

XIII
KONFERENCJA

2025 DNI BETONU

TRADYCJA I NOWOCZESNOŚĆ

13-15 października 2025

MONOGRAFIE TECHNOLOGII BETONU - REFERATY



dnibetonu.com

Redakcja: **Jan Deja**
Bartosz Głowacz
Paulina Gos-Błaszczyk
Patryk Jóźwiak
Dariusz Konieczny
Grzegorz Krechowiecki
Zbigniew Pilch
Bożena Środa
Zespół SPC

Skład i łamanie tekstu,
opracowanie graficzne: **AD-LINE.PL**

Projekt: **Artur Darlak**

© Copyright by Stowarzyszenie Producentów Cementu, Kraków 2025

ISBN: 978-83-61331-51-3

Wydawca:



Stowarzyszenie Producentów Cementu
ul. Lubelska 29, 30-003 Kraków
tel. +48 12 423-33-55
e-mail: wydawnictwo@polskicement.pl
www.polskicement.pl

XIII
KONFERENCJA

2025.

DNI BETONU

T R A D Y C J A I N O W O C Z E S N O Ś Ć

13-15 października 2025

**MONOGRAFIE
TECHNOLOGII
BETONU**

- REFERATY



dnibetonu.com

BETON A ZRÓWNOWAŻONE BUDOWNICTWO

CONCRETE AND SUSTAINABLE CONSTRUCTION

Anna Frystacka

Bioeko Grupa TAURON sp. z o.o.

„Symbioza energetyki i budownictwa – możliwa i oparta na obustronnej korzyści. Produkty pochodzenia energetycznego jako materiały wspierające zrównoważony rozwój budownictwa”

Streszczenie:

Kruszywa antropogeniczne (np. popioły z energetyki, odpady przemysłowe) zastępują tradycyjne surowce naturalne, co redukuje eksploatację naturalnych złóż i związane z nią zniszczenie krajobrazu, emisję pyłów i hałasu oraz obniżenie śladu środowiskowego samego procesu produkcji materiałów budowlanych. Tym samym chroni się ekosystemy i bioróżnorodność, które są niszczone przez tradycyjne metody wydobywania. Ta idea sprzyja wykorzystaniu materiałów pochodzenia antropogenicznego w budownictwie. Branża energetyczna, w obliczu transformacji poza koniecznością bieżącego zagospodarowania na rynku swoich ubocznych produktów poprocesowych, coraz częściej mierzy się z koniecznością likwidacji zbędnej infrastruktury oraz „sprzątaniem” po zaniechanej działalności. Dla niektórych źródeł energetycznych podejmuje się próby przepaliwowania instalacji w związku z czym pojawiają się nowe rodzaje surowców możliwych do wykorzystania w budownictwie.

Zrównoważone budownictwo potrzebuje kruszyw pochodzenia antropogenicznego ze względu na ich kluczową rolę w realizacji celów ekologicznych i gospodarczych, a energetyka potrzebuje świadomego partnera, który pomoże optymalnie zagospodarować efekty jej działalności. Szanse te można wykorzystać, powodując korzyści zarówno dla energetyki jak i budownictwa. W czasach rosnących cen materiałów i presji na zrównoważony rozwój, materiały antropogeniczne mogą stać się szansą, a potencjał ten należy wykorzystać.

Misja surowców antropogenicznych.

Co roku w Polsce powstaje ponad 20 milionów ton ubocznych produktów spalania energetycznego. Materiały te są substytutem kruszyw naturalnych dostępnych w dużych ilościach. Wykorzystuje się je w różnych gałęziach przemysłu, takich jak produkcja cementu, betonu oraz jako kruszywo w budownictwie i drogownictwie. Kruszywa antropogeniczne (np. popioły z energetyki, odpady przemysłowe) z powodzeniem zastępują tradycyjne surowce naturalne, co redukuje eksploatację naturalnych złóż i związane z nią zniszczenie krajobrazu oraz emisję pyłów i hałasu. Tym samym bezpośrednio wpływa na obniżenie śladu środowiskowego samego procesu produkcji materiałów budowlanych. Ich wykorzystanie może bezpośrednio przyczynić się do ochrony ekosystemów i bioróżnorodności, niszczonej przez tradycyjne metody wydobywania kruszyw naturalnych. Ochrona zasobów naturalnych oraz racjonalne i efektywne gospodarowanie zasobami już wytworzonymi jest bezpośrednim celem gospodarki obiegu zamkniętego. Tym samym minimalizuje ona

zużycie surowców i powstawanie odpadów, a jednocześnie zwiększa efektywność wykorzystania już dostępnych zasobów oraz związane z tym korzyści finansowe.

Branża energetyczna, w obliczu transformacji poza koniecznością bieżącego zagospodarowania na rynku swoich ubocznych produktów poprocesowych, mierzy się z nowym wyzwaniem związanym z koniecznością likwidacji zbędnej infrastruktury oraz „sprzątaniem” po zaniechanej działalności.

Dla części źródeł energetycznych podejmuje się próby przepaliwowania instalacji w związku z czym pojawiają się nowe rodzaje surowców możliwych do wykorzystania w budownictwie. W związku z tym będzie powstawał coraz większy strumień surowców pochodzących ze spalania biomasy czy paliw alternatywnych, które również mogą być wykorzystane w branży budowlanej.

Ponadto coraz częściej energetyka staje przed koniecznością podjęcia decyzji jak zakończyć funkcjonowanie infrastruktury energetycznej, w tym składowisk odpadów energetycznych, które również stanowią cenne źródło materiałów pochodzenia antropogenicznego. Szacuje się, że na składowiskach odpadów energetycznych w Europie jest zdeponowanych ponad 500 milionów ton surowców pochodzenia energetycznego. W Grupie TAURON potencjał w postaci materiałów zebranych na składowiskach sięga prawie 60 mln ton.

Likwidacja zbędnej infrastruktury energetycznej generuje również strumień nowych rodzajów materiałów powstających na bazie bardzo wysokiej jakości i czystości żelbetu pochodzącego z wyburzeń obiektów infrastruktury energetycznej. Odpowiednia realizacja procesu wyburzenia, a dalej przetworzenie i przekruszenie gruzu powstającego w trakcie wyburzeń generuje strumień bardzo dobrej jakości kruszywa z recyklingu betonu.

Zrównoważone budownictwo potrzebuje kruszyw pochodzenia antropogenicznego ze względu na ich kluczową rolę w realizacji celów ekologicznych i gospodarczych, a energetyka potrzebuje świadomego partnera, który pomoże efektywnie wykorzystać produkty jej działalności.

Szanse te można wykorzystać, powodując korzyści dla obu branż. Uruchomienie wspólnych działań zmierzać będzie do coraz szczelniejszego domykania obiegów surowcowych zgodnych z ideą gospodarki obiegu zamkniętego.

Rola BIOEKO Grupa TAURON w zmniejszaniu śladu środowiskowego Grupy TAURON i GOZ.

Działalność Bioeko Grupa TAURON od samego początku wpisuje się w ideę gospodarki w obiegu zamkniętym. Model biznesowy Spółki opiera się na założeniu, iż wartość produktów, materiałów i zasobów, którymi gospodaruje firma ma być utrzymywana w gospodarce tak długo, jak to tylko możliwe. Celem jest ograniczenie wytwarzania odpadów w Grupie TAURON do minimum. W tej koncepcji surowce są wielokrotnie wprowadzane do obiegu, nierzadko przechodząc z jednej gałęzi przemysłu do drugiej.

Spółka Bioeko od lat rozwija swoje zdolności techniczne w zakresie przetwarzania i gospodarowania ubocznymi produktami działalności energetycznej Grupy TAURON. Jako wyspecjalizowany podmiot Spółka została dedykowana w Grupie do realizacji

zadań związanych z gospodarką odpadami i produktami ubocznymi energetycznego spalania, a od niedawna również gospodarką odpadami powstającym w procesie dezynwastacji. Rozszerzając swoje kompetencje i sukcesywnie pozyskując zdolności techniczne w zakresie przetwarzania ubocznych produktów spalania oraz gruzu betonowego Bioeko wprowadza inicjatywy oparte o założenia gospodarki obiegu zamkniętego oraz umożliwia poprawę efektywności gospodarowania odpadami pochodzącymi z wyburzeń, remontów i dezynwastacji w Grupie TAURON, gdzie głównym celem jest minimalizacja ich ilości w Grupie.

Inicjowane przez Spółkę działania oparte na założeniach gospodarki obiegu zamkniętego zmierzają do maksymalnego wykorzystania surowców pochodzenia antropogenicznego często odpadowego, w przemyśle. Dzięki upowszechnianiu ich wykorzystania np. w budownictwie, drogownictwie mamy realny wpływ na zachowanie zasobów naturalnych, ponieważ wytwarzane w energetyce popioły i żużle są pełnowartościowym zamiennikiem kruszyw naturalnych.

Najnowsza inwestycja polegała na uruchomieniu instalacji do waloryzowania popiołów, która służy do poprawy jakości popiołów krzemionkowych wytwarzanych przez energetykę. Instalacja ta pozwala na wykorzystanie do procesu produkcji ponad 50 Mg/h popiołów. Na bazie popiołów o zróżnicowanej jakości wytwarzany jest wyrób budowlany - popiół lotny do betonu. Spełnia on wymagania europejskiego standardu EN 450-1 będąc pełnowartościowym dodatkiem do produkcji betonów.



Rysunek 1. Instalacja do waloryzowania popiołów Bioeko Grupa TAURON

Instalacja do waloryzowania popiołów jest nowoczesną wysoce efektywną energetycznie instalacją mobilną, która umożliwia precyzyjne dozowanie i mieszanie popiołów lotnych o różnej jakości, jego uśrednienie i ujednoludnienie w celu uzyskania

produktu o oczekiwanych parametrach. Linia produkcyjna jest sterowana komputerowo z możliwością precyzyjnego zadania receptury produkcyjnej, rejestracją danych i generowania raportów zużycia surowców i gotowego produktu, co bezpośrednio wpływa na transparentność, możliwość analizy oraz szybkiej korekty efektywności całego procesu jak i jakości uzyskiwanego produktu.

Mobilność instalacji dodatkowo pozwala zwiększyć efektywność całego procesu poprzez możliwość posadowienia jej bezpośrednio w miejscu powstawania popiołów, co znacząco minimalizuje transport surowców do procesu, zmniejszając tym samym ślad węglowy finalnego produktu.

Na finalny efekt ekologiczny całej inwestycji wpływa bezpośrednio fakt ograniczenia uciążliwości związanych z deponowaniem wytwarzanych przez energetykę odpadów na składowiskach, gdzie powodują one znaczne obciążenie środowiska naturalnego. Możliwość zwracania ich do ponownego wykorzystania w branży budowlanej, pozwala na ograniczanie wykorzystania surowców pochodzenia naturalnego.

Ochrona zasobów naturalnych i racjonalne, wydajne gospodarowanie substancjami pochodzenia antropogenicznego oraz domykanie obiegów i minimalizacja powstawania jakichkolwiek odpadów to bezpośredni cel i kontekst gospodarki o obiegu zamkniętym, realizowany we wszystkich inwestycjach i projektach Bioeko Grupa TAURON sp. z o.o.

Ślad węglowy produktów energetycznych.

Emisja CO₂ nie jest bezpośrednio związana z samym popiołem, lecz z procesem spalania węgla, który jest źródłem zarówno popiołu lotnego, jak i emisji CO₂. Podczas spalania węgla w kotłach pyłowych emitowany jest dwutlenek węgla (CO₂), który jest głównym gazem cieplarnianym. Emisja CO₂ z węgla kamiennego jest znacznie wyższa niż z paliw odnawialnych (takich jak biomasa) o około 15-17% na jednostkę energii wytworzonej. Ślad węglowy dla popiołów wytwarzanych przez energetykę można określać na różne sposoby i obecnie jest on interpretowany w zależności od potrzeb dla których zostaje on określany.

Popiół lotny sam w sobie nie emituje CO₂, ale jest produktem ubocznym procesu spalania, który wiąże się z emisją CO₂. Możliwości wykorzystania popiołu lotnego, np. w produkcji cementu, mogą pomóc w redukcji emisji CO₂ związanych z produkcją cementu, ale nie wpływają bezpośrednio na emisję podczas spalania węgla.

Wskaźniki emisji CO₂:

- Przykładowe obliczenia dla węgla o 92% zawartości węgla pierwiastkowego: Spalenie 1 miliona ton takiego węgla generuje około 3,373 mln ton CO₂. W przeliczeniu na jednostkę masy: Emisja CO₂ = 3,373 kg CO₂/kg węgla. Wynik ten opiera się na stechiometrii reakcji spalania, gdzie każdy kilogram węgla pierwiastkowego (C) przekształca się w $44 : 12 \approx 3,67$ kg CO₂. Dla węgla o 92% zawartości C: $0,92 \times 3,67 = 3,38$ kg CO₂/kg węgla. Oficjalne wskaźniki emisji Według Krajowego Ośrodka Bilansowania i Zarządzania Emisjami (KOBIZE), średni wskaźnik emisji CO₂ dla węgla kamiennego wynosi 94,6 kg CO₂/GJ. Przy wartości opałowej węgla kamiennego ok. 24 MJ/kg, emisja CO₂ na kilogram paliwa wynosi:

$24 \text{ MJ/kg} \times 94,6 \text{ kg/GJ} \times 0,001 \text{ GJ/MJ} = 2,27 \text{ kg CO}_2/\text{kg węgla}.$
Różnica między tymi wartościami wynika z metodyki obliczeń (np. uwzględniania niepełnego spalania).

Czynniki wpływające na emisję:

- Zawartość węgla pierwiastkowego: im wyższa, tym większa emisja CO₂.
- Sprawność kotła: nowoczesne kotły pyłowe osiągają sprawność do 45%, co redukuje ilość paliwa potrzebnego do wytworzenia jednostki energii.

Technologie redukcyjne: spalanie tlenowe (O₂PCC) pozwala zmniejszyć objętość spalin nawet trzykrotnie, co może ułatwić wychwytywanie CO₂. Energetyka chciałaby, aby poprzez produkcję dobrej jakości ubocznych produktów spalania i wprowadzania ich do obrotu (jako pełnowartościowe produkty będące zamiennikami kruszyw naturalnych) emisyjność procesu produkcji energii została zredukowana proporcjonalnie o wartość przypisaną ubocznym produktom spalania.

Branża budowlana stosując surowce i materiały wtórne oczekuje nie tylko korzyści ekonomicznych, ale również by materiały te były jak najmniej emisyjne. Celem jest osiągnięcie jak największej redukcji emisji wytwarzanych na tej bazie produktów i obiektów.

Aktualnie nie mamy jednoznacznych wytycznych jak wartościować emisyjność popiołów wytwarzanych przez energetykę, a dane dotyczące emisyjności poszczególnych popiołów wytwarzanych przez polskie elektrownie mogą się znacząco różnić co do metodologii i przyjętej filozofii liczenia śladu węglowego tych materiałów.

Emisja CO₂ ze spalania węgla kamiennego w kotłach pyłowych zależy od zawartości węgla pierwiastkowego w paliwie i efektywności procesu spalania.

Wartość emisji CO₂ wytwarzana w ramach procesu głównego produkcji energii w przeliczeniu na ilość wytwarzanego popiołu lotnego liczona wg. GHG Protocol (Greenhouse Gas Protocol) jest szacowany w ilościach odpowiednio:

- W Elektrowni Łaziska TAURON Wytwarzanie jednej tonie (Mg) wytwarzanych popiołów towarzyszy emisja 10,8 Mg (ton) CO₂e z procesu głównego produkcji energii.
- W Elektrowni Jaworzno III TAURON Wytwarzanie jednej tonie (Mg) wytwarzanych popiołów towarzyszy emisja 8,0 Mg (ton) CO₂e z procesu głównego produkcji energii.

Za wyznacznik „przydziału emisji CO₂” zawartość popiołu w węglu przyjmuje się, że ilość emisji jest wprost proporcjonalna do ilości wytwarzanego popiołu.

W składzie spalanego węgla kamiennego znajduje się średnio 25% popiołu, w związku z czym można założyć, że:

1 Mg węgla --> 2 Mg CO₂,

1 Mg węgla --> 0,25 Mg popiołu,

czyli emisyjność każdego z tych popiołów to 0,5 Mg CO₂.

Wartym podkreślenia jest fakt, że w trzecim wariancie szacowania emisyjności CO₂ z popiołu lotnego wytwarzanego w kotłach pyłowych istotą procesu energetycznego jest wytwarzanie energii, a nie popiołu (uboczny produkt spalania). W związku z czym można przyjąć, że w momencie powstania popiołów ich emisyjność wynosi 0, a dopiero dalsze operacje związane z ich transportem, przetwarzaniem i dalszym wykorzystaniem budują jego ślad węglowy.

Standardy obliczania śladu węglowego

GHG Protocol będący międzynarodowym standardem służącym do pomiaru i raportowania emisji gazów cieplarnianych, zawiera zbiór narzędzi i standardów opracowanych przez World Resources Institute i World Business Council for Sustainable Development, mających na celu pomiar i raportowanie emisji gazów cieplarnianych w trzech zakresach emisyjnych:

- Zakres 1: obejmuje bezpośrednie emisje gazów cieplarnianych z działalności organizacji (np. spalanie paliw w jej własnych instalacjach czy wycieki czynników chłodniczych).
- Zakres 2: dotyczy pośrednich emisji związanych z wytwarzaniem zakupionej energii elektrycznej, ciepła, chłodu i pary.
- Zakres 3: obejmuje wszystkie inne pośrednie emisje w łańcuchu wartości organizacji (np. z transportu, zakupionych materiałów czy utylizacji odpadów).

Standard ten wykorzystywany jest obecnie do liczenia śladów środowiskowych naszych organizacji w ramach raportowania niefinansowego zgodnie ze standardami European Sustainability Reporting Standards (ESRS).

W ramach corocznych raportów niefinansowych firmy sprawozdają postępy swoich działań w zakresie zrównoważonego rozwoju, który jest dźwignią budowania wartości firmy. Inwestując w zmniejszenie śladu węglowego swojej działalności, firmy mogą tym samym zyskać mocną przewagę konkurencyjną. Instytucje finansowe coraz częściej uwzględniają informacje o śladzie węglowym w procesach kredytowych, aby przekierować finansowanie z sektorów wysokoemisyjnych w stronę sektorów niskoemisyjnych lub na transformację energetyczną. Koszty finansowania mogą być powiązane ze stopniem zrównoważonego rozwoju w firmie. Na potrzeby raportowania niefinansowego wartość emisji CO₂ jest liczona jak w pierwszym opisanym wariantcie, zgodnie z GHG Protocol.

Co nas czeka w przepisach - Nowe regulacje warunkujące deklaracje śladu środowiskowego produktów

Sposób podejścia do wyznaczania śladu środowiskowego wyrobów, a w tym również popiołów lotnych zostanie wkrótce usystematyzowany poprzez wprowadzane zmiany w rozporządzeniu CPR, gdzie deklaracje środowiskowe produktów i normy z tym związane wprowadzą jednolite podejście do sposobu deklarowania emisji. Do tej pory deklaracje środowiskowe produktów EPD III typu (Environmental Product Declarations – EPD) są dokumentem dobrowolnym dostarczającym szczegółowych informacji o oddziaływaniu produktu na środowisko. Zmiana rozporządzenia Construction Products Regulation (CPR), w ramach zmian legislacyjnych związanych z zieloną transformacją wprowadzi obowiązek sporządzania tego dokumentu dla wyrobów budowlanych. Wykonanie deklaracji środowiskowej typu III, czyli EPD będzie jedną z kluczowych metod informowania o cechach środowiskowych wyrobów budowlanych.

Komisja Europejska opracowuje zestaw narzędzi (w tym zmian legislacyjnych) w celu dostosowania unijnej polityki klimatycznej, energetycznej, transportowej i podatkowej, aby osiągnąć cel redukcji emisji gazów cieplarnianych netto o co najmniej 55% do 2030 roku. Wprowadzenie nowych wymagań oceny zrównoważonego rozwoju wyrobów w ramach rozporządzenia CPR oraz system 3+ wpłynie istotnie na rynek budowlany i obowiązki producentów. Do tej pory ocena środowiskowa EPD wyrobów

była dobrowolna. W praktyce wszystkie wyroby budowlane na rynku UE będą posiadały charakterystykę środowiskową, a producent będzie musiał przeprowadzić szczegółową ocenę właściwości użytkowych wyrobów zbierając dane niezbędne do ustalenia wpływu środowiskowego (w tym w zakresie śladu węglowego). Jednostki notyfikowane będą walidowały proces oceny i zbierania danych. Pojawi się cyfrowy paszport produktów, który będzie gromadził i udostępniał wszystkie niezbędne dane dotyczące wyrobu w ujednoliconej, ustandaryzowanej formie.

Obliczanie środowiskowego cyklu życia wyrobu powinno być prowadzone przy użyciu metod ustalonych w drodze normalizacji (CEN). Normy te nie zostały jeszcze opublikowane, a pierwsze obowiązki w zakresie deklarowania śladu środowiskowego weszły w życie z początkiem 2025 roku.

Dla nowych wyrobów obliczanie cyklu życia powinno obejmować etapy całego życia wyrobu, od nabycia surowców lub pozyskania zasobów naturalnych po ich ostateczne unieszkodliwienie, w tym uwzględniając potencjalne korzyści i straty poza systemem wyrobu.

Komisja Europejska powinna udostępnić oprogramowanie do przeprowadzania takiej analizy, a w szczególności współczynniki charakteryzujące, które będą stosowane zgodnie z normą EN 15804 lub z przyszłymi normami oznaczonymi na rysunku nr 2 jako c-PCR, które są jeszcze w trakcie przygotowania. Najbardziej zaawansowane prace normalizacyjne dotyczą normy dla cementu, którego wytyczne powstają jeszcze o poprzednie wydanie rozporządzenia CPR.

