys. 19 - Zestawienie wyników absorpcji liniowej wraz z współczynnikiem determinacji

5. Podsumowanie

Zastosowanie kruszywa recyklingowego (CDM) pozwala na uzyskanie zbliżonych do próbki referencyjnej parametrów świeżej mieszanki. Nie zauważono większej wodożądności omawianych kruszyw. Dla przebadanych próbek badawczych nie widać znacznego wpływu kruszywa recyklingowego na wytrzymałość na ściskanie względem próbek referencyjnych – największa różnica widoczna jest po 7 dniach na próbce C30

(86% wytrzymałości próbki referencyjnej). Pozostałe różnice zamykają się w granicach 10%.

Zamianę kruszywa naturalnego na recyklingowe sprawdzono również przez pryzmat odporności na cykliczne zamrażanie-rozmrażanie w solach odladzających (kompatybilność cieplna). Zastosowanie kruszywa CDM wpłynęło negatywnie na ten parametr, lecz przekracza on wciąż minimalną wartość wymaganą. Wynikać może to z nieszczelnego stosu okruszowego i bardziej nieregularnego kształtu ziaren. Biorąc pod uwagę ten aspekt, warto rozważyć doszczelnienie mikrostruktury w omawianych mieszankach, przede wszystkim dla niższych klas wytrzymałości na ściskanie o mniejszej zawartości cementu [8].

Dla próbek badawczych dodanie kruszywa recyklingowego pogorszyło odporność na absorpcję kapilarną. Uzyskane wyniki dla mieszanek o mniejszej ilości cementu oscylowały w okolicy wartości wymaganej, co ponownie świadczy o kluczowym znaczeniu szczelnego stosu okruszowego w mieszance. Badanie absorpcji kapilarnej podkreśla wagę jednoznacznego określenia wartości nasiąkliwości kruszywa w kontrakcie jakościowym, ponieważ może być to jeden z parametrów również wpływających na wynik tego oznaczenia.

Na podstawie przeprowadzonych badań, można stwierdzić, że przy odpowiednim reżimie jakości kruszywa recyklingowego, może ono w pełni zastąpić kruszywo naturalne. Kluczową kwestią w przypadku tego materiału są nie tylko parametry powszechnie kojarzone z właściwościami kruszywa. Należy również zwrócić szczególną uwagę na obecność zanieczyszczeń, przede wszystkim ziemią, organiką oraz materiałami bitumicznymi.

6. Literatura

- [1] <https://www.holcim.pl/kruszywa-z-recyklingu-ecosource>
- [2] PN-EN 12620+A1:2010 - wersja polska
- [3] PN-EN 1015-3:2000, "Metody badań zapraw do murów - Określenie konsystencji świeżej zaprawy (za pomocą stolika rozplywu)"
- [4] PN-EN 1015-7:2000, "Metody badań zapraw do murów - Określenie zawartości powietrza w świeżej zaprawie"
- [5] PN-EN 13892-2, "Metody badania materiałów na podkłady podłogowe - Część 2: Oznaczanie wytrzymałości na zginanie i ściskanie"
- [6] PN-EN 13687-1:2008 „Wyroby i systemy do ochrony i napraw konstrukcji betonowych. Metody badań. Oznaczanie kompatybilności cieplnej. Część 1: Cykliczne zamrażanie-rozmrażanie przy zanurzeniu w roztworze soli odladzającej"
- [7] PN-EN 13057:2002, "Wyroby i systemy do ochrony i napraw konstrukcji betonowych. Metody badań. Oznaczanie odporności na absorpcję kapilarną."
- [8] „Porównanie wybranych właściwości betonów cementowych o zróżnicowanym stosie okruszowym w aspekcie trwałości konstrukcji żelbetowych”, Małgorzata Lelusz, Marta Kosior-Kazberuk, Dni betonu 2004