Normy w nowelizacji					
EN 16757 cPCR Concrete	EN 17074 cPCR Glass	EN 16485 cPCR timber	Fpr EN 17662 cPCR Steel and Aluminium	prEN 16903 cPCR Plastic piping outside building	prEN XXXXX cPCR Masonry
EN 16908 cPCR Cement	EN 17213 cPCR Windows & doorsets	EN 17160 cPCR Ceramic tiles	prEN 18001 cPCR Curtain walling	prEN 16904 cPCR Plastic piping inside building	prEN XXXXX-1 cPCR Aggregates
EN 17610 cPCR Building hardware	EN 16810 cPCR Resilient, textile & laminate floor		prEN XXXXX cPCR on fibre cement	prEN 295-9 cPCR Clay pipes	prEN XXXXX-2 cPCR Aggregates
EN 17388-1 cPCR Flexible sheets for water proofing	EN 17328 cPCR Gypsum	prEN XXXXX cPCR for rooflights and roof hatches	prEN XXXXX cPCR for wood flooring	prEN XXXXX cPCR Ventilation components	prEN XXXXX cPCR Chimneys
EN 17388-2 cPCR Flexible sheets for water proofing	prEN XXXXX cPCR AAC	prEN XXXXX cPCR Geosynthetics	prEN XXXXX Sandwich panels	prEN XXXXX cPCR for wood flooring	
EN 16783 cPCR Insulation					

Rysunek 2. Obecne zaawansowanie przygotowania norm wprowadzających zasady oceny środowiskowej dla poszczególnych grup wyrobów

Zasadnicze charakterystyki horyzontalne do których powinniśmy się odnieść w deklaracjach, opracowane na podstawie załączników I i II na potrzeby CPR:

- reakcja na ogień,
- odporność ogniowa,
- odporność na ogień zewnętrzny,
- pochłanianie hałasu,
- uwalnianie i zawartość substancji niebezpiecznych,
- zrównoważenie środowiskowe.

Zasadnicze charakterystyki - to te cechy wyrobu, które odnoszą się do podstawowych wymagań dotyczących obiektów budowlanych określonych w załączniku I do rozporządzenia CPR, oraz te cechy, które wymienione są jako z góry ustalone zasadnicze charakterystyki środowiskowe w załączniku II do CPR, do których zaliczamy:

- a) Skutki zmian klimatu – ogółem (ślad węglowy globalny).
- b) Skutki zmiany klimatu – paliwa kopalne (ślad węglowy paliw kopalnych).
- c) Skutki zmiany klimatu – emisja biogeniczna (ślad węglowy od biomasy).
- d) Skutki zmian klimatu- użytkowanie gruntów i zmiana użytkowania gruntów (ślad węglowy od sposobu użytkowania gruntu).
- e) Zubożenie warstwy ozonowej.
- f) Potencjał zakwaszania.
- g) Eutrofizacja wody w akwenach słodkowodnych.
- h) Eutrofizacja wody w akwenach morskich.
- i) Eutrofizacja lądowa.
- j) Ozon fotochemiczny.
- k) Ubożenie zasobów abiotycznych- minerały, metale.
- l) Ubożenie zasobów abiotycznych- paliwa kopalne
- m) Zużycie wody.
- n) Częstki stałe.
- o) Promieniowanie jonizujące, zdrowie człowieka.
- p) Ekotoksyczność wody słodkiej.
- q) Działanie toksyczne dla ludzi, rakotwórcze.
- r) Oddziaływanie związane z użytkowaniem gruntu.

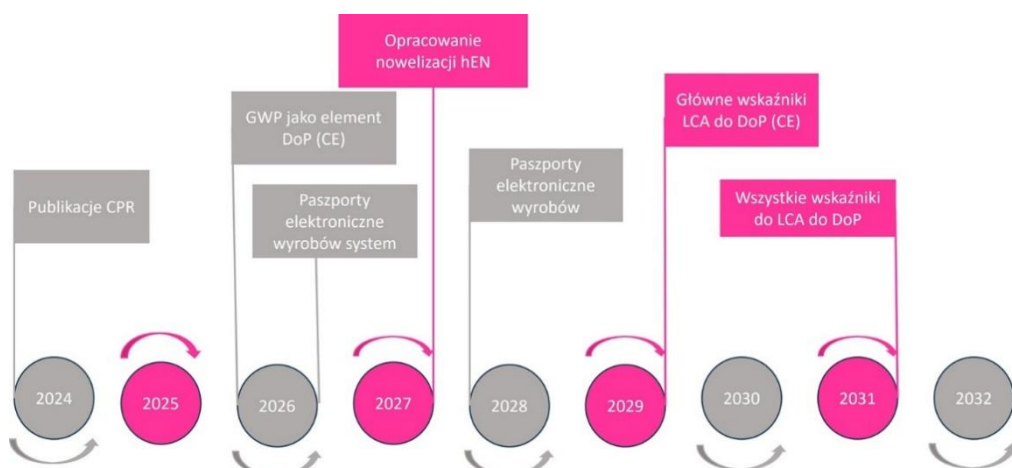
Obowiązek włączenia w deklaracje środowiskowe zasadniczych charakterystyk od a) do d) wejdzie w życie w I kwartale 2026 (pod warunkiem opublikowania nowelizacji hEN/EADs), natomiast charakterystyki od e) do l) zaczną obowiązywać najprawdopodobniej w IV kwartale 2029 roku. Charakterystyki od m) do r) wejdą w życie prawdopodobnie w IV kwartale 2031 roku.

Zharmonizowane specyfikacje techniczne muszą również obejmować, na ile to możliwe, z góry ustalone zasadnicze charakterystyki środowiskowe polegające na zdolności do tymczasowego wiązania węgla oraz innych sposobów usuwania dwutlenku węgla. Dodatkowo powinno się wskazać również zawartość węgla biogenicznego w wyrobie oraz można stosować metody szacowania i uwalniania węgla w procesie karbonatyzacji.

CPR nie wskazuje poza normą EN 15804 oraz odwołaniem się do oprogramowania żadnej metody obliczeniowej przywołanych wyżej charakterystyk. Oznaczać to może w domyśle, że charakterystyka będzie opracowana dokładnie tak jak dzisiaj robione jest to na potrzeby dobrowolnych deklaracji środowiskowych EPD.

Wskaźniki dotyczące odpadów i recyklingu w cyklu życia nie znajdują się jako bezpośrednio wymagane zgodnie z CPR, niemniej zostają przywołane pośrednio do zadeklarowania jak w EPD i najprawdopodobniej zostaną wskazane w normach hEN.

Perspektywa czasowa zadań do wdrożenia według nowego CPR została przedstawiona na rysunku nr 3.



Rysunek 3. Perspektywa czasowa zadań określonych w rozporządzeniu CPR

Podsumowanie

Liczymy na to, że zmiany wprowadzane rozporządzeniem CPR oraz tworzone obecnie normy wskażą jednolity kierunek wyznaczania śladu środowiskowego naszych produktów, tak by cała branża przyjęła jednolite podejście, a sposób prezentacji śladów węglowych naszych produktów był wyznaczany w sposób spójny dla całej branży i łatwy do porównania z innymi materiałami dostępnymi na rynku. Zadanie jakie przed nami stoi wygeneruje konieczność zebrania ogromnej liczby danych związanych z naszymi produktami. Mamy nadzieję, że przyczyni się to do upowszechnienia wykorzystania surowców wtórnych pochodzenia antropogenicznego, tak by dać pierwszeństwo co bezpośrednio przyczyni się do minimalizowania odpadów i maksymalnego wykorzystania surowców poprzez ich ponowne przetworzenie i powrotne wprowadzenie do obiegu. Chcielibyśmy by wykorzystanie materiałów i surowców wtórnych w budownictwie było nie tylko trendem ekologicznym, ale również ekonomicznym i społecznym. Pozwoli to na ochronę środowiska, oszczędności finansowe oraz budowanie zrównoważonej przyszłości.

dr inż. Marek Urbański¹,
prof. dr hab. inż. Elżbieta Szmigiera¹
prof. dr hab. inż. Piotr Woyciechowski¹

¹Wydział Inżynierii Lądowej, Politechnika Warszawska

Zaawansowana charakterystyka przyczepności zbrojenia kompozytowego do zmodyfikowanego betonu

Advanced bond characteristics of composite reinforcement to modified concrete

Streszczenie

Streszczenie. W ostatnich latach idea zrównoważonego rozwoju stała się wiodącym czynnikiem wpływającym na rozwój technologii betonu. Zastosowanie dodatków w postaci zeolitu i metakaolinitu może wpłynąć korzystnie na właściwości betonu takie jak przyczepność a także wytrzymałość na ściskanie, właściwości reologiczne oraz trwałość. W tym celu zbadano i porównano przyczepność prętów kompozytowych GFRP (Glass Fiber Reinforced Polymer) i BFRP (Basalt Fiber Reinforced Polymer) oraz prętów stalowych w betonie z dodatkami zeolitu i metakaolinitu. Badaniu poddano 27 próbek sześciennych w teście bezpośredniego wyciągania – pull-out i ustalono zależności przyczepność-poślizg oraz mechanizmy zniszczenia. Krzywe naprężenie przyczepności – poślizg wyznaczyły niektóre podstawowe różnice między prętami stalowymi a prętami GFRP i BFRP. Stwierdzono, że we wszystkich wykonanych testach uzyskane naprężenia przyczepności spełniają warunki normowych średnich i maksymalnych naprężeń przyczepności. Badania pokazały, że niezależnie od rodzaju betonu sposób utraty przyczepności prętów GFRP i BFRP różnił się zasadniczo od sposobu niszczenia prętów stalowych z powodu interakcji powierzchni pręta podczas procesu wyciągania. Największe maksymalne naprężenia przyczepności $t_{max} = 24,12$ MPa odnotowano w przypadku prętów BFRP dla betonu z dodatkiem zeolitu. Natomiast w betonie z dodatkiem metakaolinitu, maksymalne naprężenia przyczepności były także największe w przypadku prętów BFRP i wynosiły $t_{max} = 21,77$ MPa. Dodatek zeolitu do betonu zmniejszał ponad pięciokrotnie poślizg przy maksymalnym naprężeniu przyczepności, w przypadku prętów GFRP oraz ponad dwukrotnie dla prętów BFRP. Wykazano, że dodatek metakaolinitu w mniejszym stopniu wpływał na redukcję poślizgu prętów przy maksymalnej przyczepności. Dla prętów GFRP odnotowano 3,5-krotną redukcję a dla prętów BFRP ponad czterokrotną redukcję poślizgu w porównaniu ze zwykłym betonem. Najmniejszą redukcję poślizgu 19% zaobserwowano w przypadku prętów stalowych. Zastosowane dodatki mineralne charakteryzowały się dużą powierzchnią właściwą (zeolit 13500 cm²/g i metakaolinit 20 000 cm²/g) i wpłynęły na wyraźny wzrost wytrzymałości na rozciąganie betonu (18% i 10% odpowiednio). Wyniki badań jednak nie były tak jednoznaczne, co wskazuje, że oprócz powierzchni właściwej dodatku istotną rolę odgrywały także cechy technologiczne mieszanki betonowej oraz rodzaj interakcji w strefie kontaktu zaczyn- powierzchnia pręta. Wyjaśnienie tych kwestii powinno stanowić przedmiot dalszych badań.

Słowa kluczowe: Przyczepność, BFRP, GFRP, Test pull-out, Zeolit, Metakaolinit, Poślizg.

Abstract. In recent years, the idea of sustainable development has become a leading factor influencing the development of concrete technology. The use of additives in the form of zeolite and metakaolin can have a beneficial effect on concrete properties such as bond as well as compressive strength, rheological properties and durability. For this purpose, the bond strength of GFRP (Glass Fiber Reinforced Polymer) and BFRP (Basalt Fiber Reinforced Polymer) composite bars and steel bars in concrete with zeolite and metakaolin additives was tested and compared. 27 cubic samples were tested in the pull-out test and the bond-slip relationship and failure mechanisms were determined. The bond stress-slip curves outlined some basic differences between steel bars and GFRP and BFRP bars. It was found that in all performed tests the obtained bond stress meet the conditions of the standard average and maximum bond stress. The tests showed that, regardless of the type of concrete, the way the GFRP and BFRP bars lost their bond was fundamentally different from the way the steel bars failed due to the interaction of the bar surface during the pull-out test. The highest maximum bond stress $\tau_{\max} = 24.12$ MPa were recorded in the case of BFRP bars for concrete with the addition of zeolite. However, in concrete with the addition of metakaolin, the maximum bond stress were also the highest in the case of BFRP bars and amounted to $\tau_{\max} = 21.77$ MPa. The addition of zeolite to concrete reduced the slippage at maximum bond stress more than five times in the case of GFRP bars and more than twice for BFRP bars. It was shown that the addition of metakaolin had a lesser effect on the reduction of bar slippage at maximum bond stress. For GFRP bars, a 3.5 times reduction was noted, and for BFRP bars, a more than four times reduction in slip compared to plain concrete. The lowest slip reduction of 19% was observed for steel bars. The mineral additives used were characterized by a large specific surface area (zeolite 13,500 cm²/g and metakaolin 20,000 cm²/g) and significantly increased the tensile strength of concrete (18% and 10%, respectively). The test results, however, were not so clear, which indicates that in addition to the specific surface of the additive, the technological features of the concrete mix and the type of interaction in the contact zone between the matrix and the bar surface also played an important role. The clarification of these issues should be the subject of further research.

Keywords: Bond stress, BFRP, GFRP, Pull-out test, Zeolite, Metakaolin, Slip.

1. Wstęp

Innowacyjne działania w wyniku postępu technologicznego na przełomie wieków XX i XXI w zakresie materiałów budowlanych przyczyniły się do zmian w standardowych konstrukcjach betonowych, których prawidłowa praca wynika głównie ze zjawiska przyczepności między betonem a stalą zbrojeniową. Z uwagi na szeroką gamę innowacyjnych materiałów budowlanych, istnieje wiele możliwości zarówno modyfikacji składu tradycyjnego betonu jak i zastąpienie konwencjonalnej stali zbrojeniowej innymi materiałami kompozytowymi FRP (Fiber Reinforced Polymer)[1]. Zastosowanie prętów zbrojenia kompozytowego ma wiele zalet. Pręty kompozytowe są znacznie lżejsze niż pręty stalowe, co ułatwia ich transport oraz montaż. Ponadto, pręty kompozytowe są odporne na korozję oraz wykazują większą wytrzymałość na rozciąganie niż pręty stalowe, co wpływa na wydłużenie żywotności konstrukcji[2]. Jednakże zastosowanie prętów kompozytowych w konstrukcjach może być ograniczone, z uwagi na niską wartość parametrów sprężystości i brak wykazywania cech uplastycznienia, które są charakterystyczną cechą prętów stalowych. Wśród różnych rodzajów prętów FRP, pręty z polimeru wzmocnionego włóknem bazaltowym (BFRP) i polimeru wzmocnionego włóknem szklanym (GFRP) stały się obiecującą alternatywą dla tradycyjnego zbrojenia stalowego. Jednak zachowanie przyczepności prętów FRP w betonie pozostaje przedmiotem ciągłych badań [1].

Najszerzej stosowanymi kompozytami konstrukcyjnymi FRP są pręty wykonane z włókien szklanych (GFRP) z uwagi na cenę. W dalszej kolejności, pręty na bazie włókien bazaltowych (BFRP). BFRP to stosunkowo nowy rodzaj prętów zbrojeniowych, który może stanowić ekonomiczną alternatywę dla prętów GFRP. Pręty BFRP złożone z włókien bazaltowych i osnowy epoksydowej były przedmiotem badań i wykazały doskonałą odporność na warunki środowiskowe. Dane literaturowe dla belek z prętami BFRP potwierdziły ich przydatność w tym zakresie [3, 4]. Oba rodzaje prętów wykazują różne właściwości mechaniczne w zależności od składników.

Jedną z kluczowych właściwości mechanicznych prętów zbrojeniowych jest ich przyczepność do betonu. Współdziałanie betonu i zbrojenia jest możliwe dzięki przyczepności – tj. zdolności do przenoszenia sił pomiędzy dwoma materiałami budowlanymi. Na poprawę przyczepności zbrojenia wpływa z jednej strony rodzaj użebrowania a z drugiej wytrzymałość na ściskanie i rozciąganie betonu. Substytucja części cementu dodatkami mineralnymi w postaci zeolitu i/lub metakaolinitu wpływa na zwiększenie parametrów betonu a tym samym jego przyczepności.

Należy zaznaczyć że, zastosowanie dodatków mineralnych do betonu w postaci zeolitu i metakaolinitu znacząco wpływa na ograniczenie energochłonności konstrukcji z betonu zbrojonego. Jednocześnie jest czynnikiem, który znacząco oddziałuje na rzecz zrównoważonego rozwoju z uwagi na mało energochłonne składniki mineralne będące korzystną alternatywą części cementu. Produkcja każdej tony cementu portlandzkiego wymaga zużycia około 1,2 tony kamienia wapiennego, 0,11 tony standardowego węgla. Powoduje to wyemitowanie około 0,85-0,92 tony CO₂ oraz znaczną ilość NO_x [5, 6, 7]. Substytut cementu w postaci zeolitu lub metakaolinitu bez

wysokotemperaturowej kalcynacji lub spiekania, może zmniejszyć emisję CO₂ o około 70% podczas produkcji i użytkowania [8].

1. 1 Dodatki mineralne do betonu

W ostatnich latach idea zrównoważonego rozwoju stała się wiodącym czynnikiem wpływającym na rozwój technologii betonu. Coraz częściej podstawowe składniki betonu ulegają modyfikacji, polegającej na redukcji ilości cementu w mieszance betonowej. Zastosowanie dodatku na rzecz częściowej redukcji cementu, prowadzi do zmniejszenia emisji dwutlenku węgla do atmosfery, generowanego na drodze produkcji cementu. Poza pozytywnym wpływem na środowisko naturalne, zastosowanie dodatków może wpłynąć korzystnie na właściwości betonu takie jak wytrzymałość na ściskanie, właściwości reologiczne oraz trwałość. Wśród nich bardzo obiecujące są dodatki w postaci zeolitu i metakaolinitu.

Zeolit jest niewątpliwie najczęściej stosowanym naturalnym dodatkiem pochodzenia wulkanicznego. zeolit stanowi niedrogi dodatek do betonu o bardzo szerokim potencjalne zastosowania [9]. Badania Czapika i Cebulskiego [10] dotyczące zeolitu jako dodatku do betonu, pozwoliły na określenie maksymalnej ilości zeolitu, jako częściowego zamiennika cementu w mieszance betonowej, która wynosi 40%. Wpływ na zachowanie betonu z zeolitem przebadano [11] pod względem zastosowania zeolitu jako częściowego zamiennika cementu w postaci proszku zeolitowego oraz częściowego zamiennika kruszywa drobnego w postaci piasku zeolitowego.

Zeolity to glinokrzemiany o porowatej budowie zawierające duże ilości reaktywnych SiO₂ i Al₂O₃. Wstępne badania potwierdziły korzystny wpływ modyfikatora w postaci zeolitu na wzrost wytrzymałości na ściskanie i zginanie, ale tylko przy udziale tego modyfikatora poniżej 15% masy cementu. Dodatek zeolitu ponadto zwiększa trwałość konwencjonalnego betonu nie tylko poprzez zmniejszenie przepuszczalności betonu, a przede wszystkim poprzez poprawę odporności na reakcję kruszywa alkalicznego.

Z kolei wysoka aktywność pucolanowa metakaolinitu powoduje, że z powodzeniem może pełnić rolę substytutu cementu i być stosowany jako dodatkowy składnik betonów poprawiający jego szczelność [12].

Na podstawie badań Güneyisi i in. można określić pozytywny wpływ metakaolinitu na zmniejszenie wrażliwości betonu na działanie gazów, co więcej zależność ta jest silnie powiązana ze stosunkiem w/s (woda/spoiwo) [13]. Badania Rutkowskiej oraz Pieńkosz [14], analizujące wpływ zawartości 0%, 10%, 15% metakaolinitu w betonie, wykazały iż wzrost metakaolinitu oddziałuje na zmniejszenie reaktywności dodatku z kruszywem w tzw. reakcji alkaliczno–krzemianowej, bez wpływu na zjawisko karbonatyzacji. Dodatek pucolanowy, czyli metakaolinit zużywa CH, który jest odpowiedzialny za zwolnienie postępu karbonatyzacji w betonie [15]. Zastosowanie metakaolinitu jako 10% dodatku do betonu, umożliwia redukcję sorpcyjności co udowodnił Razak i in. [16].

Zastąpienie cementu metakaolinitem polepsza wytrzymałość na ściskanie o 10%, a na rozciąganie przy zginaniu o 50%. Ramezianpour, Nas i in. potwierdzili że, dodatek zwiększa moduł sprężystości betonu i wytrzymałość na ściskanie po 28 dniach. [17, 18]. Dodatkowo wpływ metakaolinitu jest we wszystkich przypadkach korzystniejszy w

odniesieniu do wytrzymałości na rozciąganie. [19, 20] Stosowanie metakaolinitu jako zamiennika części cementu w betonie ma ogromne znaczenie w budownictwie zrównoważonego rozwoju i ochrony środowiska w odniesieniu do konstrukcji budowlanych.

Dzięki zastosowanym dodatkom zeolitu i/lub metakaolinitu, następuje skuteczna redukcja zużywanego cementu bez znacznego wpływu na parametry wytrzymałościowe i odporność na czynniki środowiskowe.

1. 1 Badania przyczepności

Badania nad zachowaniem się przyczepności prętów z polimeru wzmocnionego włóknem szklanym (FRP) z betonem prowadzone są od kilkudziesięciu lat, z naciskiem na zrozumienie mechanizmów rządzących zachowaniem się połączenia FRP z betonem. Testy pull out są powszechnie stosowane w ocenie przyczepności stalowych prętów zbrojeniowych do betonu. Jednakże dobra przyczepność w testach pull out z dobrym skrępowaniem nie oznacza, że można uzyskać dobrą przyczepność w elemencie betonowym, gdzie odporność otuliny na rozłupanie określa graniczne obciążenie niszczące [21].

Badania Lutza wskazują na możliwość wystąpienia lokalnych naprężeń przyczepności, które osiągają ponad dwukrotnie większe wartości niż średnie naprężenie przyczepności. Lutz przeprowadził badania dotyczące zależności przyczepności od kąta klina betonu, wykazały że przy zniszczeniu kąt przyjmował wartości z zakresu 30° - 45° , a dla kąta mniejszego niż 30° osiągnięto bardzo słabą zależność między przyczepnością a poślizgiem [22]. Zastosowanie nieograniczonej otuliny, nie wpłynęło na otrzymanie nieograniczonej przyczepności., w tym przypadku o zniszczeniu przyczepności zadecydują czynniki związane ze zniszczeniem przy wrywaniu [23].

Solyom i in. przedstawili szeroko zakrojone badania eksperymentalne pull-out dotyczące wpływu właściwości powierzchniowych na przyczepność prętów z (FRP) w betonie. Zbadano szeroką gamę dostępnych na rynku prętów FRP o różnych profilach powierzchni (łącznie 13 różnych konfiguracji powierzchni). Wytrzymałość betonu wpływa na przyczepność nawet wtedy, gdy jest ona wyższa niż granica podana w literaturze (około 30 MPa). Ponadto wyniki wytrzymałości przyczepności wszystkich prętów FRP były konsekwentnie wyższe niż w przypadku prętów stalowych [24].

Huang L. i in. w wyniku testów pull-out stwierdzili, że średnia przyczepność prętów zbrojeniowych FRP zmniejsza się wraz ze wzrostem średnicy pręta zbrojeniowego. Natomiast szybkość obciążania ma niewielki wpływ na przyczepność [25].

Malvar et al. badali właściwości przyczepności czterech różnych rodzajów prętów zbrojeniowych CFRP o różnych odkształceniach powierzchni zakotwionych w lekkim betonie. Uzyskane wyniki dla różnych poziomów ściskania krępującego wskazują, że może być konieczne zastosowanie minimalnej wysokości żeber (oplotu) o wartości

około 6% średnicy, a maksymalne rozstawy żeber powinny wynosić trzykrotność średnicy [26].

2. Procedura badania

2.1 Cel i zakres badań

Przedmiotem przeprowadzonych badań było określenie przyczepności prętów BFRP i GFRP w modyfikowanym betonie w porównaniu z przyczepnością prętów stalowych w betonie. Pręty stalowe są szeroko stosowane jako zbrojenie w konstrukcjach betonowych od wieku, a ich właściwości przyczepności są dobrze znane. Jednak pręty FRP mają inne właściwości mechaniczne i fizyczne niż pręty stalowe, co może powodować różne zachowanie przyczepności w betonie. Porównując efektywność przyczepności prętów BFRP i GFRP z właściwościami prętów stalowych, badanie to zapewniło wgląd w unikalną charakterystykę przyczepności prętów FRP do betonu oraz pozwoliło określić różnice i podobieństwa w stosunku do konwencjonalnej przyczepności prętów stalowych do betonu. Uzyskane z badań ustalenia będą stanowić cenne źródło informacji dla inżynierów i badaczy w zrozumieniu potencjalnych korzyści i ograniczeń stosowania prętów FRP jako zbrojenia w konstrukcjach betonowych.

Przeprowadzono badania przyczepności dla trzech rodzajów betonu z zastosowaniem zbrojenia kompozytowego BFRP i GFRP oraz stalowego będącego zbrojeniem referencyjnym w teście belkowym. Celem badań była ocena możliwości zastosowania niekonwencjonalnych modyfikatorów w formie dodatków mineralnych w celu zwiększenia przyczepności kompozytowego zbrojenia z prętów FRP w wybranych elementach betonowych stosowanych w obiektach infrastruktury budowlanej. Przeprowadzono dobór składników i opracowano optymalną recepturę betonów w celu zwiększenia przyczepności do prętów FRP. Wytypowano dwie zmodyfikowane mieszanki betonowe z udziałem 10% dodatku zeolitu (Z) i 10% dodatku metakaolinitu (K) w stosunku do zwykłej mieszanki betonowej (C).

Łącznie przebadano w testach przyczepności pull-out 27 próbek z prętami podobnej średnicy 12 mm. Wśród nich zbadano 9 próbek z prętami GFRP, w tym po 3 w zwykłym betonie, w betonie z dodatkiem zeolitu oraz w betonie z dodatkiem metakaolinitu. W analogiczny sposób przebadano dwie pozostałe grupy próbek, a mianowicie 9 próbek z prętami BFRP oraz w celu porównania wyników badań przyczepności 9 próbek z konwencjonalnym zbrojeniem stalowym.

Wszystkie próbki użyte w teście pull-out wykonano z cementu portlandzkiego popiołowego CEM II/B-V 42,5R. Gęstość mieszanek betonowych podczas badań wynosiła 2270 kg/m^3 , natomiast stosunek w/c – 0,45. Konsystencja betonu klasy S3. Składy mieszanek betonowych przedstawiono w Tabeli 1.

Tabela 1 Zestawienie składów mieszanek betonowych w kg/m³

Składnik	C (zwykła)	Z (+zeolit)	K (+metakaolinit)
Cement	360	324	324
Woda	162	162	162
Żwir 2/8	574	574	574
Żwir 2/16	631	631	631
Piasek 0/2	708	708	708
Zeolit	–	36	–
Metakaolinit	–	–	36

Przed właściwym badaniem pull-out ustalono parametry wytrzymałościowe betonu. Wykonano próbki sześciennie o wymiarze 150 mm i walcowe o wymiarach 150 × 300 mm. Przeprowadzono trzy rodzaje badań wytrzymałościowych, na podstawie których określono wytrzymałość na ściskanie $f_{c,cube}$ i rozciąganie betonu f_{ct} przez rozłupanie oraz moduł sprężystości E_c a także odchylenie standardowe SD i współczynnik zmienności COV (Tab. 2).

Tabela 2 Właściwości wytrzymałościowe betonu w MPa (COV w %)

Typ	C (zwykły)			Z (+zeolit)			K (+metakaolinit)		
	średni a	SD	COV	średnia	SD	COV	średni a	SD	COV
$f_{c,cube}$	46,36	1,0 1	2,19	48,37	0,98	2,02	49,55	0,93	1,87
f_{ct}	2,70	0,3 5	12,84	3,22	0,33	10,3 9	2,96	0,43	14,68
E_c	30017	340	1,13	31958	113 8	3,56	36614	1339	3,66

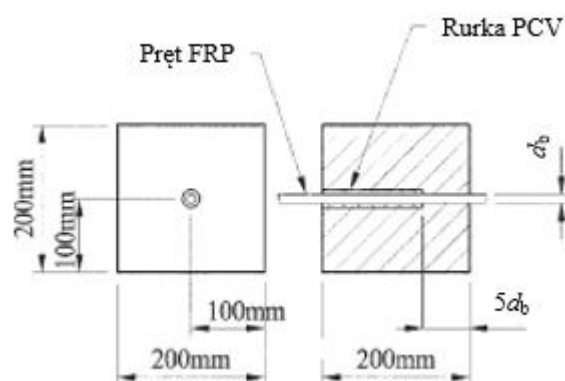
W tabeli 3 przedstawiono charakterystyki wytrzymałościowe prętów GFRP, stalowych i BFRP a mianowicie wytrzymałość na rozciąganie f_t , granicę plastyczności dla prętów stalowych f_y , moduł sprężystości podłużnej E_L , a także odchylenie standardowe SD i współczynnik zmienności COV.

Tabela 3. Właściwości wytrzymałościowe prętów w MPa (COV w %)

Typ	GFRP			Stal			BFRP		
	średnia	SD	COV	średnia	SD	COV	średnia	SD	COV
f_y	–	–	–	519,7	3,50	0,67	–	–	–
f_t	1033,3	30,49	2,95	615,8	3,64	0,59	1024,7	69,65	6,80
E_L	41892	3410	8,14	227293	25783	11,32	41470	3570	8,62

Do eksperymentalnego określenia zależności między przyczepnością a poślizgiem między prętem zbrojeniowym a betonem można zastosować próbkę pull-out z centrycznym rozmieszczeniem pręta zbrojeniowego (Rys.1). Ta metoda jest popularna, ponieważ zapewnia prosty sposób porównywania względnego zachowania przyczepności dla różnych prętów zbrojeniowych. Podstawowym wynikiem testu jest siła przyczepności próbki dla betonu o normalnej masie, co jest ważnym czynnikiem, który należy wziąć pod uwagę przy stosowaniu prętów FRP jako prętów zbrojeniowych

lub ciągnien. Badanie przyczepności wykonano wykorzystując wskazówki normy ACI 440.3R-12 [27]. Badane pręty obciążano z prędkością nie większą niż 20 kN/min (0,33 kN/s) lub przy prędkości biegu jałowego głowicy maszyny wytrzymałościowej nie większej niż 1,3 mm/min, (0,02 mm/s) w zależności od rodzaju zastosowanej maszyny wytrzymałościowej oraz środków przewidzianych do ustalania lub kontrolowania prędkości badania.



Rys.1 Schemat próbki pull-out do badania przyczepności

Próbka do badań została wykonana w postaci sześciennego kostki betonowej o boku 200 mm. Przyczepność między prętem zbrojeniowym i betonem była wyznaczana na odcinku o długości $5d$ licząc od nieobciążonej krawędzi próbki betonowej. Pozostała część pręta znajdowała się w osłonie w postaci rurki PVC i była pozbawiona przyczepności do betonu próbki. Urządzenia do pomiaru przemieszczenia (poślizgu) zostały zamontowane zarówno na swobodnym, jak i obciążonym końcu prętów FRP powinny być urządzeniami do pomiaru przemieszczenia, odczytującymi z dokładnością co najmniej do 0,01 mm. Zalecane są trzy czujniki LVDT w odstępach co 120 stopni na obciążonym końcu lub jeden miernik koncentryczny. Podczas badania mierzone są przemieszczenia prętów zarówno na swobodnym jak i obciążonym końcu próbek. Próbkę do badań umieszcza się na specjalnym wsporniku maszyny wytrzymałościowej. Po stronie nieobciążonej pręt powinien wystawać z betonowej powierzchni na wystarczającą długość, aby możliwe było przejście pręta przez bloki kotwiące i wspornik maszyny wytrzymałościowej oraz w celu zapewnienia odpowiedniej długości uchwytów czujników podczas przyłożenia obciążenia. Wiek betonu badanej belki powinien mieścić się w zakresie od 21 do 35 dni. Obciążenie powinno być realizowane w sposób ciągły. Badanie należy kontynuować, dopóki nie nastąpi całkowita utrata przyczepności w obu belkach. Średnie naprężenie przyczepności należy obliczyć zgodnie z równaniem (1) a dane dotyczące naprężenia przyczepności w funkcji poślizgu τ_b zarówno przy przemieszczeniu końca swobodnego, jak i końca obciążonego dla każdej próbki powinny być podane na wykresie.

$$\tau_b = \frac{F}{C_b \cdot l} \quad (1)$$

gdzie F jest obciążeniem w kN, C_b jest obwodem pręta wyznaczonym na podstawie jego ekwiwalentnej średnicy wyznaczonej zgodnie z procedurą ASTM D7205/D7205M [28]. Natomiast l jest odcinkiem pręta na której występuje przyczepność.

Poślizg na obciążonym końcu pręta należy obliczyć jako odczyt z miernika przemieszczenia pomniejszony o wydłużenie S_c pręta FRP na długości L_c między końcem odcinka przyczepności pręta a punktem mocowania urządzenia pomiarowego po stronie obciążonej pręta FRP, przy czym wydłużenie jest obliczane za pomocą równania (2).

$$S_c = \frac{F \cdot L_c}{E_L \cdot A} \quad (2)$$

gdzie E_L jest podłużnym modułem sprężystości pręta; A jest powierzchnią przekroju pręta obliczoną na podstawie ekwiwalentnej średnicy.

Naprężenia przyczepności obliczono dla czterech zmierzonych wartości poślizgu zgodnie z ACI 440.3R-12 [27] : $\tau_{0,05}$ – naprężenie przyczepności przy poślizgu 0,05 mm, $\tau_{0,1}$ – naprężenie przyczepności przy poślizgu 0,1 mm, $\tau_{0,25}$ – naprężenie przyczepności przy poślizgu 0,25 mm, oraz $\tau_{\max}$ – naprężenie przyczepności przy maksymalnej sile.

2.1. Przygotowanie próbek do testu pull-out

Wykonano 27 próbek w postaci sześciątów betonowych o wymiarze boku 200 mm do pomiaru przyczepności prętów GFRP, BFRP o średnicy nominalnej 12 mm, oraz dla porównania prętów stalowych o średnicy nominalnej 12 mm. Szczególną uwagę zwrócono na właściwe usytuowanie badanych prętów i odpowiednią długość końcówek prętów umożliwiającą zainstalowanie mierników laserowych IL065 do pomiaru poślizgu. W pierwszym kroku zastosowano specjalny system mocujący na obciążanym końcu rozciąganego pręta, tak aby nie nastąpiło przedwczesne zniszczenie materiału w strefie zakotwienia. Z uwagi na to, że pręty FRP są materiałem anizotropowym, wytrzymałość włókien w kierunku poprzecznym jest niewielka w porównaniu do wysokiej wytrzymałości w kierunku podłużnym pręta. W tym celu zaprojektowano stalową rurę o długości 250 mm. Długość rur kotwiących została ustalona na podstawie wcześniejszych badań próbnych. Na końcu rury kotwiącej zainstalowano stalową nasadkę z koncentrycznym otworem na badany pręt (Rys.2). Mocowanie pręta w stalowej rurze odbywało się przez wypełnienie wolnej przestrzeni między rurą a prętem specjalną zaprawą o wysokiej przyczepności. W drugim kroku niezakotwiony koniec pręta umieszczono w deskowaniu sześciennych próbek, tak aby z szalunku wystawał odcinek wystarczający do zamocowania uchwytów miernika do pomiaru poślizgu swobodnego (nieobciążonego) końca pręta. Wewnątrz deskowania pręt na odcinku $5d_b$ licząc od strony nieobciążonej pręt był pozbawiony osłony z rurki PVC w celu umożliwienia przyczepności do betonu. Pozostałą część pręta umieszczono w rurce PVC z uwagi na umożliwienie swobodnego odkształcenia podczas obciążania. Po zabetonowaniu próbek pozostawiono elementy deskowania w celu uniknięcia naprężeń w prętach, które mogłyby powstać podczas przenoszenia elementu na stanowisko badawcze. Test pull out polegał na jednostronnym rozciąganiu pręta zakotwionego w betonie, z drugiej strony pręt był nieobciążony (Rys. 3).



a)



b)

Rys. 2. Wykonanie próbek: a) Zakotwienie końców prętów, b) próbki po zabetonowaniu



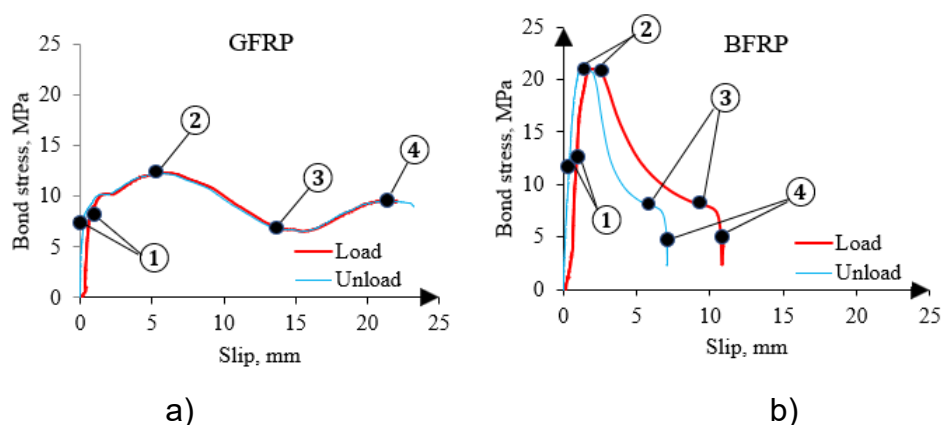
Rys. 3. Stanowisko do badania pull-out przyczepności prętów do betonu

W celu pomiaru poślizgu na obu końcach badanych prętów zainstalowano CMOS multi - function analog laser sensor Keyence IL065 o zakresie pomiarowym 50 mm i dokładności pomiarowej 2 μ m. Obciążenie było przekazywane przez siłownik o zakresie obciążenia 200 kN zamontowany przegubowo w urządzeniu wytrzymałościowym Walter + bai AG. W trakcie badania rejestrowano w sposób ciągły poślizg rozciąganego pręta na obu końcach próbki. Wyniki były rejestrowane w sposób ciągły, przez cały okres badania. Obciążenie zwiększało się monotonicznie w trakcie badania i było kontynuowane aż do osiągnięcia maksymalnego poślizgu.

3. Wyniki badań i analiza

Współdziałanie betonu i zbrojenia jest możliwe dzięki przyczepności – tj. zdolności do przenoszenia sił pomiędzy dwoma materiałami budowlanymi. Powstawanie rys w betonie jest konieczne, aby aktywować efekt przyczepności i aby zabetonowane zbrojenie np. w postaci prętów FRP, stalowych) było użyteczne. Analizę przyczepności przeprowadzono dla prętów GFRP, stalowych i BFRP do betonu normalnego, z dodatkiem zeolitu i dodatkiem metakaolinitu. Porównywano pręty GFRP i BFRP o użebrowaniu w postaci opłotu, z żebrowanymi prętami stalowymi o zbliżonej średnicy ekwiwalentnej. Ponieważ pręty kompozytowe różniły się średnicą ekwiwalentną, z uwagi na uwarunkowania technologiczne, postanowiono porównać przyczepność z zastosowaniem współczynnika średnicy ekwiwalentnej do nominalnej. Z uwagi na

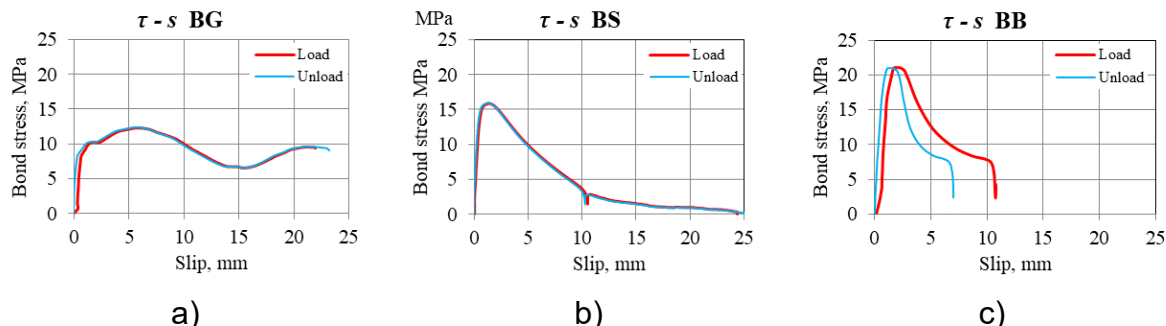
zbliżone średnice prętów naprężenia przyczepności można ocenić z dobrą dokładnością. Zgodnie z EN 1992-1 [29] wystarczające naprężenia przyczepności są zapewnione, jeśli średnie naprężenia przyczepności $\tau_m \geq 6,42$ MPa i maksymalne naprężenia przyczepności $\tau_{max} \geq 10,51$ MPa dla średnicy prętów równej 12 mm. We wszystkich przeprowadzonych testach średnie i maksymalne naprężenia przyczepności były większe od odpowiadającym im normowym naprężeniom przyczepności.



Rys. 4 Zależność naprężenia przyczepności – poślizg dla pręta a) GFRP i b) BFRP

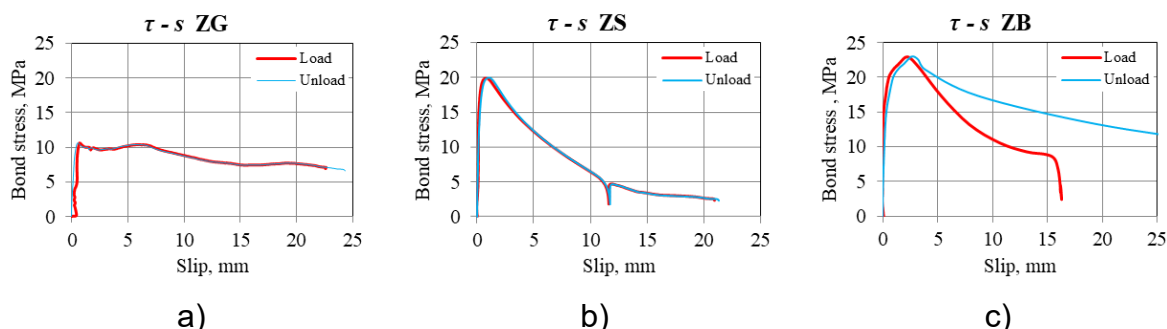
Utrata przyczepności nie następuje jednocześnie na obciążonym i swobodnym końcu betonowej próbki ze względu na jednostronne obciążenie pręta. Dlatego przebieg poślizgu wciąganej swobodnego końca próbki występuje z nieznacznym opóźnieniem. Krzywa naprężenia przyczepności - poślizg w teście pull-out składa się w przybliżeniu z czterech zakresów (Rys.4). Zakres ① charakteryzował się liniowym wzrostem dla którego poślizg był niezauważalny. Można uznać, że zakres ten reprezentuje tarcie i chemiczną adhezję przy niższych wartościach obciążeń. W drugim zakresie ② przyrost był nieliniowy aż do osiągnięcia maksymalnego naprężenia przyczepności przy zauważalnym nieliniowym wzroście poślizgu na obu końcach badanych próbek. Nieliniowy charakter wykresu wskazuje na stopniowe uszkodzenie na styku między betonem i prętem z uwagi na zjawisko mechanicznego blokowania oraz efektu zaklinowania. Przy znacznie mniejszych wartościach poślizgu dochodzi do wielokrotnej interakcji pomiędzy procesami adhezji chemicznej, tarcia i efektem zaklinowania. W trzecim zakresie ③ po osiągnięciu maksymalnej przyczepności, następuje spadek przyczepności przy wzrastającym poślizgu. Zakres ③ fizycznie reprezentuje stan w którym beton między żebrami pręta zaczyna się kruszyć. Zachowanie przyczepności w prętach GFRP i BFRP jest odmienne od zachowania prętów stalowych. W próbkach GFRP, po osiągnięciu maksymalnego naprężenia przyczepności krzywa łagodnie opadała do około 50% wartości maksymalnej a następnie w zakresie ④ wzrastała do wartości około 75% maksymalnej przyczepności z uwagi na mechaniczne blokowanie otaczającego pręt betonu. W próbkach BFRP w zakresie ③ krzywa przyczepność – poślizg opada nieliniowo przy spadku o połowę przyczepności w porównaniu do wartości maksymalnej naprężeń. W zakresie ④, następowało zmniejszenie naprężeń przyczepności w sposób ciągły z uwagi na to, że kolejne żebra wchodziły w obszar styku przyczepności co prowadziło do akumulacji uszkodzeń i przyspieszenia spadku naprężeń przyczepności.

Dla betonu normalnego, betonu z dodatkiem zeolitu i betonu z dodatkiem metakaolinitu na wykresach 5, 6, 7 pokazano wpływ naprężeń przyczepności $\tau_{\max}$ na poślizg s odpowiednio od lewej strony do prawej dla prętów GFRP, stalowego i BFRP.



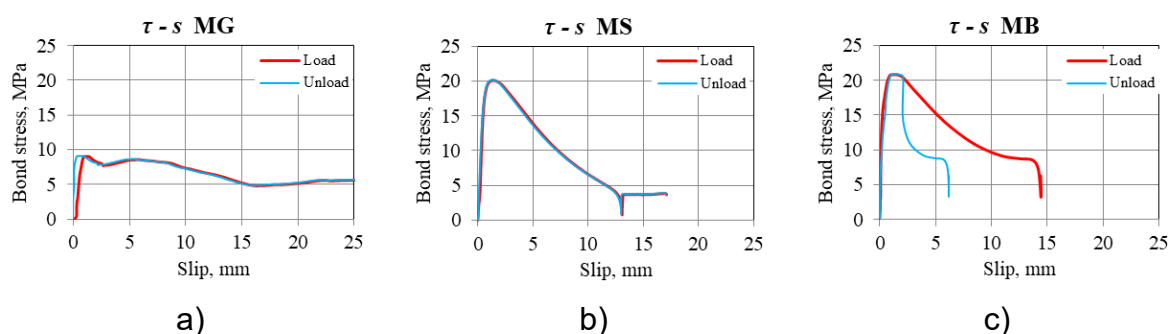
Rys. 5. Zależności naprężenia przyczepności – poślizg prętów dla betonu zwykłego: a) BG – pręt GFRP; b) BS – pręt stalowy c) BB – pręt BFRP (Load – poślizg obciążonego końca pręta, Unload – poślizg swobodnego końca pręta)

W zwykłym betonie uśredniony poślizg prętów przy maksymalnym naprężeniu przyczepności dla prętów GFRP wynosił 6,47 mm i był większy od poślizgu dla prętów stalowych 1,32 mm oraz dla prętów BFRP 4,58 mm. Charakterystyka krzywej naprężenia przyczepności – poślizg (jak w wyniku z Rys. 5) różniła się zdecydowanie dla prętów GFRP i BFRP w porównaniu z prętami stalowymi. W porównaniu do prętów stalowych zakres ② przyczepności dla prętów GFRP był 4 krotnie, natomiast dla prętów BFRP dwukrotnie większy. Zakres ③ (po przekroczeniu pików naprężeń przyczepności) był dla prętów GFRP podobny. Jednakże po osiągnięciu lokalnego minimum stanowiącego 55% wartości pików, przyczepność ponownie zaczęła rosnąć aż do osiągnięcia wtórnego pików przyczepności stanowiącego 78% pierwszego pików. Powodem takiego zachowania jest prawdopodobnie akumulacja naprężeń matrycy betonowej między kolejnymi żebrami pręta GFRP, która powoduje nasilenie mechanicznej blokady skutkujące ponownym efektem zaklinowania pręta. W przypadku prętów BFRP zakres ③ charakteryzuje się nieliniowym zmniejszeniem do 36% wartości pików przyczepności przy podobnym zakresie poślizgu jak w przypadku prętów stalowych. Zakres ④ w przypadku prętów BFRP charakteryzuje się gwałtownym spadkiem rezyduальной przyczepności w przeciwieństwie do prętów stalowych, które w tym zakresie wykazywały stopniowy, w zasadzie liniowy spadek przyczepności.



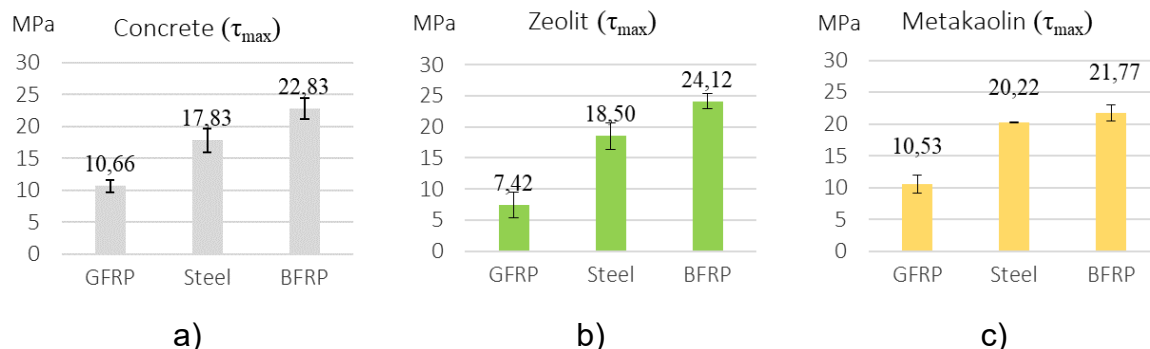
Rys. 6. Zależności naprężenia przyczepności – poślizg prętów dla betonu z dodatkiem zeolitu: a) BG – pręt GFRP; b) BS – pręt stalowy c) BB – pręt BFRP (Load – poślizg obciążonego końca pręta, Unload – poślizg swobodnego końca pręta)

W betonie z dodatkiem zeolitu średni poślizg prętów przy maksymalnym naprężeniu przyczepności dla GFRP wynosił 1,3 mm i był większy od średniego poślizgu dla stali – 1,05 mm oraz BFRP – 1,87 mm (Rys. 6). Dodatek zeolitu spowodował znaczące kilkukrotne ograniczenie zakresu ② nieliniowego przyrostu naprężeń przyczepności w przypadku prętów GFRP. Natomiast w prętach BFRP zakres ② zmniejszył się o połowę. W zakresie ③ w przypadku prętów GFRP zaobserwowano wyraźne plateau będące wynikiem sukcesywnego utrzymującego się oddziaływania kolejnych oplotów pręta. W przypadku prętów BFRP zakres ③ charakteryzuje się nieliniowym spadkiem do 36% wartości piku przyczepności przy podobnym zakresie poślizgu, podobnie jak w przypadku prętów stalowych. Należy zauważyć, że przyczepność mierzona po nieobciążonej stronie pręta charakteryzowała się znacznie mniejszym spadkiem (56%). Dla prętów GFRP w zakresie ④ wykres jest nieliniowy i pokazuje utrzymującą się przyczepność rezydualną o znacznej 66% wartości piku przyczepności. Zdecydowanie mniejszy wzrost przyczepności w zakresie ④ (23%) zaobserwowano dla prętów stalowych. Natomiast zachowanie przyczepności w zakresie prętów BFRP w zakresie ④ było podobne jak w przypadku betonu zwykłego.



Rys. 7. Zależności naprężenia przyczepności – poślizg prętów dla betonu z dodatkiem metakaolinitu: a) BG – pręt GFRP; b) BS – pręt stalowy c) BB – pręt BFRP (Load – poślizg obciążonego końca pręta, Unload – poślizg swobodnego końca pręta)

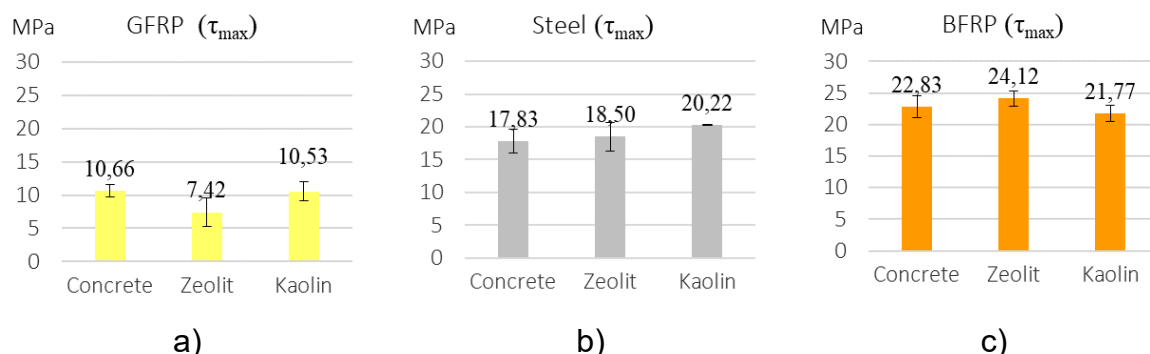
W betonie z dodatkiem metakaolinitu średni poślizg prętów przy maksymalnym naprężeniu przyczepności dla GFRP wynosił 1,87 mm i był większy od średniego poślizgu dla stali 1,24 mm oraz większy od poślizgu BFRP 1,07 mm (Rys. 7). W porównaniu z betonem zwykłym nastąpiło znaczące zawężenie zakresu ② zarówno w przypadku prętów GFRP jak i BFRP. Natomiast dla prętów GFRP w stosunku do betonu z dodatkiem zeolitu zakres ② był o połowę dłuższy. Przeciwnie, w przypadku prętów BFRP zakres ② był o połowę krótszy. W zakresie ③ (po przekroczeniu piku naprężeń przyczepności) w prętach GFRP zaobserwowano wyraźne plateau będące wynikiem sukcesywnego utrzymującego się oddziaływania kolejnych oplotów pręta. W przypadku prętów BFRP zaobserwowano zdecydowanie mniejszy spadek przyczepności (41%) w stosunku do wartości piku przyczepności, niż dla zwykłego betonu i betonu z dodatkiem zeolitu. Natomiast zachowanie przyczepności w zakresie ③ dla prętów stalowych było analogiczne jak dla poprzednich rodzajów betonu. W zakresie ④ rezydualna przyczepność prętów GFRP utrzymywała się na wysokim 56% poziomie piku naprężeń przyczepności. Przyczepność prętów BFRP w zakresie ④ malała gwałtownie, analogicznie jak w poprzednich rodzajach betonu. Natomiast przyczepność prętów stalowych w zakresie ④ wynosiła 18% piku przyczepności.



Rys. 8. Przyczepność prętów GFRP, stalowych i BFRP zależna od rodzaju betonu: a) bez dodatków, b) z dodatkiem zeolitu, c) z dodatkiem metakaolinitu

Dla betonu normalnego maksymalne naprężenia przyczepności $\tau_{\max}$ dla prętów GFRP wynosiły 10,66 MPa i były mniejsze od przyczepności pozostałych rodzajów prętów. Dla prętów stalowych $\tau_{\max} = 17,83$ MPa i były większe od przyczepności prętów GFRP o 67,3 % (Rys.8) . Największe naprężenia przyczepności odnotowano dla prętów BFRP, które wynosiły 22,83 MPa i były większe od przyczepności prętów GFRP o 114,2 % a od przyczepności prętów stalowych o 28,0 % . W przypadku betonu z dodatkiem zeolitu maksymalne naprężenia przyczepności $\tau_{\max}$ dla prętów GFRP wynosiły 7,42 MPa i były mniejsze od przyczepności pozostałych rodzajów prętów. Dla prętów stalowych $\tau_{\max} = 18,50$ MPa i były większe od przyczepności prętów GFRP o 149,3 % . Największe naprężenia przyczepności odnotowano dla prętów BFRP, które wynosiły $\tau_{\max} = 24,12$ MPa i były większe od przyczepności prętów GFRP o 225 % i od prętów stalowych o 30,4 % (Rys.9). W obecności betonu z dodatkiem metakaolinitu maksymalne naprężenia przyczepności dla prętów GFRP wynosiły 10,53 MPa i były mniejsze od przyczepności pozostałych rodzajów prętów. Dla prętów stalowych $\tau_{\max} = 20,22$ MPa i były większe od przyczepności prętów GFRP o 92 % . Największe naprężenia przyczepności odnotowano dla prętów BFRP, które wynosiły $\tau_{\max} = 21,77$ MPa i były większe od przyczepności prętów GFRP o 106,7% i większe od przyczepności prętów stalowych o 7,7 % (Rys.8).

Zmianę maksymalnych naprężenia przyczepności zależnych od wpływu dodatków zeolitu i metakaolinitu do betonu prętów GFRP, stali i BFRP pokazano na Rys. 9.



Rys. 9. Przyczepność prętów zależna od rodzaju betonu dla prętów : a) GFRP, b) stalowych i c) BFRP

W betonie z dodatkiem zeolitu maksymalne naprężenia przyczepności prętów GFRP uległy redukcji o 30,4 % w porównaniu z zwykłym betonem. Natomiast w obecności metakaolinitu zaobserwowano niewielki spadek naprężeń przyczepności o

1 % w porównaniu do betonu zwykłego. W przypadku prętów stalowych nastąpił wzrost przyczepności o 3,8 % i 13,4 % do betonu z dodatkiem zeolitu i metakaolinitu odpowiednio w porównaniu do betonu zwykłego. Przyczepność prętów BFRP wzrosła w obecności dodatku zeolitu do betonu o 5,7 % i zmalała o 4,7 % w przypadku metakaolinitu w porównaniu ze zwykłym betonem. W przypadku prętów BFRP mimo większego rozstawu oplotu w stosunku do żeber w stalowym pręcie, przyczepność jest większa niż dla prętów stalowych. Utrata przyczepności w przypadku prętów GFRP i BFRP spowodowana była pełnym odkształceniem żeber w postaci oplotu. Można stwierdzić, że w mechanizmie przyczepności dominuje deformacja oplotu. Uszkodzenia były inicjowane u nasady oplotu, a następnie propagowały na zewnątrz. Ostatecznie, powierzchnia ścinania pojawiała się na styku betonu i oplotu zarówno prętów GFRP i BFRP. Mechanizm przyczepności jest determinowany głównie przez mechaniczne zazębianie wywoływane przez oplot prętów kompozytowych.

4. Wnioski

Przeprowadzone badania miały na celu określenie przyczepności prętów BFRP i GFRP w betonie modyfikowanym za pomocą testów pull-out. Przeanalizowany i porównany został wpływ właściwości betonu i charakterystyki prętów na zachowanie się przyczepności.

1. We wszystkich testach stwierdzono spełnienie warunków standardowych średnich i maksymalnych naprężeń przyczepności.

2. Największe maksymalne naprężenia przyczepności $\tau_{\max} = 24,12$ MPa odnotowano w przypadku prętów BFRP dla betonu z dodatkiem zeolitu, które były większe odpowiednio o 225 % i 30,4 %, w porównaniu do prętów GFRP i stalowych. Natomiast w obecności w betonie dodatku metakaolinitu maksymalne naprężenia przyczepności prętów BFRP wynosiły $\tau_{\max} = 21,77$ MPa i były większe odpowiednio o 106,7 % i 7,7 %, w porównaniu do prętów GFRP i do prętów stalowych.

3. Dodatek zeolitu do betonu zmniejsza ponad pięciokrotnie poślizg przy maksymalnym naprężeniu przyczepności w przypadku prętów GFRP oraz ponad dwukrotnie dla prętów BFRP. Najmniejszą redukcję poślizgu 19 % zaobserwowano w przypadku prętów stalowych. Natomiast dodatek metakaolinitu w mniejszym stopniu wpływa na redukcję poślizgu prętów przy maksymalnej przyczepności. Dla prętów GFRP odnotowano 3,5 krotną redukcję, dla prętów BFRP ponad 4 krotną a dla prętów stalowych nieznaczną 6 % w stosunku do zwykłego betonu.

Wyniki badań dostarczyły cennych informacji do projektowania i wdrażania konstrukcji z betonu zbrojonego FRP co przyczyni się do opracowania ulepszonych modeli przyczepności prętów FRP w betonie.

Podziękowania: Autorzy dziękują firmie Astra za dostarczenie do badań prętów GFRP i BFRP oraz dodatków do betonu, zeolitu i metakaolinitu. Badania były prowadzone w ramach Grantu 35.2022 RND PW.

Literatura

- [1] Garbacz, A.; Urbański, M.; Łapko, A.: BFRP bars as an alternative reinforcement of concrete structures-Compatibility and adhesion issues, *Advanced Materials Research*, vol. 1129, 233-241, (2015), <http://dx.doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.1129.233>
- [2] Wang, X. Wang, Z. Wu , F. Cheng, „Shear behavior of basalt fiber reinforced polymer (FRP) and hybrid FRP,” *Construction and Building Materials*, vol. 24(09) pp. 781-789, 2014, <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.09.104>
- [3] Łapko, A.; Urbański. M.: Experimental and theoretical analysis of concrete beams deflections reinforced with basalt rebar, *Archives of Civil and Mechanical Engineering*; Nr 15 (2015), ACME Elsevier, Wrocław 2015, 223 -230 pp. ISSN 1644-9665 <http://dx.doi.org/10.1016/j.acme.2014.03.008>
- [4] Urbanski, M.; Łapko, A.; Suprynowicz, K.: Analysis of the Crack Propagation Process in BFRP Beams with Digital Image Correlation Method, *Proceedings of the 26th Symposium on Experimental Mechanics of Solids*, Jachranka, 22-25 10 2014, <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/SSP.240.55>
- [5] Shobeiri, V.; Bennett, B.; Xie, T.; Visintin, P., A comprehensive assessment of the global warming potential of geopolymers concrete. *J. Cleaner Prod.* 2021, 297. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.126669>
- [6] Groves, M. C. E.; Sasonow, A., Uhde EnviNOx® technology for NOX and N2O abatement: a contribution to reducing emissions from nitric acid plants. *J. Integr. Environ. Sci.*, 2010, 7, 211-222. <https://doi.org/10.1080/19438151003621334>.
- [7] Elizondo-Martínez, E.-J.; Andrés-Valeri, V.-C.; Jato-Espino, D.; Rodríguez-Hernandez, J., Review of porous concrete as multifunctional and sustainable pavement. *J. Build. Eng.*, 2020, 27, (C). <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2019.100967>.
- [8] Naqi, A.; Jang, J., Recent Progress in Green Cement Technology Utilizing Low-Carbon Emission Fuels and Raw Materials: A Review. *Sustainability*. 2019, 11, (2). <https://doi.org/10.3390/su11020537>.
- [9] Vejmelková E.; Dana Koňáková, D.; Kulovaná, T.; Keppert, M.; Žumár, J.; Rovnaníková P.; Keršner, Z.; Sedlmajer, M.; Černý, R.: „Engineering properties of concrete containing natural zeolite as supplementary cementitious material: Strength, toughness, durability, and hygrothermal performance”, *Cem Concr Compos*, t. 55, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2014.09.013>
- [10] Czapik P.; Cybulski M.: „The Properties Of Cement Mortar With Natural Zeolite and Silica Fume Additions”, *Structure and Environment* No. 2/2018, vol. 10, p. 105. <https://doi.org/10.30540/sae-2018-010>
- [11] Madhuri, P.V.; B. Kameswara Rao, B.; Chaitanya,A.: „Improved performance of concrete incorporated with natural zeolite powder as supplementary cementitious material”, *Materials Today*, *Proceedings*, Volume 47, Part 15, 2021, Pages 5369-5378, <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.06.089>

- [12] Rashad, A. M.; Metakaolin as cementitious material: History, scours, production and composition – A comprehensive overview. *Construction and Building Materials*, 2012, 41, 303-318. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.12.001>.
- [13] Güneyisi, E; Gesoğlu, M; Karaoğlu, S.; i Mermerdaş, K.: „Strength, permeability and shrinkage cracking of silica fume and metakaolin concretes”, *Constr Build Mater*, Volume 34, September 2012, Pages 120-130, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.02.017>
- [14] Rutkowska, G.; Pienkosz, K.: „Wpływ metakaolinitu, jako częściowego zamiennika cementu, na wybrane właściwości betonu (ASTRA MK40)”, *Acta Scientiarum Polonorum. Architectura*, t. 13, nr 4, strony 31-42, 2014.
- [15] Shi, Z. et al. (2015). Durability of Portland Cement Blends Including Calcined Clay and Limestone: Interactions with Sulfate, Chloride and Carbonate Ions. In: Scrivener, K., Favier, A. (eds) *Calcined Clays for Sustainable Concrete*. RILEM Bookseries, vol 10. Springer, Dordrecht. https://doi.org/10.1007/978-94-017-9939-3_17
- [16] Razak, H.A.; Chai, H.K.; Wong, H.S.: „Near surface characteristics of concrete containing supplementary cementing materials”, *Cem Concr Compos*, t. 26, nr 7, 2004. *Cement and Concrete Composites* 26(7):883-889, <http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2003.10.001>
- [17] Ramezaniapour, A.A.; Bahrami Jovein H.: „Influence of metakaolin as supplementary cementing material on strength and durability of concretes”, *Constr Build Mater*, t. 30, 2012. Volume 30, May 2012, Pages 470-479, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.12.050>
- [18] Nas, M.; Kurbetci, S.: „Durability properties of concrete containing metakaolin”, *Advances in Concrete Construction*, Vol. 6, No. 2 (2018) 159-175, <https://doi.org/10.12989/acc.2018.6.2.15>
- [19] Sudagar A.; Andrejkovičová, S.; Patinhaa, C.; Velosa, A.; McAdam, A.; Ferreira da Silva, E.; Rocha, F.; A novel study on the influence of cork waste residue on metakaolin-zeolite based geopolymers. *Applied Clay Science*. 2018, 152, 196-210. <https://doi.org/10.1016/j.clay.2017.11.013>
- [20] Bakera, A.T.; Alexander, M.G.; Use of metakaolin as a supplementary cementitious material in concrete, with a focus on durability properties. *RILEM Technical Letters* (2019) 4: 89-102. <http://dx.doi.org/10.21809/rilemtechlett.2019.94>
- [21] Achillides, Z., Pilakoutas, K., and Waldron, P. (1997a). “Modelling of FRP rebar bond behaviour.” *Proc., 3rd Int. Symp. on Non-Metallic (FRP) Reinforcement for Concrete Structures*, 14–16, Japan Concrete Society, Sapporo, Japan, 423–430 pp.
- [22] Lutz Leroy A.; Peter Gergely, P.: „Mechanics of Bond and Slip of Deformed Bars in Concrete”, 1967. 711-721 pp., <http://dx.doi.org/10.14359/7600>
- [23] Thompson, K.M.; Jirsa, J. O. ; Breen, J. E.; Klingner, R. E.: „Anchorage behavior of headed reinforcement : literature review”, *Research Report 1855-1*, t. 7, nr 22, 2002.
- [24] Solyom, S.; György L.; Balázs, A: Bond of FRP bars with different surface characteristics. *Construction and Building Materials* 264 (2020) 119839, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.119839>

- [25] Lihua Huang, Jian Chen, Jiting Qu, Qianqian Dai: Modeling for bond-constitutive relationships of FRP rebars to concrete matrix. Construction and Building Materials 263 (2020) 120654. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120654>
- [26] Malvar LJ, Cox JV, Bergeron Cochran K. Bond between carbon fiber reinforced polymer bars and concrete I: experimental study. J Compos Construct 2003;7(2):154–63. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1090-0268\(2003\)7:2\(154\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1090-0268(2003)7:2(154))
- [27] ACI 440.3R-12, Guide test methods for fiber-reinforced polymers (FRPs) for reinforcing or strengthening concrete structures.
- [28] ASTM D7205 / D7205M - Standard Test Method for Tensile Properties of Fiber Reinforced Polymer Matrix Composite Bars. American Society of Testing and Materials: West Conshohocken, PA.2006, 12.
- [29] PN-EN 1992-1-1: Projektowanie konstrukcji z betonu. Część 1-1: Reguły ogólne i reguły dla budynków. PKN Warszawa, 2008.

dr inż., Beata Jaworska
Politechnika Warszawska
inż., Jakub Józefczuk
Politechnika Warszawska
mgr inż., Dominika Stańczak
Politechnika Warszawska
dr inż., Maja Kępniak
Politechnika Warszawska

Wpływ skarbonatyzowanego drobnego kruszywa z recyklingu zapraw o różnych współczynnikach w/c na wybrane właściwości mechaniczne zaprawy

Influence of carbonated fine aggregate from recycled mortars with different w/c ratios on selected mechanical properties of mortar

Streszczenie

Efekt cieplarniany wynikający z emisji CO₂ stanowi jedno z kluczowych wyzwań związanych ze zmianami klimatu. Przemysł budowlany odpowiada za około 39% globalnych emisji CO₂, dlatego poszukuje się metod ich redukcji, m.in. poprzez sekwestrację CO₂ w materiałach budowlanych. Kompozyty cementowe mogą wiązać CO₂ w procesie karbonatyzacji, co przyczynia się do zmniejszenia ich śladu węglowego. W pracy przeanalizowano możliwość sekwestracji CO₂ przez kruszywo z recyklingu oraz oceniono wpływ skarbonatyzowanego kruszywa na właściwości mechaniczne zapraw cementowych. Przeprowadzono badania ilości pochłoniętego CO₂ oraz analizę wytrzymałości zapraw zawierających 10% skarbonatyzowanego kruszywa po 28 i 90 dniach pielęgnacji. Przygotowano szesnaście kompozytów, w których część naturalnego kruszywa zastąpiono kruszywem z recyklingu uzyskanym z betonów o różnym współczynniku w/c. Połowa próbek zawierała kruszywo skarbonatyzowane, a połowa niesarbonatyzowane. Zaprawa normowa posłużyła jako punkt odniesienia. Po 90 dniach wytrzymałość na zginanie i ściskanie wzrosła we wszystkich próbkach w porównaniu do 28 dni, przy czym wpływ karbonatyzacji kruszywa był bardziej widoczny na wcześniejszym etapie dojrzewania. Po 28 dniach próbki ze skarbonatyzowanym kruszywem wykazywały wyższą wytrzymałość na zginanie, szczególnie w przypadku próbek z kruszywem z zapraw o w/c = 0,40–0,55. Po 90 dniach różnice te zmniejszyły się, co sugeruje, że naturalne dojrzewanie betonu wyrównuje właściwości mechaniczne. Wytrzymałość na ściskanie wzrosła

w mniejszym stopniu niż na zginanie. Po 28 dniach karbonatyzowane kruszywo miało umiarkowany wpływ na jej poprawę, jednak po 90 dniach wartości dla próbek z kruszywem skarbonatyzowanym i nieskarbonatyzowanym były zbliżone. Wzrost wytrzymałości na ściskanie po 90 dniach wynosił 3–10%, a wpływ karbonatyzacji był mniej wyraźny. Próbką referencyjna osiągała najwyższe wartości, co wskazuje, że karbonatyzacja kruszywa nie zawsze kompensuje wpływ niższego w/c na wytrzymałość. Karbonatyzacja kruszywa przyspiesza poprawę właściwości mechanicznych w krótkim okresie, ale w dłuższym czasie procesy hydratacji spoiwa wyrównują jej efekt. Wyniki wskazują, że może poprawiać wytrzymałość na zginanie, lecz jednocześnie osłabiać zdolność materiału do przenoszenia obciążeń ściskających.

Abstract

The greenhouse effect caused by CO₂ emissions is one of the key challenges related to climate change. The construction industry is responsible for approximately 39% of global CO₂ emissions; thus, methods of reducing these emissions are being sought, including CO₂ sequestration in building materials. Cementitious composites can bind CO₂ through carbonation, contributing to a reduced carbon footprint. This study analyzed the potential for CO₂ sequestration by recycled aggregate and assessed the impact of carbonated aggregate on the mechanical properties of cement mortars. The amount of absorbed CO₂ and the strength of mortars containing 10% carbonated aggregate were tested after 28 and 90 days of curing. Sixteen composite mixtures were prepared, in which part of the natural aggregate was replaced with recycled aggregate obtained from concretes with different water-to-cement (w/c) ratios. Half of the samples contained carbonated aggregate, and the other half non-carbonated. Standard mortar was used as a reference. After 90 days, flexural and compressive strengths increased in all samples compared to those tested at 28 days, with the effect of carbonation being more pronounced at the earlier curing stage. After 28 days, mortars with carbonated aggregate exhibited higher flexural strength, particularly in samples containing aggregate from mortars with w/c = 0.40–0.55. After 90 days, these differences diminished, suggesting that natural curing processes tend to balance mechanical properties over time. The increase in compressive strength was less significant than in flexural strength. After 28 days, carbonated aggregate had a moderate impact on improving compressive strength, but after 90 days, values for samples with carbonated and non-carbonated aggregates were similar. The increase in compressive strength after 90 days ranged from 3–10%, with the influence of carbonation being less distinct. The reference sample achieved the highest strength values, indicating that aggregate carbonation does not always compensate for the reduced strength associated with lower w/c ratios. While carbonation accelerates the short-term improvement of mechanical properties, prolonged binder hydration tends to level out its effects. The results suggest that carbonation may enhance flexural strength but may also reduce the material's ability to bear compressive loads.

1. Wprowadzenie

Do chwili obecnej globalna antropogeniczna emisja dwutlenku węgla (CO₂) osiągnęła bezprecedensowy poziom w historii ludzkości, wynosząc około 37,5 miliarda ton

w 2022 roku [1]. Przemysł cementowy stanowi drugie co do wielkości źródło emisji CO₂, odpowiadając za ponad 7% całkowitych emisji antropogenicznych [2]. W tym kontekście technologia wychwytu, wykorzystania i składowania dwutlenku węgla (CCUS) jest wskazywana jako jedna z kluczowych strategii ograniczania emisji gazów cieplarnianych oraz łagodzenia skutków zmian klimatu [3]. Jedną z najbardziej obiecujących metod w ramach CCUS jest karbonatyzacja mineralna, polegająca na reakcji CO₂ z wapniem (Ca) lub magnezem (Mg) obecnym w minerałach krzemianowych oraz alkalicznych odpadach przemysłowych. Proces ten może być prowadzony zarówno in situ (pod powierzchnią gruntu), jak i ex situ (na powierzchni), prowadząc do powstania trwałych, termodynamicznie stabilnych węglanów wapnia lub magnezu [4,5]. Technologia ta nie tylko umożliwia trwałe unieruchomienie CO₂, ale także pozwala na zagospodarowanie odpadów stałych poprzez ich przekształcenie w wartościowe surowce nieorganiczne i chemikalia. W ostatnich latach karbonatyzacja mineralna zyskała szczególne znaczenie w kontekście produkcji zrównoważonych materiałów budowlanych [6].

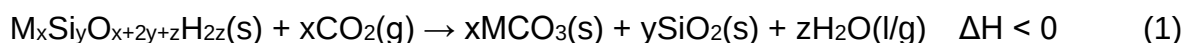
Produkcja konwencjonalnego betonu portlandzkiego wiąże się ze znacznym zużyciem cementu oraz kruszyw naturalnych (głównie żwiru i piasku), co generuje poważne deficyty zasobów mineralnych oraz emisje sięgające średnio około 0,93 kg CO₂ na każdy 1 kg cementu [7]. W tym kontekście zastępowanie cementu oraz kruszyw naturalnych materiałami pochodzącymi z odpadów budowlanych i rozbiórkowych (CDW) stanowi skuteczny sposób redukcji śladu węglowego produkcji betonu oraz zmniejszenia presji na eksploatację zasobów naturalnych. W szczególności, zastosowanie recyklingowanego kruszywa betonowego (RCA) oraz sproszkowanego, stwardniałego cementu (RHCP) pochodzących z CDW może istotnie złagodzić wymienione problemy. Dodatkowo, ponowne wykorzystanie odpadów budowlanych sprzyja redukcji ich składowania na wysypiskach [8]. Niemniej jednak, materiały recyklingowe, takie jak RCA i RHCP, wykazują istotne ograniczenia w zakresie właściwości fizycznych i mechanicznych w porównaniu do konwencjonalnych komponentów betonu. Przykładowo, RCA charakteryzuje się obniżoną gęstością objętościową, zwiększoną absorpcją wody oraz wyższym wskaźnikiem kruszenia, co wynika z obecności starej, przylegającej zaprawy oraz rozbudowanych stref przejściowych (ITZ) [9]. Z kolei RHCP odznacza się niższą reaktywnością hydratacyjną i większym zapotrzebowaniem na wodę zarobową, co ogranicza jego efektywność w mieszankach betonowych [10].

Jednym z kierunków poprawy właściwości RCA i RHCP jest ich modyfikacja z wykorzystaniem karbonatyzacji mineralnej. W procesie tym dochodzi do reakcji CO₂ z fazami mineralnymi takimi jak wodorotlenek wapnia (CH), uwodnione krzemiany wapnia (C-S-H), krzemian dwuwapniowy (C₃S), krzemian trójwapniowy (β-C₂S) oraz niezhydratyzowany klinkier portlandzki. Skutkuje to formowaniem stabilnych węglanów, które mogą skutecznie wypełniać pory i mikropęknięcia w starych zaprawach lub kruszywach, przyczyniając się do poprawy ich struktury i trwałości [11]. Dodatkowo, karbonatyzacja mineralna pozwala na skuteczne wiązanie znacznych ilości CO₂, co przekłada się na jego redukcję w atmosferze.

Od momentu zaproponowania koncepcji karbonatyzacji CO₂ przez Seiftriza, prowadzone są liczne badania mające na celu zastosowanie tej technologii w produkcji betonu oraz ocenę jego potencjału jako efektywnego pochłaniacza dwutlenku węgla [12,13].

1.1. Mineralna karbonatyzacja

Mineralna karbonatyzacja, rozwijana od lat 90. XX wieku jako alternatywna technologia składowania CO₂, opiera się na odwzorowaniu naturalnych procesów wietrzenia skał krzemianowych [14]. Proces ten polega na reakcji pomiędzy wodą zawierającą rozpuszczony CO₂ a minerałami krzemianowymi oraz odpadami stałymi zawierającymi jony metali ziem alkalicznych, takie jak magnez (Mg²⁺) i wapń (Ca²⁺). W wyniku tej reakcji dochodzi do powstania stabilnych, nierozpuszczalnych węglanów (równanie (1)):



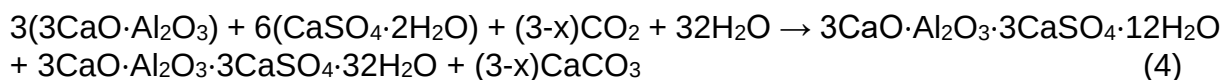
gdzie M = Mg, Ca, Fe

Reakcja ta charakteryzuje się ujemną zmianą swobodnej energii entalpii, co wskazuje na jej termodynamiczną spontaniczność oraz egzotermiczny charakter. Standardowa molowa energia swobodna tworzenia węglanów mineralnych mieści się w zakresie od 60 do 180 kJ/mol i jest niższa niż energia swobodna CO₂, co dowodzi, że węglany stanowią bardziej stabilną formę składowania węgla niż sam gazowy dwutlenek węgla. Z tego względu, tworzenie węglanów wapnia uznaje się za proces termodynamicznie korzystny, zapewniający trwałe i odporne na wyciek składowanie CO₂ [14].

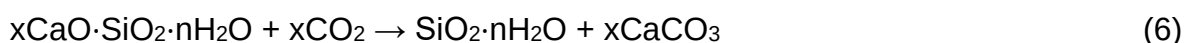
1.2. Mineralna karbonatyzacja w recyklingowanych materiałach na bazie cementu

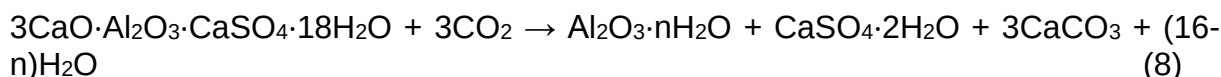
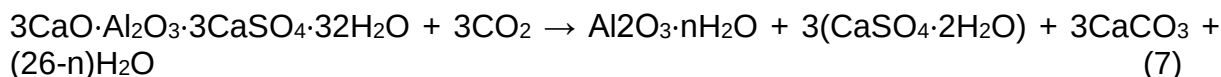
W procedurze karbonatyzacji recyklingowanych materiałów na bazie cementu, CO₂ reaguje z klinkierem portlandzkim (3CaO·SiO₂, C₃S; 2CaO·SiO₂, β-C₂S; 3CaO·Al₂O₃, C₃A; 4CaO·Al₂O₃·Fe₂O₃, C₄AF) oraz jego produktami hydratacji, takimi jak wodorotlenek wapnia (Ca(OH)₂, CH), amorficzne uwodnione krzemiany wapnia (xCaO·ySiO₂·zH₂O, C-S-H), uwodnione fazy glinokrzemianowe i siarczanowe (3CaO·Al₂O₃·CaSO₄·n(12,30~32)H₂O) [15], głównie tworząc gęstą mikrostrukturę C-S-H z CaCO₃ (CC) i żelem krzemionkowym (SiO₂·nH₂O) [16]. Równania (2)-(8) przedstawiają reakcje jakie zachodzą podczas karbonatyzacji klinkieru portlandzkiego oraz produktów jego hydratacji [17,18].

Klinkier portlandzki:



Produkty hydratacyjne C₃S, β-C₂S, C₃A i C₄AF:





Rysunek 1 przedstawia potencjalne ścieżki reakcji CO_2 z recyklingowanymi materiałami na bazie cementu [19]. Po pierwsze, H_2CO_3 , HCO_3^- i CO_3^{2-} powstają w wyniku transportu i rozpuszczania CO_2 , które stanowią kluczowy etap wczesnej karbonatyzacji mineralnej; wraz ze wzrostem produktu karbonatyzacji, Ca^{2+} i CO_3^{2-} wytrącają węglan wapnia, co staje się nowym etapem kontrolującym. W związku z tym stężenie CO_2 , ciśnienie gazu, temperatura oraz czas karbonatyzacji wpływają na dyfuzję CO_2 oraz wytrącanie węglanu wapnia, które są związane z pochłanianiem CO_2 i stopniem karbonatyzacji [20].



Rys.1. Ścieżki reakcji CO_2 z recyklingowanymi materiałami na bazie cementu [19].

1.3. Czynniki wpływające na efektywność mineralnej karbonatyzacji

Skuteczność mineralnej karbonatyzacji zależy od wielu czynników technologicznych. Stężenie i ciśnienie CO_2 są kluczowymi parametrami. Badania wykazały, że najwyższą efektywność karbonatyzacji RCA osiąga się przy stężeniach CO_2 rzędu 20–60% oraz ciśnieniu około 0,1 MPa [21,22]. Powyżej tej granicy dalszy wzrost stężenia nie zwiększa absorpcji, a wręcz może pogarszać właściwości materiału, np. poprzez tworzenie barier dyfuzyjnych w wyniku nadmiernego wytrącania CaCO_3 [22].

Kolejnym istotnym czynnikiem jest wilgotność względna, która powinna mieścić się w przedziale 50–70%. Przy niższych wartościach następuje niedostateczna aktywacja jonów, natomiast przy zbyt wysokiej wilgotności ograniczona zostaje dyfuzja CO_2 w porach materiału [23,24]. Wpływ na mineralną karbonatyzację ma także stosunek ciecz-ciało stałe (L/S). Optymalna wartość 0,15 sprzyja równomiernemu przebiegowi reakcji i odpowiedniemu nasyceniu wilgocią bez blokowania porów [24].

Temperatura również odgrywa istotną rolę. Zwiększenie jej do poziomu 20–50°C przyspiesza kinetykę reakcji, skracając czas potrzebny do osiągnięcia wysokiego stopnia karbonatyzacji (nawet 85% w 72 godziny przy 99,5% CO_2) [21].

Na efektywność mineralnej karbonatyzacji silnie wpływa także wielkość cząstek. Mniejsze frakcje RCA (np. 0,63–1,25 mm) cechują się większą powierzchnią reaktywną, co przekłada się na 33,1% wyższy stopień absorpcji CO_2 po karbonatyzacji [22].

1.4. Zmiany właściwości mechanicznych po karbonatyzacji

Zastosowanie karbonatyzacji mineralnej przekłada się bezpośrednio na poprawę właściwości wytrzymałościowych zarówno samego kruszywa, jak i betonu z jego udziałem. Beton zawierający nieskarbonatyzowane RCA wykazuje wyraźne

pogorszenie właściwości mechanicznych, w tym nawet o 30–40% niższą wytrzymałość na ściskanie w porównaniu do betonu z kruszywem naturalnym [2]. W badaniu Wang i in. [25] wykazano, że beton ze skarbonatyzowanym RCA charakteryzował się wyższą o 17,5% wytrzymałością na ściskanie w porównaniu do betonu zawierającego niesarbonatyzowane kruszywo. Z kolei Luo i in. [26] zauważyli, że przy zamianie 30–100% kruszywa naturalnego skarbonatyzowanym RCA, wytrzymałość betonu utrzymywała się na poziomie zbliżonym do referencyjnego (ok. 44 MPa).

W odniesieniu do RHCP, Lu i in. [27] stwierdzili, że skarbonatyzowany proszek cementowy może pełnić funkcję aktywnego dodatku mineralnego. Przy zastosowaniu 30% skarbonatyzowanego RHCP w zaprawie cementowej, uzyskano 12,6% wyższą wytrzymałość na ściskanie oraz 8–10% wyższą wytrzymałość na zginanie w porównaniu do zaprawy z RHCP bez karbonatyzacji. Dodatkowo, według Wu i in. [28], wytrzymałość na zginanie betonu ze skarbonatyzowanym RHCP wzrosła o 17,5% w porównaniu z betonem referencyjnym.

Poprawa wytrzymałości mechanicznej po karbonatyzacji wynika przede wszystkim z tworzenia stabilnych węglanów wapnia (CaCO_3), które wypełniają pory i mikropęknięcia w starej zaprawie, co zmniejsza porowatość i zwiększa gęstość materiału. Dodatkowo, karbonatyzacja powoduje restrukturyzację faz C-S-H oraz tworzenie żelu krzemionkowego, co wpływa korzystnie na mikrostrukturę [16].

2. Cel i zakres badań

2.1 Cel badań

Celem przeprowadzonych badań było określenie potencjału sekwestracji CO_2 przez drobne kruszywo pochodzące z recyklingu zapraw cementowych o różnych współczynnikach wodno-cementowych (w/c) oraz ocena wpływu skarbonatyzowanego kruszywa na wybrane właściwości mechaniczne zapraw cementowych. W szczególności skupiono się na analizie wytrzymałości na zginanie i ściskanie zapraw zawierających 10% skarbonatyzowanego kruszywa po 28 i 90 dniach dojrzewania.

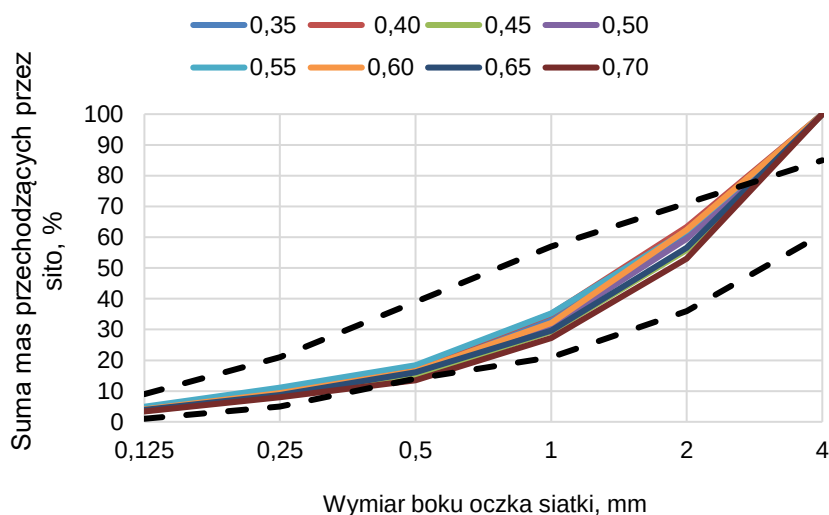
Program badawczy podzielono na trzy etapy. W pierwszym etapie przygotowano zaprawy cementowe o różnych współczynnikach wodno-cementowych i po okresie dojrzewania pokruszono mechanicznie. Następnie pokruszone zaprawy poddano karbonatyzacji i obliczono ilość pochłoniętego przez kruszywo dwutlenku węgla. W ostatnim etapie przygotowano zaprawy cementowe zawierające skarbonatyzowane kruszywo i zbadano wybrane właściwości materiałowe.

2.2 Materiały

W ramach przeprowadzonych badań do opracowania i wykonania badanych składów zapraw jako spoiwo zastosowano cement CEM V/A (S-V) 42,5 N-LH/HSR/NA (ECOPlanet 5A, Holcim) o gęstości $3,02 \text{ kg/m}^3$, zgodny z wymogami określonymi w normie PN EN 197-1:2011. Do wykonania mieszanek użyto piasek normowy, zgodny z wymaganiami normy PN EN 12620 oraz wodę wodociągową zgodną z normą PN EN 1008. Do modyfikacji zapraw użyto drobnego kruszywa z recyklingu o współczynnikach wodno-cementowych 0,35, 0,40, 0,45, 0,50, 0,55, 0,60, 0,65, 0,70. Na Rysunku 2 przedstawiono uziarnienie zastosowanego drobnego kruszywa z recyklingu.

Wszystkie badane serie próbek charakteryzowały się tym samym stosunkiem wodno-cementowym ustalonym na poziomie 0,5. Składy ilościowe zapraw będących przedmiotem badań zestawiono w Tabeli 2.

W badanych próbkach zastąpiono 10% wag. piasku normowego drobnym kruszywem z recyklingu. Zaprawy zawierające nieskarbonatyzowane kruszywo z recyklingu oznaczono symbolami **ZR-w/c-N** (gdzie ZR – zaprawa recyklingowa, w/c – odpowiedni współczynnik w/c, N - nieskarbonatyzowane), natomiast zaprawy ze skarbonatyzowanym kruszywem – **ZR-w/c-C** (gdzie C - skarbonatyzowane). Zostało przygotowanych łącznie szesnaście kompozytów. Ośiem składów z kruszywem nieskarbonatyzowanym oraz ośiem składów z kruszywem skarbonatyzowanymi. Punktem odniesienia była zaprawa normowa (**REF**) niemodyfikowana.



Rys. 2. Krzywa uziarnienia stosowanego kruszywa z recyklingu o różnych współczynnikach w/c wraz z normową krzywą uziarnienia.

Tabela 1. Składy badanych zapraw wyrażone w kg na 1 m³.

Komponent	REF	ZR
Cement (ECOPlanet 5A)	510	510
Piasek normowy	1531	1378
Kruszywo z recyklingu	-	153
Woda	255	255

W przypadku każdego rozpatrywanego składu wykonano 6 próbek w kształcie prostopadłościanu (beleczek) o wymiarach 40 x 40 x 160 mm, na których następnie wykonano oznaczenia wytrzymałości na zginanie i ściskanie. Próbki były pielęgnowane w wodzie aż do momentu badania wybranych właściwości mechanicznych. Przed zaformowaniem zapraw wykonano oznaczono ich plastyczność.

3. Metodyka badawcza

Program badań opierał się na wprowadzeniu CO₂ w drobne kruszywo cementowe, otrzymane przez kruszenie zapraw o różnych współczynnikach wodno-cementowych,

a następnie przygotowaniu zapraw zawierających te kruszywa i określeniu wpływu substytucji piasku normowego kruszywem z recyklingu na wybrane właściwości technologiczne i mechaniczne. W ramach badań właściwości technologicznych mieszanek wykonano oznaczenie plastyczności. W ramach badań właściwości mechanicznych zapraw wykonano oznaczenia wytrzymałości na zginanie i ściskanie w 28 i 90 dniu pielęgnacji. Procedury badań omówiono poniżej.

3.1 Karbonatyzacja kruszyw

Kruszywa z recyklingu otrzymane z zapraw o różnych współczynnikach wodno-cementowych poddano karbonatyzacji, w zamkniętym zbiorniku ciśnieniowym, w którym zastosowano gazowy CO₂ (99,8%) pod ciśnieniem 4,5 atm. Na podstawie różnicy mas próbek kruszyw, ważonych przed i po karbonatyzacji określono ilość pochłoniętego dwutlenku węgla.

3.2 Badanie plastyczności metodą stolika rozplwyu

Badanie według normy PN-EN 1015-3 polega na pomiarze rozplwyu mieszanki na płaskiej płycie poddanej wstrząsom.

3.3 Badanie wytrzymałości na zginanie

Wytrzymałość zaprawy na zginanie jest określana przez trzypunktowe obciążenie stwardniałych, uformowanych w kształcie prostopadłościanów próbek, aż do zniszczenia zgodnie z normą PN-EN 196-1. W trakcie badania obciążenie zwiększa się jednostajnie o 50 N/s, aż do złamania.

3.4 Badanie wytrzymałości na ściskanie

Wytrzymałość zaprawy na ściskanie jest określana na obydwu połówkach beleczek uzyskanych w wyniku badania wytrzymałości na zginanie. Badanie przeprowadza się na maszynie badawczej umożliwiającej przyłożenie obciążenia z prędkością 2 400 N/s, aż do zgniecenia zgodnie z normą PN-EN 196-1.

4. Wyniki badań i dyskusja

4.1 Ilość pochłoniętego dwutlenku węgla

W celu określenia ilości pochłoniętego CO₂ przez kruszywa z recyklingu po 24 godzinnej karbonatyzacji próbki ważono. Wyniki oznaczenia przedstawiono w Tabeli 2.

Tabela 2. Ilość pochłoniętego dwutlenku węgla określona na podstawie różnicy mas

Próbka	K-0,35	K-0,40	K-0,45	K-0,50	K-0,55	K-0,60	K-0,65	K-0,70
CO ₂ , %	1,0	1,2	1,9	2,0	2,2	2,3	2,5	2,9

Na podstawie danych przedstawionych w Tabeli 2 zaobserwowano wyraźną zależność pomiędzy współczynnikiem wodno-cementowym zaprawy, z której pozyskano kruszywo, a ilością pochłoniętego dwutlenku węgla. Ilość zaabsorbowanego CO₂ systematycznie wzrastała wraz ze zwiększaniem wartości w/c. Najniższy poziom karbonatyzacji (1,0%) odnotowano dla próbki K-0,35, natomiast najwyższy (2,9%) – dla próbki K-0,70. Może być to związane z porowatością zaprawy, która pozostała na powierzchni kruszywa. Wyższy współczynnik w/c skutkuje zwiększeniem ilości wolnej wody w mieszance, co w efekcie prowadzi do powstania bardziej porowatej

mikrostruktury po stwardnieniu zaprawy. Zwiększona porowatość sprzyja penetracji CO_2 i intensyfikacji procesu karbonatyzacji. W rezultacie, kruszywa pochodzące z zapraw o wyższym w/c cechują się większą zdolnością do pochłaniania dwutlenku węgla. Zjawisko to znajduje potwierdzenie w literaturze, gdzie podkreśla się wpływ stosunku cieczy do materiału stałego (L/S) oraz wilgotności względnej na efektywność karbonatyzacji materiałów cementowych pochodzących z recyklingu. W szczególności, badania Wang i in. [29] oraz Fang i in. [30] wykazały, że bardziej porowata mikrostruktura, wynikająca z wyższego stosunku L/S (analogicznego do wyższego w/c), sprzyja intensyfikacji procesu karbonatyzacji poprzez ułatwienie penetracji CO_2 . Co istotne, w prezentowanych badaniach wilgotność względna zmieniała się podczas procesu karbonatyzacji w zakresie od 38% do 53%. Jak wskazują Zhan i in. [24] oraz Xuan i in. [31], optymalna efektywność karbonatyzacji zachodzi przy wilgotności względnej w zakresie 40–70%, a szczególnie przy wartościach bliskich 50%. Zakres RH zastosowany w doświadczeniu mieści się w tym przedziale, co mogło dodatkowo sprzyjać absorpcji CO_2 .

4.2 Właściwości technologiczne

W celu określenia wpływu substytucji piasku normowego drobnym kruszywem z recyklingu na właściwości technologiczne mieszanki oznaczono jej plastyczność. (Tabela 3 i 4).

Tabela 3. Plastyczność mieszanek modyfikowanych kruszywem nieskarbonatyzowanym

Próbka	ZR-0,35-N	ZR-0,40-N	ZR-0,45-N	ZR-0,50-N	ZR-0,55-N	ZR-0,60-N	ZR-0,65-N	ZR-0,70-N	REF
Rozpływ, cm (średnia)	17,3	19,0	18,3	18,5	17,8	17,3	17,5	17,0	19,0

Tabela 4. Plastyczność mieszanek modyfikowanych kruszywem skarbonatyzowanym

Próbka	ZR-0,35-C	ZR-0,40-C	ZR-0,45-C	ZR-0,50-C	ZR-0,55-C	ZR-0,60-C	ZR-0,65-C	ZR-0,70-C	REF
Rozpływ, cm (średnia)	16,5	18,3	17,8	17,8	18,0	17,3	17,5	18,0	19,0

Rozpływ wyznaczony dla zaprawy normowej z użytego do badań cementu CEM V/A (S-V) 42,5 N-LH/HSR/NA wynosił 19,0 cm. Rozpływy zapraw zawierających drobne kruszywo z recyklingu zawierały się w granicach od 16,5 cm do 19,0 cm.

Kompozyty cementowe modyfikowane kruszywem z recyklingu charakteryzowały się mniejszą plastycznością w porównaniu do zaprawy referencyjnej. Wyjątek stanowi zaprawa ZR-0,40-N charakteryzująca się taką samą konsystencją jak zaprawa REF. Największe obniżenie plastyczności względem zaprawy REF zaobserwowano dla zapraw ZR-0,35-C i ZR-0,70-N, odpowiednio o 13,2% i 10,5%. Zaprawy z kruszywem skarbonatyzowanymi charakteryzowały się nieznacznie mniejszą plastycznością w porównaniu do ich odpowiedników

z kruszywem niekarbonatyzowanymi – największa różnica w przypadku zaprawy ZR-0,35 o 4,6%, wyjątek stanowią zaprawy ZR-0,55-C oraz ZR-0,70-N, które wykazały plastyczność większą, odpowiednio o 1,1% i 5,9%, w porównaniu do ich odpowiedników z kruszywem nieskarbonatyzowanym.

4.3 Właściwości mechaniczne

W celu określenia wpływu substytucji piasku normowego drobnym kruszywem z recyklingu na właściwości mechaniczne zapraw, przeprowadzono badania niszczące wg normy PN-EN 196-1, których wyniki przedstawiono w Tabeli 5 i 6. Wszystkie zaprawy zawierające kruszywo recyklingowe nieskarbonatyzowane (ZR-w/c-N) w 28 dniu dojrzewania charakteryzowały się niższą wytrzymałością na zginanie w porównaniu do próbki referencyjnej (REF). Najniższą wytrzymałość w tej grupie zapraw wykazała próbka ZR-0,65-N, o 21% niższą od próbki REF. Połowa zapraw zawierających skarbonatyzowane kruszywo recyklingowe (ZR-w/c-C) również wykazała niższą wytrzymałość na zginanie w porównaniu do zaprawy referencyjnej, wyjątek stanowiły zaprawy ZR-0,35-C, ZR-0,40-C, ZR-0,45-C i ZR-0,50-C, które charakteryzowały się wyższymi wartościami f_b względem zaprawy REF, odpowiednio o 8%, 11%, 12% i 10%. W 90 dniu dojrzewania zarówno zaprawy ZR-w/c-N, jak i większość zapraw ZR-w/c-C wykazały niższą wytrzymałość na zginanie w porównaniu do zaprawy referencyjnej. Wyjątek stanowiła zaprawa K-0,45-C, która osiągnęła taką samą wytrzymałość na zginanie. W przypadku wytrzymałości na ściskanie jedynie zaprawa ZR-0,35-N (w 28 dniu dojrzewania) charakteryzowała się o 2% wyższą wytrzymałością w porównaniu do zaprawy referencyjnej. W przypadku pozostałych zapraw, niezależnie od ich rodzaju i terminu badania, oznaczono niższą wytrzymałość na ściskanie względem zaprawy REF, najniższą (o 11%) dla zaprawy ZR-0,40-C.

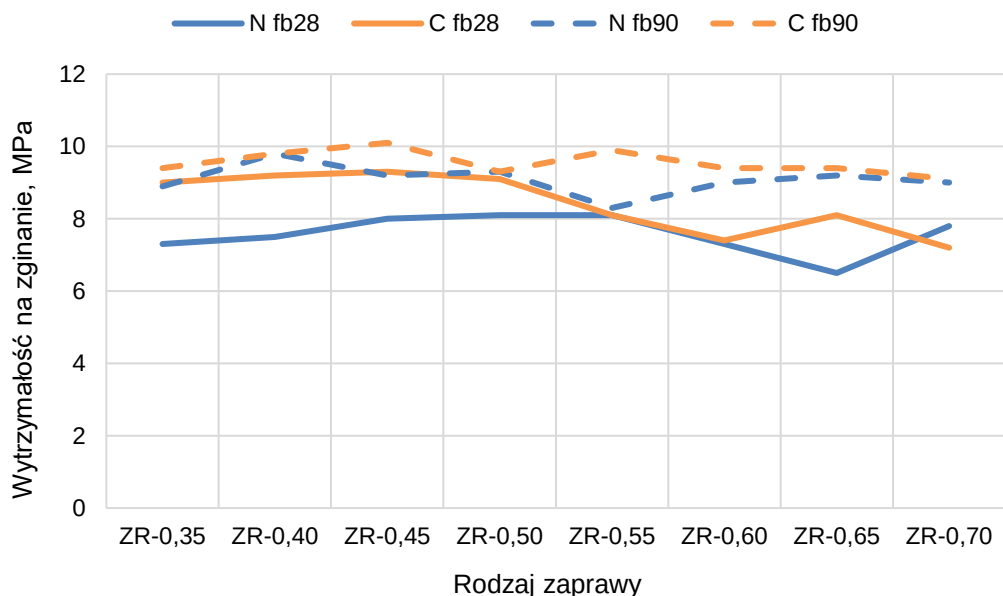
Tabela 5. Wybrane właściwości mechaniczne zapraw modyfikowanych kruszywem nieskarbonatyzowanym

Próbka	ZR-0,35-N	ZR-0,40-N	ZR-0,45-N	ZR-0,50-N	ZR-0,55-N	ZR-0,60-N	ZR-0,65-N	ZR-0,70-N	REF
f_{b28} , MPa	7,3	7,5	8,0	8,1	8,1	7,3	6,5	7,8	8,3
f_{b90} , MPa	8,9	9,8	9,2	9,3	8,3	9,0	9,2	9,0	10,0
f_{c28} , MPa	42,6	38,5	40,5	38,2	39,4	38,7	40,2	37,8	41,8
f_{c90} , MPa	56,4	55,2	55,6	55,8	57,3	57,3	56,8	54,4	60,3

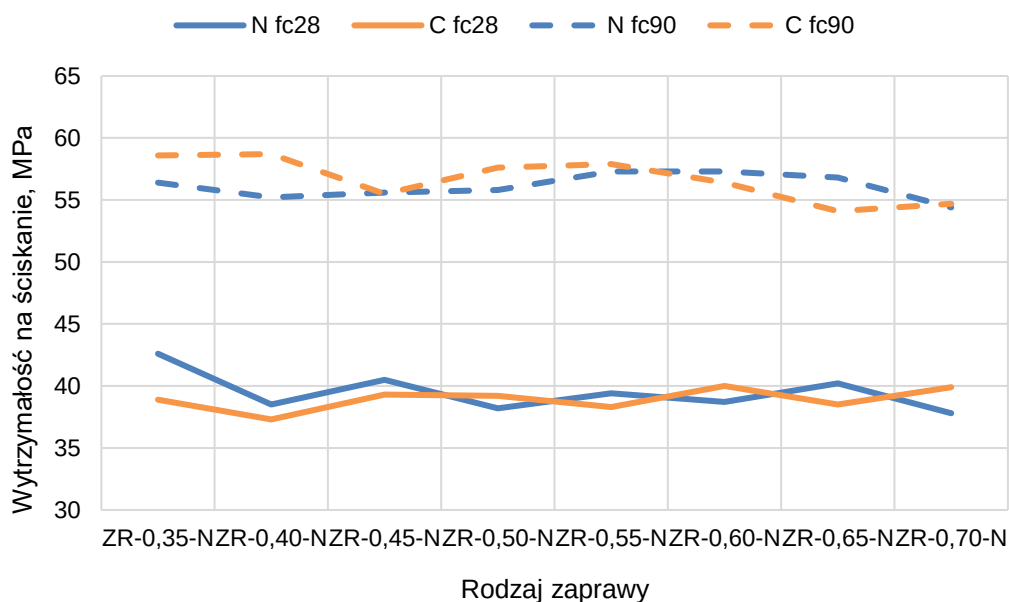
Tabela 6. Wybrane właściwości mechaniczne zapraw modyfikowanych kruszywem skarbonatyzowanym

Próbka	ZR-0,35-C	ZR-0,40-C	ZR-0,45-C	ZR-0,50-C	ZR-0,55-C	ZR-0,60-C	ZR-0,65-C	ZR-0,70-C	REF
f_{b28} , MPa	9,0	9,2	9,3	9,1	8,1	7,4	8,1	7,2	8,3
f_{b90} , MPa	9,4	9,8	10,1	9,3	9,9	9,4	9,4	9,1	10,0
f_{c28} , MPa	38,9	37,3	39,3	39,2	38,3	40,0	38,5	39,9	41,8
f_{c90} , MPa	58,6	58,7	55,5	57,6	57,9	56,4	54,1	54,7	60,3

Rysunek 3 i 4 przedstawiają porównanie wyników badań wytrzymałości na zginanie i ściskanie zapraw w dwóch terminach dojrzewania.



Rys. 3. Wytrzymałość na zginanie zapraw w 28 i 90 dniu dojrzewania.



Rys. 4. Wytrzymałość na ściskanie zapraw w 28 i 90 dniu dojrzewania.

Na podstawie otrzymanych wyników przeprowadzono jednoczynnikową analizę wariancji ANOVA w celu porównania właściwości mechanicznych zapraw. Analiza wykazała istotną statystycznie różnicę ($p \approx 0,001$) dla 28 dniowej wytrzymałości na zginanie, wskazując na korzystny wpływ zastosowania skarbonatyzowanego

drobnego kruszywa z recyklingu. Również w przypadku 90 dniowej wytrzymałości na zginanie różnica była istotna statystycznie ($p \approx 0,04$), jednak wpływ ten był mniej wyraźny. W przypadku 28 dniowej wytrzymałości na ściskanie zaobserwowano istotną różnicę ($p \approx 0,016$) wskazując na niekorzystny wpływ zastosowania skarbonatyzowanego drobnego kruszywa z recyklingu a dla 90 dniowej wytrzymałości na ściskanie nie stwierdzono statystycznie istotnej różnicy ($p \approx 0,59$) pomiędzy zaprawami zawierającymi skarbonatyzowane i nieskarbonatyzowane kruszywo.

5. Wnioski

W przeprowadzonych badaniach kompozytów cementowych zawierających skarbonatyzowane kruszywo z recyklingu określono wpływ modyfikacji materiałowej na wybrane właściwości zaprawy cementowej. Zbadano plastyczność mieszanek oraz określono wytrzymałość na zginanie i ściskanie próbek w 28 i 90 dniu dojrzewania. Na podstawie wyników badań można sformułować następujące wnioski.

- Ilość pochłoniętego dwutlenku węgla wzrastała wraz ze zwiększaniem wskaźnika w/c w kruszywach z recyklingu, osiągając wartości od 1,0% dla próbki K-0,35 do 2,9% dla próbki K-0,70. Wyższy współczynnik woda/cement sprzyjał intensyfikacji procesu karbonatyzacji w kruszywach z recyklingu.

- Zaprawy z dodatkiem kruszywa z recyklingu wykazały mniejszą plastyczność niż zaprawa referencyjna, szczególnie przy zastosowaniu kruszywa skarbonatyzowanego, jednak nie więcej niż o 13%.

- Zaprawy z kruszywem z recyklingu wykazały w większości niższą wytrzymałość na zginanie niż zaprawa referencyjna, jednak w 28 dniu dojrzewania część zapraw ze skarbonatyzowanym kruszywem osiągnęła wyższe wartości. Różnice te były istotne statystycznie ($p = 0,001$ oraz $p = 0,04$), wskazując na korzystny wpływ skarbonatyzowanego kruszywa na wytrzymałość na zginanie.

- Prawie wszystkie zaprawy z kruszywem recyklingowym charakteryzowały się niższą wytrzymałością na ściskanie niż zaprawa referencyjna, niezależnie od rodzaju kruszywa i czasu dojrzewania. Różnica była istotna statystycznie po 28 dniach ($p = 0,016$) i wskazywała na niekorzystny wpływ kruszywa skarbonatyzowanego; po 90 dniach różnice nie były istotne statystycznie ($p = 0,59$).

6. Literatura

- [1] IEA (2022), Global Energy Review: CO2 Emissions in 2021, IEA, Paris <https://www.iea.org/reports/global-energy-review-co2-emissions-in-2021-2>, Licence: CC BY 4.0, n.d.
- [2] Global ABC, IEA and UNEP 2020 (2020), GlobalABC Roadmap for Buildings and Construction 2020-2050, IEA, Paris <https://www.iea.org/reports/globalabc-roadmap-for-buildings-and-construction-2020-2050>, Licence: CC BY 4.0, n.d.
- [3] Global C.C.S Institute, Global Status of CCS Report, Melbourne, Australia, 2019.
- [4] S.Ó. Snæbjörnsdóttir, B. Sigfússon, C. Marieni, D. Goldberg, S.R. Gislason, E.H. Oelkers, Carbon dioxide storage through mineral carbonation, Nat. Rev. Earth Environ. 1 (2020) 90–102. <https://doi.org/10.1038/s43017-019-0011-8>.
- [5] Á.A. Ramírez-Santos, C. Castel, E. Favre, A review of gas separation technologies within emission reduction programs in the iron and steel sector:

- Current application and development perspectives, *Sep. Purif. Technol.* 194 (2018) 425–442. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2017.11.063>.
- [6] GCCA Sustainability Guidelines for the monitoring and reporting of CO₂ emission from cement manufacturing, London, United Kingdom, 2019.
- [7] C. Liang, N. Lu, H. Ma, Z. Ma, Z. Duan, Carbonation behavior of recycled concrete with CO₂-curing recycled aggregate under various environments, *J. CO₂ Util.* 39 (2020) 101185. <https://doi.org/10.1016/j.jcou.2020.101185>.
- [8] V.W.Y. Tam, M. Soomro, A.C.J. Evangelista, A review of recycled aggregate in concrete applications (2000–2017), *Constr. Build. Mater.* 172 (2018) 272–292. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.03.240>.
- [9] Y. Pu, L. Li, Q. Wang, X. Shi, L. Fu, G. Zhang, C. Luan, A.E.-F. Abomohra, Accelerated carbonation treatment of recycled concrete aggregates using flue gas: A comparative study towards performance improvement, *J. CO₂ Util.* 43 (2021) 101362. <https://doi.org/10.1016/j.jcou.2020.101362>.
- [10] J. Skocek, M. Zajac, M. Ben Haha, Carbon Capture and Utilization by mineralization of cement pastes derived from recycled concrete, *Sci. Rep.* 10 (2020) 5614. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-62503-z>.
- [11] K. Ouyang, C. Shi, H. Chu, H. Guo, B. Song, Y. Ding, X. Guan, J. Zhu, H. Zhang, Y. Wang, J. Zheng, An overview on the efficiency of different pretreatment techniques for recycled concrete aggregate, *J. Clean. Prod.* 263 (2020) 121264. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.121264>.
- [12] W. Seifritz, CO₂ disposal by means of silicates, *Nature* 345 (1990) 486–486. <https://doi.org/10.1038/345486b0>.
- [13] Kaliyavaradhan, S. K., Ling, T. C., & Mo, K. H., CO₂ sequestration of fresh concrete slurry waste: optimization of CO₂ uptake and feasible use as a potential cement binder. *J CO₂ Util* 42: 101330., *J CO₂ Util* 42 42 (2020) 101330.
- [14] A.A. Olajire, A review of mineral carbonation technology in sequestration of CO₂, *J. Pet. Sci. Eng.* 109 (2013) 364–392. <https://doi.org/10.1016/j.petro.2013.03.013>.
- [15] Standard specification for Portland cement. Annual book of ASTM. standards. ASTM American Society for Testing and Materials, (2015).
- [16] I. Mehdipour, G. Falzone, E.C. La Plante, D. Simonetti, N. Neithalath, G. Sant, How Microstructure and Pore Moisture Affect Strength Gain in Portlandite-Enriched Composites That Mineralize CO₂, *ACS Sustain. Chem. Eng.* 7 (2019) 13053–13061. <https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.9b02163>.
- [17] A. Morandea, M. Thiéry, P. Dangla, Investigation of the carbonation mechanism of CH and C-S-H in terms of kinetics, microstructure changes and moisture properties, *Cem. Concr. Res.* 56 (2014) 153–170. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2013.11.015>.
- [18] C.W. Hargis, B. Lothenbach, C.J. Müller, F. Winnefeld, Carbonation of calcium sulfoaluminate mortars, *Cem. Concr. Compos.* 80 (2017) 123–134. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2017.03.003>.
- [19] S. Kashef-Haghighi, S. Ghoshal, Physico-Chemical Processes Limiting CO₂ Uptake in Concrete during Accelerated Carbonation Curing, *Ind. Eng. Chem. Res.* 52 (2013) 5529–5537. <https://doi.org/10.1021/ie303275e>.
- [20] C. Liang, B. Pan, Z. Ma, Z. He, Z. Duan, Utilization of CO₂ curing to enhance the properties of recycled aggregate and prepared concrete: A review, *Cem.*

- Concr. Compos. 105 (2020) 103446.
<https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2019.103446>.
- [21] Y. Fang, J. Chang, Microstructure changes of waste hydrated cement paste induced by accelerated carbonation, *Constr. Build. Mater.* 76 (2015) 360–365.
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.12.017>.
- [22] C. Zhu, Y. Fang, H. Wei, Carbonation-cementation of recycled hardened cement paste powder, *Constr. Build. Mater.* 192 (2018) 224–232.
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.10.113>.
- [23] L. Ji, H. Yu, X. Wang, M. Grigore, D. French, Y.M. Gözükar, J. Yu, M. Zeng, CO₂ sequestration by direct mineralisation using fly ash from Chinese Shenfu coal, *Fuel Process. Technol.* 156 (2017) 429–437.
<https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2016.10.004>.
- [24] B. Zhan, C.S. Poon, Q. Liu, S. Kou, C. Shi, Experimental study on CO₂ curing for enhancement of recycled aggregate properties, *Constr. Build. Mater.* 67 (2014) 3–7. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.09.008>.
- [25] X. Wang, X. Yang, J. Ren, N. Han, F. Xing, A novel treatment method for recycled aggregate and the mechanical properties of recycled aggregate concrete, *J. Mater. Res. Technol.* 10 (2021) 1389–1401.
<https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2020.12.095>.
- [26] S. Luo, S. Ye, J. Xiao, J. Zheng, Y. Zhu, Carbonated recycled coarse aggregate and uniaxial compressive stress-strain relation of recycled aggregate concrete, *Constr. Build. Mater.* 188 (2018) 956–965.
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.08.159>.
- [27] B. Lu, C. Shi, J. Zhang, J. Wang, Effects of carbonated hardened cement paste powder on hydration and microstructure of Portland cement, *Constr. Build. Mater.* 186 (2018) 699–708. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.07.159>.
- [28] H. Wu, C. Liang, J. Xiao, Z. Ma, Properties and CO₂-curing enhancement of cement-based materials containing various sources of waste hardened cement paste powder, *J. Build. Eng.* 44 (2021) 102677.
<https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2021.102677>.
- [29] J. Wang, H. Xu, D. Xu, P. Du, Z. Zhou, L. Yuan, X. Cheng, Accelerated carbonation of hardened cement pastes: Influence of porosity, *Constr. Build. Mater.* 225 (2019) 159–169. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.07.088>.
- [30] J. Fang, M. Rasquin, I.A. Bolotnov, Interface tracking simulations of bubbly flows in PWR relevant geometries, *Nucl. Eng. Des.* 312 (2017) 205–213.
<https://doi.org/10.1016/j.nucengdes.2016.07.002>.
- [31] D. Xuan, B. Zhan, C.S. Poon, A maturity approach to estimate compressive strength development of CO₂-cured concrete blocks, *Cem. Concr. Compos.* 85 (2018) 153–160. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2017.10.005>.

dr inż. Maja Kępniak
Politechnika Warszawska
mgr inż. Magdalena Bardan
mgr inż. Aleksandra Mazurek
dr hab. inż. Artur Piekarczyk, prof. Instytutu
Instytut Techniki Budowlanej
Dr inż. Rafał Panek
Politechnika Lubelska

Od konstrukcji do kruszywa – wieloetapowa ocena jakości kruszywa z recyklingu

From Structure to Aggregate – A Multistage Quality Assessment of Recycled Concrete Aggregate

Streszczenie

W referacie przedstawiono kompleksową procedurę badawczą umożliwiającą efektywne wykorzystanie kruszyw z recyklingu, obejmującą etapy od wstępnych analiz konstrukcji aż po badania mikrostruktury materiałów recyklingowych. W pierwszej fazie, kluczowe jest odtworzenie projektu konstrukcji, co pozwala na oszacowanie ilości oraz identyfikację rodzajów materiałów budowlanych. Proponowaną metodą jest skaning 3D, który zapewnia precyzyjne i szybkie pozyskanie informacji o geometrii obiektu. Kolejny etap to badania nieniszczące i niszczące, pozwalające na podział elementów nie tylko według rodzaju, ale również jakości, np. wytrzymałości na ściskanie, karbonatyzacji czy poziomu zanieczyszczeń. Takie podejście umożliwia rzeczywiście selektywną rozbiórkę, maksymalizując możliwości ponownego wykorzystania materiałów. Po wyburzeniu przeprowadzane są badania kruszyw grubych i drobnych, w tym analizy jakościowe oraz określenie składu materiałowego. Procedura obejmuje również badania mikrostrukturalne, takie jak analizy optyczne, SEM oraz XRD, pozwalające na szczegółową ocenę cech fizykochemicznych uzyskanego materiału.

Abstract

The paper presents a comprehensive research procedure enabling the effective use of recycled aggregates, encompassing stages from preliminary structural analysis to the investigation of the microstructure of recycled materials. In the first phase, reconstructing the structural design is crucial, as it allows for the estimation of quantities and identification of types of construction materials. The proposed method is 3D scanning, which provides precise and rapid acquisition of information about the geometry of the structure. The next stage involves both non-destructive and destructive testing, allowing elements to be classified not only by type but also by quality, e.g., compressive strength, carbonation, or contamination levels. This approach enables truly selective demolition, maximizing the potential for material reuse. After demolition, tests are conducted on coarse and fine aggregates, including qualitative analyses and determination of material composition. The procedure also includes microstructural studies such as optical analyses, SEM, and XRD, enabling detailed assessment of the physico-chemical properties of the obtained material.

1. Wprowadzenie

W obliczu wyzwań związanych ze zrównoważonym rozwojem oraz koniecznością ograniczenia eksploatacji zasobów naturalnych, rosnące znaczenie zyskują działania ukierunkowane na odzysk i ponowne wykorzystanie materiałów budowlanych [1], [2], [3]. Recykling materiałów budowlanych, w szczególności gruzu betonowego, stanowi obecnie jeden z kluczowych filarów gospodarki o obiegu zamkniętym w budownictwie [4]. Transformacja odpadów konstrukcyjnych w pełnowartościowe kruszywo nie powinna rozpoczynać się dopiero po zakończeniu użytkowania obiektu – lecz znacznie wcześniej, już na etapie planowania jego rozbiórki, a w optymalnym scenariuszu nawet podczas projektowania [5], [6]. Możliwe jest wtedy pełne wykorzystanie potencjału materiałowego przyszłych odpadów, poprzez identyfikację ich pierwotnych właściwości, warunków eksploatacji oraz jakości wykonania. Tego typu podejście znajduje bezpośrednie odzwierciedlenie w normach – przykładowo, załącznik A do normy PN-EN 206 [7] dopuszcza stosowanie kruszywa z recyklingu do wszystkich klas ekspozycji, o ile beton źródłowy spełniał odpowiednie wymagania środowiskowe. Informacja ta jest jednak możliwa do zweryfikowania tylko wtedy, gdy znany jest pierwotny kontekst techniczny danego elementu. W przeciwnym razie – gdy materiał trafia do przetworzenia jako nieselekcjonowany gruz betonowy – bardzo utrudnione staje się przeprowadzenie jego jakościowego rozróżnienia. W konsekwencji jakość uzyskanego kruszywa z recyklingu zostaje zdeterminowana przez najłagodniejszy jego składnik, co istotnie ogranicza możliwości jego dalszego wykorzystania [6].

Co więcej, projektowanie zgodne z zasadami zrównoważonego rozwoju zakłada optymalizację nie tylko pod kątem ilości materiałów, ale także w zakresie stawianych wymagań [8]. Przykładowo, zaleca się różnicowanie klas ekspozycji w zależności od funkcji i lokalizacji elementów konstrukcyjnych, zamiast stosowania najbardziej wymagających parametrów dla całej konstrukcji. Takie podejście ogranicza przeprojektowanie i zmniejsza zapotrzebowanie na surowce, lecz jednocześnie prowadzi do powstawania w jednej konstrukcji elementów o różnej trwałości i właściwościach. W momencie rozbiórki oznacza to konieczność zróżnicowanego

traktowania poszczególnych elementów – tak, aby uniknąć obniżenia jakości całej partii odzyskanego materiału [9], [10], [11].

Dodatkowym wyzwaniem jest obecność elementów zanieczyszczonych – np. uszkodzonych chemicznie, zaolejonych, zawierających elementy instalacyjne lub powłoki malarskie [12], [13], [14]. Nawet niewielki procent tego typu ziaren w kruszywie z recyklingu może wpłynąć negatywnie na właściwości całej partii kruszywa, czyniąc je nieprzydatnym do ponownego zastosowania. Z tego względu kluczowe staje się wczesne wykrycie i skuteczne oddzielenie materiałów niespełniających kryteriów jakościowych [15].

W odpowiedzi na powyższe problemy, niniejszy referat prezentuje kompleksową metodykę oceny jakości kruszyw z recyklingu, obejmującą wszystkie istotne etapy – od analizy dokumentacji i geometrii obiektu, przez badania konstrukcji in situ, aż po laboratoryjną ocenę właściwości fizykochemicznych i mikrostrukturalnych materiału. Proponowane podejście integruje wykorzystanie nowoczesnych narzędzi diagnostycznych oraz selektywnej rozbiórki, umożliwiając racjonalne i zgodne z obowiązującymi normami wykorzystanie kruszywa z recyklingu.

2. Metodyka oceny jakości kruszywa z recyklingu

Metodyka oceny jakości kruszywa z recyklingu została opracowana jako wieloetapowy proces, obejmujący zarówno działania poprzedzające rozbiórkę, jak i badania laboratoryjne materiału po jego przetworzeniu. Jej celem jest stworzenie uporządkowanej procedury pozwalającej na racjonalne wykorzystanie potencjału materiałowego odzyskanych surowców oraz minimalizację ryzyka związanego z ich heterogenicznością.

1. Analiza dokumentacji technicznej

Podstawowym krokiem jest zgromadzenie i przeanalizowanie dostępnej dokumentacji obiektu, w tym projektu budowlanego oraz ekspertyz powykonawczych. Pozwala to na wstępną identyfikację klasy betonu, przyjętych obciążeń i potencjalnych warunków ekspozycji, co stanowi punkt wyjścia do dalszych badań.

2. Skanowanie 3D konstrukcji

W kolejnym etapie stosuje się naziemne skanowanie laserowe (TLS), które umożliwia szybkie i dokładne odwzorowanie geometrii obiektu. Chmura punktów uzyskana z pomiarów pozwala nie tylko na ilościową weryfikację elementów konstrukcyjnych, ale również na optymalne wytypowanie miejsc do poboru próbek w postaci odwiertów rdzeniowych. Dzięki temu proces diagnostyczny jest bardziej reprezentatywny i bezpieczny.

3. Pobieranie i badanie próbek betonu

Odwierty rdzeniowe wykonuje się w wybranych elementach konstrukcji, zgodnie z wymaganiami norm PN-EN 12504-1 i PN-EN 13791. Pobranie próbek umożliwia ocenę wytrzymałości na ściskanie, określenie składu materiałowego, stopnia karbonatyzacji oraz obecności ewentualnych zanieczyszczeń. Kryteriami doboru miejsc odwiertów są m.in. reprezentatywność, minimalny wpływ na nośność konstrukcji oraz bezpieczeństwo wykonania.

4. Rozbiórka i sortowanie materiałów

Na etapie rozbiórki prowadzi się selektywną segregację elementów konstrukcyjnych. Beton oddzielany jest od zbrojenia, cegły, drewna czy metali. Kluczowym etapem jest kruszenie z zastosowaniem odpowiednich typów kruszarek, a następnie przesiewanie i – w razie potrzeby – płukanie. Dzięki temu uzyskuje się określone frakcje kruszywa, które podlegają dalszej ocenie.

5. Badania laboratoryjne kruszywa grubego i drobnego, w tym badania mikrostrukturalne

W laboratorium ocenie poddawane są właściwości fizyczne, mechaniczne i chemiczne kruszyw. Obejmują one m.in. gęstość ziaren, nasiąkliwość, odporność na rozdrabnianie, mrozoodporność, zawartość chlorków i siarczanów oraz skład materiałowy. Uzyskane wyniki klasyfikowane są zgodnie z wymaganiami norm PN-EN 12620 i powiązanych specyfikacji.

Etapem proponowanej metodyki są badania mikrostruktury, takie jak mikroskopia optyczna, skaningowa mikroskopia elektronowa (SEM) oraz analiza rentgenowska (XRD). Umożliwiają one szczegółową ocenę cech fizykochemicznych kruszyw, identyfikację faz mineralnych oraz określenie jakości zaprawy cementowej związanej z ziarnami.

6. Ocena właściwości betonu z udziałem kruszywa z recyklingu – w tym etapie kruszywa z recyklingu stanowią składnik nowych mieszanek betonowych. Analizuje się ich wpływ na konsystencję, urabialność, wytrzymałość na ściskanie i rozciąganie, mrozoodporność, nasiąkliwość czy cechy związane z trwałością. Pozwala to na weryfikację, czy dane kruszywo może zastąpić surowiec naturalny w określonych klasach betonu oraz w jakim udziale objętościowym jego użycie jest technicznie, ekologicznie i ekonomicznie uzasadnione.

Proponowany układ etapów tworzy algorytm działań – od identyfikacji materiału w konstrukcji, przez jego selektywne pozyskanie, aż po laboratoryjną ocenę właściwości. Takie podejście zapewnia, że decyzje o zastosowaniu kruszywa z recyklingu są oparte na wiarygodnych i kompletnych danych, a jednocześnie wykorzystany jest cały potencjał materiału z recyklingu.



Rys. 1. Proponowany algorytm oceny kruszywa z recyklingu

3. Identyfikacja i ocena materiałów przed rozbiórką

Przed przystąpieniem do rozbiórki budynku kluczowym etapem jest analiza istniejącej dokumentacji obiektu. Najlepiej rozpocząć od dokumentacji projektowej, która zawiera szczegółowe informacje o konstrukcji, materiałach oraz przeznaczeniu obiektu, a tym samym zakładanych klasach ekspozycji. Jeśli dokumentacja projektowa nie jest dostępna, można sięgnąć po inne dostępne analizy lub ekspertyzy wykonane w trakcie użytkowania budynku, które również dostarczają cennych danych na temat stanu technicznego i charakterystyki konstrukcji. Problem z oceną charakterystyki materiałów dotyczy również magazynów odpadów, gdzie przez lata gromadzony jest materiał rozbiórkowy, często bez danych o jego pochodzeniu i wcześniejszych warunkach eksploatacji.

Współczesną, bardzo pomocną metodą w ocenie ilościowej i wstępnej jakościowej jest wykorzystanie skanowania 3D istniejącej konstrukcji. Skanowanie 3D to technika optycznego pozyskiwania informacji o geometrii obiektów fizycznych z wykorzystaniem sztucznie generowanych zewnętrznych źródeł światła [16]. Dane uzyskane w trakcie skanowania zapisywane są w formie cyfrowej chmury punktów, odwzorowującej przestrzenne położenie elementów skanowanego obiektu [17]. W postprocessingu – chmura punktów jest oczyszczana z artefaktów, a następnie poddawana triangulacji, co umożliwia wygenerowanie trójkątnej siatki STL [18].

W systemach skanowania wykorzystywane są różne typy urządzeń projekcyjnych, w tym aktywne jednostki, takie jak skanery laserowe oraz skanery światła strukturalnego, a także jednostki pasywne, oparte na analizie naturalnego światła odbitego od obiektu lub promieniowania w paśmie podczerwonym.

W przypadku skanowania dużych obiektów, takich jak budynki [19],[20], najczęściej stosuje się pasywne skanery optyczne, charakteryzujące się wysoką wydajnością i dobrą dokładnością pomiarową. Proces ten obejmuje wykonywanie pomiarów z wielu pozycji obserwacyjnych, przy czym sąsiadujące stanowiska mają wspólne obszary pomiarowe, co umożliwia precyzyjne łączenie i integrację danych.

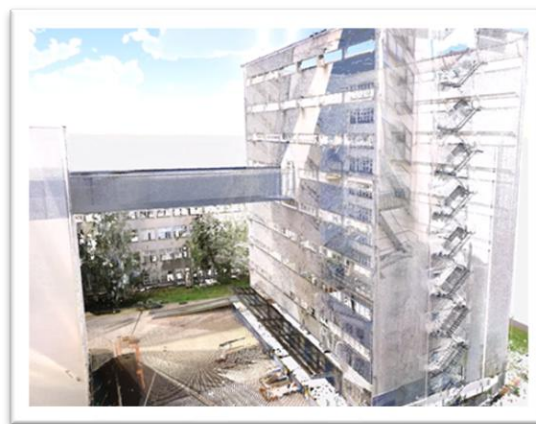
Technologia ta umożliwia szybkie i precyzyjne odwzorowanie geometrii obiektu, co pozwala na określenie wymiarów i liczby elementów konstrukcyjnych oraz na wstępną ocenę ilości i jakości betonu. Skan 3D ułatwia także optymalne wytypowanie miejsc do wykonania odwiertów, pozwalając na dokładną analizę przestrzenną i minimalizację ryzyka uszkodzeń podczas pobierania próbek. Dzięki temu proces badania stanu konstrukcji jest bardziej efektywny i bezpieczny. Przykładem takiego urządzenia jest naziemny skaning laserowy Terrestrial Laser Scanners (TLS) [20]. Działanie TLS opiera się na precyzyjnym pomiarze odległości pomiędzy skanerem a powierzchnią obiektu, co w połączeniu z pomiarem kąta umożliwia wyznaczenie współrzędnych 3D dużej liczby punktów w krótkim czasie. Skaner charakteryzuje się zakresem pomiarowym od 0,6 m do 70 m oraz rozdzielczością obrazu dochodzącą do 165 megapikseli w kolorze. Maksymalna dokładność pomiarowa wynosi ± 1 mm. Urządzenie zapewnia szerokie pole widzenia, obejmujące 360° w płaszczyźnie poziomej oraz 300° w pionie. Skanowanie odbywa się z wysoką prędkością, osiągającą do 2 milionów punktów na sekundę. Przystosowany jest do pracy w zróżnicowanych warunkach środowiskowych – działa w zakresie temperatur od -5°C do $+40^\circ\text{C}$ oraz cechuje się odpornością na podwyższoną wilgotność i zapylenie. Dane z pomiarów 3D znajdują zastosowanie przy cyfryzacji obiektów budowlanych. Trójwymiarowe skany umożliwiają tworzenie

dokładnych modeli, wykorzystywanych m.in. do analiz inżynierskich i obliczeń numerycznych [21], [22].

Przykład rezultatu badań skanerem przedstawiono na Rys. 2 i Rys. 3. Obiekt to budynek magazynu opakowań, który został zaprojektowany w konstrukcji żelbetowej, prefabrykowanej.



(a)



(b)

Rys. 2. Dokumentacja konstrukcji obiektu przed rozbiórką (a) zdjęcie tradycyjne, (b) obraz wykonany przy użyciu skanera 3D Faro Focus



(a)



(b)

Rys. 3. Dokumentacja wnętrza konstrukcji obiektu przed rozbiórką (a) zdjęcie tradycyjne, (b) obraz wykonany przy użyciu skanera 3D Faro Focus

3. Badania betonu przed rozbiórką

Po zgromadzeniu i przeanalizowaniu dokumentacji w tym danych z pomiarów 3D, kolejnym krokiem jest wytypowanie miejsc do wykonania odwiertów rdzeniowych w istniejącej konstrukcji. Odwierty te pozwalają na pobranie próbek betonu, które umożliwiają ocenę jego właściwości fizycznych i jakościowych, takich jak wytrzymałość na ściskanie, skład kruszywa, czy obecność ewentualnych zanieczyszczeń, zasięg

karbonatyzacji. Miejsca odwiertów powinny być dobrane tak, by minimalnie wpływać na integralność konstrukcji (Rys. 4).

Wytypowanie odpowiednich miejsc do wykonania odwiertów rdzeniowych jest kluczowe dla uzyskania reprezentatywnych i wiarygodnych wyników badań. Najważniejsze z kryteriów, które należy uwzględnić przy planowaniu lokalizacji odwiertów:

- **Reprezentatywność różnych elementów konstrukcyjnych** - Odwierty powinny obejmować różnorodne elementy nośne budynku, takie jak słupy, belki, płyty stropowe czy ściany nośne. Każdy z tych elementów może charakteryzować się innymi właściwościami materiałowymi i technologicznymi, wynikającymi z różnic w projektowaniu, wykonaniu czy eksploatacji. Pobranie próbek z różnych typów elementów pozwala na kompleksową ocenę stanu technicznego całej konstrukcji oraz identyfikację ewentualnych miejsc o obniżonej jakości lub uszkodzeniach. Ponadto, analiza różnych elementów umożliwia lepsze zrozumienie rozkładu naprężeń i zachowania konstrukcji podczas rozbiórki.



Rys. 4. Przykład odwiertów wykonanych w celu oceny charakterystycznej wytrzymałości na ściskanie

- **Minimalizacja wpływu na nośność i stabilność konstrukcji** - Podczas wyboru miejsc odwiertów należy zadbać o to, aby pobieranie próbek nie osłabiło istotnie nośności i stabilności konstrukcji, zwłaszcza jeśli rozbiórka będzie realizowana etapami lub jeśli obiekt będzie nadal użytkowany do momentu rozpoczęcia prac rozbiórkowych. Odwierty powinny być wykonywane w miejscach, które nie są kluczowe dla utrzymania integralności konstrukcji, a ich rozmiar i liczba powinny być ograniczone do niezbędnego minimum. W praktyce oznacza to unikanie wykonywania odwiertów w bezpośrednim sąsiedztwie połączeń konstrukcyjnych, stref koncentracji naprężeń czy elementów poddanych największym obciążeniom.
- **Dostępność techniczna i bezpieczeństwo wykonania odwiertów** - Kolejnym istotnym kryterium jest zapewnienie, że wytypowane miejsca będą dostępne technicznie i bezpieczne do wykonania odwiertów. Należy uwzględnić warunki przestrzenne, takie jak dostęp do powierzchni elementów konstrukcyjnych, obecność instalacji technicznych, przeszkód architektonicznych czy ograniczeń związanych z bezpieczeństwem pracy. W niektórych przypadkach konieczne może być zastosowanie specjalistycznego sprzętu lub metod umożliwiających wykonanie odwiertów w trudno dostępnych miejscach. Ponadto, podczas

planowania należy uwzględnić kwestie związane z ochroną osób wykonujących prace oraz minimalizacją wpływu na otoczenie, zwłaszcza w obiektach użytkowanych.

4. Rozbiórka i sortowanie materiałów

Proces recyklingu materiałów budowlanych rozpoczyna się już na placu budowy, gdzie prowadzona jest selektywna segregacja odpadów. W ramach tego etapu oddzielane są frakcje takie jak beton, cegła, ceramika, asfalt, metal, drewno oraz tworzywa sztuczne. Taki podział pozwala na bardziej efektywne przetwarzanie surowców i minimalizację zanieczyszczeń między poszczególnymi materiałami [25,26,27]. W zależności od charakteru inwestycji oraz dostępnych zasobów, przetwarzanie może odbywać się bezpośrednio na miejscu lub w specjalistycznych zakładach recyklingowych. Do jednego z kluczowych etapów należy oddzielenie zbrojenia stalowego od gruzu betonowego. W tym celu wykorzystuje się mobilne kruszarki wyposażone w elektromagnesy lub separatory magnetyczne, które skutecznie wyłapują elementy metalowe z rozdrobnionego materiału. Następnie odpady trafiają do kruszenia, gdzie wykorzystywane są różne typy kruszarek, m.in. szczękowe, udarowe (HSI i VSI) oraz stożkowe. Dobór maszyny zależy od rodzaju surowca oraz wymaganej frakcji końcowej. Kruszarki szczękowe lepiej sprawdzają się przy redukcji większych elementów i pozwalają na zachowanie części zaprawy cementowej przy ziarnach. Z kolei kruszarki udarowe skuteczniej rozbijają materiał i nadają kruszywom bardziej kulisty kształt, choć generują większy udział drobnych frakcji i wyższą nasiąkliwość. Po kruszeniu następuje przesiewanie przy użyciu przesiewaczy wibracyjnych, które pozwalają oddzielić materiał na poszczególne frakcje oraz usunąć zanieczyszczenia i pyły. W wielu zakładach stosuje się dodatkowo płukanie wodne, które poprawia czystość materiału i znacząco obniża jego nasiąkliwość, co ma duże znaczenie przy późniejszym zastosowaniu kruszyw w betonie. Wydajność tych procesów może wynosić od kilkudziesięciu do kilkuset ton na godzinę, w zależności od konfiguracji maszyn i rodzaju materiału wejściowego [28,29]. Sposób kruszenia oraz dalszej obróbki ma bezpośredni wpływ na właściwości kruszyw z recyklingu. Dlatego kompleksowa ocena aspektów ekonomicznych, ekologicznych i technicznych związanych z wykorzystaniem kruszyw z recyklingu powinna stanowić niezbędny element przy wyborze rozwiązań proekologicznych i ich praktycznych zastosowań w betonie. Niemniej jednak, wciąż brakuje narzędzi, które w sposób holistyczny wspierałyby proces podejmowania decyzji dotyczących zastosowania kruszyw [30, 31].

5. Badania laboratoryjne grubych kruszyw z recyklingu

W procesie oceny przydatności kruszywa grubego pochodzącego z recyklingu do zastosowań w betonie kluczowe jest przeprowadzenie kompleksowych badań jego właściwości fizycznych, mechanicznych oraz chemicznych. Analiza tych parametrów pozwala na ocenę jakości materiału oraz jego wpływu na trwałość i bezpieczeństwo elementów konstrukcji wytwarzanych z użyciem kruszywa z recyklingu.

Podstawowym etapem jest określenie wymiaru i uziarnienia kruszywa, które wpływają na strukturę oraz urabialność mieszanki betonowej. Zawartość frakcji drobnej jest

istotna z punktu widzenia właściwości roboczych i wytrzymałościowych betonu. Gęstość ziaren oraz chłonność wody są kluczowe dla bilansu wodnego mieszanki oraz trwałości konstrukcji. Indeksy kształtu i płaskości ziaren wpływają na zagęszczenie i właściwości mechaniczne betonu. Odporność na rozdrabnianie oraz na miażdżenie świadczą o trwałości kruszywa pod wpływem obciążeń mechanicznych.

Istotna jest także ocena naturalnej radioaktywności materiału, która ma znaczenie dla bezpieczeństwa użytkowników konstrukcji. Analiza zawartości metali ciężkich i innych substancji niebezpiecznych pozwala na kontrolę toksyczności i wpływu na środowisko, co jest szczególnie ważne w przypadku kruszyw z recyklingu. Niska zawartość chlorów, siarki i siarczanów wpływa na przydatność kruszywa z recyklingu w kontekście korozji zbrojenia. Jakość pyłu oraz odporność na działanie mrozu są kolejnymi parametrami decydującymi o trwałości materiału w zmiennych warunkach atmosferycznych.

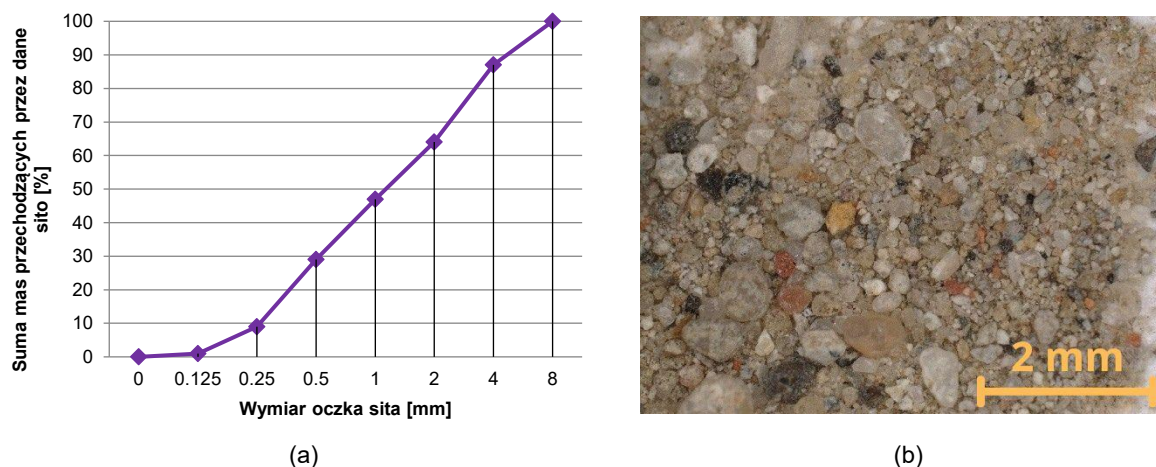
Analiza składu kruszywa pozwala na określenie udziału różnych komponentów, co wpływa na stabilność właściwości mechanicznych i fizycznych materiału. Klasyfikacja zgodna z obowiązującymi normami umożliwia właściwe zastosowanie kruszywa w budownictwie.

6. Badania laboratoryjne drobnych kruszyw z recyklingu

W świetle obowiązujących przepisów i zaleceń norm, drobne kruszywo z recyklingu, dopuszczane do stosowania w produkcji betonu, podlega weryfikacji szeregu istotnych właściwości fizykochemicznych, określonych m.in. w tabeli E.3.1 zawartej w załączniku do normy EN 12620:2002+A1:2008 [16]. Tabela 1 przedstawia zakres podstawowych wymagań wobec kruszyw recyklingowych, klasyfikowanych jako typ A, co oznacza materiały spełniające najwyższe wymagania jakościowe dla zastosowań konstrukcyjnych. Wymagana jest między innymi kontrola zawartości pyłów, która musi być określona ilościowo lub przypisana do odpowiedniej kategorii. Jakość frakcji pylastych oceniana jest poprzez wskaźnik błękitu metylowego, którego wartość nie powinna przekraczać 1,2 g/100 g. Gęstość ziaren w stanie suchym powinna wynosić co najmniej 2100 kg/m³, natomiast nasiąkliwość musi zostać zadeklarowana na podstawie wyników badań. Ponadto niezbędne jest określenie składu materiałowego frakcji, zgodnie z klasyfikacją zawierającą komponenty takie jak beton (Rc), beton oraz kruszywa niezwiązane (Rcu), ceramika czerwona (Rb), inne odpady ceramiczne (Ra), tworzywa lekkie (FL) oraz pozostałe (XRg). Wymagania te są zgodne z dopuszczalnymi udziałami poszczególnych składników, wskazującymi na dominację frakcji betonowych. Kolejnymi parametrami podlegającymi weryfikacji są: zawartość siarczanów rozpuszczalnych w wodzie, która nie powinna przekraczać SS_{0,2}, zawartość jonów chlorkowych rozpuszczalnych w kwasie – dla której wymaga się wartości deklarowanej – oraz wpływ kruszywa na początek czasu wiązania cementu, który nie powinien przekraczać wartości odpowiadającej A₄₀.

Norma EN 12620:2002+A1:2008 [16] formalnie nie wymaga badania składu drobnych frakcji kruszywa z recyklingu (składników Rc, Rcu, Rb, Ra itd.) – wymaganie to dotyczy jedynie kruszywa grubego z tego samego źródła. Jednak, zasadnym podejściem badawczym jest wykonanie również analizy składu dla drobnych frakcji. W praktyce można to osiągnąć poprzez np. analizę zdjęć mikroskopowych (optycznych

lub SEM) - Rys. 5, które pozwalają na oszacowanie udziałów składników mineralnych i pochodzenia materiału (np. ceramika, zaprawa, beton, inne zanieczyszczenia).



Rys. 5. Drobne kruszywo z recyklingu: a – uziarnienie, b – obraz mikroskopowy

7. Sprawdzenie potencjału kruszywa z recyklingu w mieszance betonowej i betonie

Końcowym i niezbędnym etapem proponowanej metodyki jest weryfikacja właściwości kruszyw z recyklingu w recepturach betonowych. Obejmuje ona zarówno analizę cech świeżej mieszanki (urabialność, konsystencja), jak i ocenę parametrów stwardniałego betonu (wytrzymałość, mrozoodporność, cechy związane z trwałością). Uzupełnieniem jest ocena ekologiczna i ekonomiczna, pozwalająca określić, czy zastosowanie kruszyw z recyklingu stanowi realną alternatywę dla kruszyw naturalnych.

8. Podsumowanie

W obliczu wyzwań związanych ze zrównoważonym rozwojem oraz koniecznością ograniczenia eksploatacji zasobów naturalnych, coraz większego znaczenia nabierają działania ukierunkowane na odzysk materiałów. Ocena właściwości kruszyw pochodzących z recyklingu wykorzystywanych w betonie potwierdza ich proekologiczny potencjał i wpisuje się w ideę gospodarki o obiegu zamkniętym. Problematyka kruszyw z recyklingu związana z ich praktycznym zastosowaniem dotyczy ich heterogeniczności. Konstrukcje przeznaczone do rozbiórki stanowią źródło kruszyw wtórnych o zmiennych właściwościach, których jakość zależy od rodzaju zastosowanych materiałów, wieku obiektu oraz warunków eksploatacyjnych. Żeby móc w sposób zrównoważony zarządzać ich jakością, można na etapie przed rozbiórką wykonać badania identyfikujące w celu określenia charakterystyk związanych i prognozować możliwe zastosowanie kruszyw. Aby móc w sposób zrównoważony zarządzać jakością pozyskiwanych kruszyw, warto już na etapie poprzedzającym rozbiórkę przeprowadzić badania identyfikacyjne. Pozwalają one określić kluczowe charakterystyki materiałów oraz prognozować ich potencjalne zastosowanie w dalszych procesach budowlanych.

Zaproponowana metodyka stanowi kompleksowe podejście do oceny jakości kruszywa z recyklingu, umożliwiające pełne wykorzystanie potencjału materiałowego zarówno frakcji drobnych, jak i grubych. Jej wieloetapowy charakter zapewnia spójność i wiarygodność wyników, a pominięcie któregośkolwiek z etapów może prowadzić do utraty części tego potencjału oraz ograniczenia możliwości praktycznego zastosowania kruszywa z recyklingu.

8. Literatura

- [1] J. Skocek, A. Ouzia, E. Vargas Serrano, and N. Pato, "Recycled Sand and Aggregates for Structural Concrete: Toward the Industrial Production of High-Quality Recycled Materials with Low Water Absorption," *Sustainability*, vol. 16, no. 2. 2024. doi: 10.3390/su16020814.
- [2] N. Kisku, H. Joshi, M. Ansari, S. K. Panda, S. Nayak, and S. C. Dutta, "A critical review and assessment for usage of recycled aggregate as sustainable construction material," *Constr. Build. Mater.*, vol. 131, pp. 721–740, 2017, doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.11.029>.
- [3] L. Kacimi, A. Simon-Masseron, S. Salem, A. Ghomari, and Z. Derriche, "Synthesis of belite cement clinker of high hydraulic reactivity," *Cem. Concr. Res.*, vol. 39, no. 7, pp. 559–565, 2009, doi: <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2009.02.004>.
- [4] M. Bardan and L. Czarnecki, "Green Recycled Aggregate in Concrete: Feasibility Study," *Materials*, vol. 18, no. 3. 2025. doi: 10.3390/ma18030488.
- [5] J. Hu, X. He, Q. Li, and S. Bai, "Experimental Study on the Influence of Specific Factors on the Compressive Strength of Recycled Fine Aggregate Concrete," in *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2019. doi: 10.1088/1755-1315/304/5/052083.
- [6] F. de Andrade Salgado and F. de Andrade Silva, "Recycled aggregates from construction and demolition waste towards an application on structural concrete: A review," *J. Build. Eng.*, vol. 52, p. 104452, 2022, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2022.104452>.
- [7] "PN-EN 206+A2:2021-08 Beton - Wymagania, właściwości użytkowe, produkcja i zgodność."
- [8] M. Kępniać and P. Łukowski, "Multicriteria Analysis of Cement Mortar with Recycled Sand," *Sustainability*, vol. 16, no. 5. 2024. doi: 10.3390/su16051773.
- [9] O. Boudlal and B. Melbouci, "Study of the behavior of aggregates demolition by the proctor and CBR tests," in *Geotechnical Special Publication*, 2009, pp. 75–80. doi: 10.1061/issno(352)12.
- [10] K. A. Mocová, H. Roztočilová, and D. Mariaková, "ECOTOXICOLOGICAL ASSESSMENT OF RECYCLED AGGREGATE AND CONCRETE VIA AQUATIC BIOTESTS," in *Acta Polytechnica CTU Proceedings*, 2022, pp. 672–677. doi: 10.14311/APP.2022.38.0672.
- [11] S. Jeon, "Study on the Validity of Tertiary Testing of Certified Recycled Coarse Aggregates Based on the Analysis of Follow-up Audits," *J. Korea Soc. Waste Manag.*, vol. 39, no. 2, pp. 160–165, 2022, doi: 10.9786/kswm.2022.39.2.160.
- [12] B. Melbouci, "Compaction and shearing behaviour study of recycled aggregates," *Constr. Build. Mater.*, vol. 23, no. 8, pp. 2723–2730, 2009, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2009.03.004.

- [13] J. Tavira, J. R. Jiménez, J. Ayuso, M. J. Sierra, and E. F. Ledesma, "Functional and structural parameters of a paved road section constructed with mixed recycled aggregates from non-selected construction and demolition waste with excavation soil," *Constr. Build. Mater.*, vol. 164, pp. 57–69, 2018, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2017.12.195.
- [14] A. Naim et al., "Assessing the Feasibility, Usability, and Durability of Recycled Construction and Demolition Waste in Road Construction in Morocco," in *Materials Research Proceedings*, 2024, pp. 19–32. doi: 10.21741/9781644903117-3.
- [15] V. W. Y. Tam, C. Y. Lo, and J. Xiao, "Bringing recycled aggregate to its full potential," *Proc. Inst. Civ. Eng. Waste Resour. Manag.*, vol. 166, no. 3, pp. 128–136, 2013, doi: 10.1680/warm.12.00020.
- [16] J. Flugge, K. Wendt, H. Danzebrink, and A. Abou-zeid, "Optical Methods for Dimensional Metrology in Production Engineering," *CIRP Ann. - Manuf. Technol.*, vol. 51, no. 2, pp. 685–699, 2002.
- [17] V. Peansupap and A. M. May, "Development of a System for Measuring Surface Slope with Point Cloud Data," in *Lecture Notes in Civil Engineering*, vol. 369, Springer Science and Business Media Deutschland GmbH, 2024, pp. 507–516. doi: 10.1007/978-981-99-4049-3_40.
- [18] M. Szilvási-Nagy and G. Mátyási, "Analysis of STL Files," *Math. Comput. Model.*, vol. 38, no. 7–9, pp. 945–960, 2003, doi: 10.1016/s0895-7177(03)90079-3.
- [19] H. H. Tran, H. Q. Vu, and A. Van Tran, "Application of FARO Focus 3D S350 Terrestrial Laser Scanner in Building 3D Models of Potential Areas of Landslides and Rocks—Case Study in Ha Giang Province, Vietnam," in *Lecture Notes in Civil Engineering*, vol. 344 LNCE, Springer Science and Business Media Deutschland GmbH, 2024, pp. 703–710. doi: 10.1007/978-981-99-2345-8_72.
- [20] N. Shen et al., "A review of terrestrial laser scanning (TLS)-based technologies for deformation monitoring in engineering," *Meas. J. Int. Meas. Confed.*, vol. 223, p. 113684, Dec. 2023, doi: 10.1016/j.measurement.2023.113684.
- [21] A. Piekarczyk, E. Sudoł, and A. Mazurek, "Measurement analysis of large-area elements of External Thermal Insulation Composite Systems using 3D scanning techniques," *Meas. J. Int. Meas. Confed.*, vol. 233, no. April, 2024, doi: 10.1016/j.measurement.2024.114755.
- [22] A. Piekarczyk, A. Mazurek, J. Szer, and I. Szer, "A Case Study of 3D Scanning Techniques in Civil Engineering Using the Terrestrial Laser Scanning Technique," *Buildings*, vol. 14, no. 12, p. 3703, 2024.
- [23] M. Gruszczyński and A. Golda, "Zmiany w normalizacji betonu," *Bud. • Technol. • Arch.*, vol. 1 (109), pp. 76–78, 2025.
- [24] WOYCIECHOWSKI, Piotr. Model karbonatyzacji betonu. *Prace Naukowe Politechniki Warszawskiej. Budownictwo*, 2013.
- [25] NEDELJKOVIĆ, Marija, et al. Use of fine recycled concrete aggregates in concrete: A critical review. *Journal of Building Engineering*, 2021, 38: 102196.
- [26] BRAVO, Miguel, et al. Durability performance of concrete with recycled aggregates from construction and demolition waste plants. *Construction and Building Materials*, 2015, 77: 357-369.
- [27] DELVOIE, Simon, et al. Construction and Demolition Wastes: specific conditions for recycling in North West Europe. *Cement, Wapno, Beton*, 2020, 1.
- [28] PEIRIS, Dulshi, et al. Impact of treatment methods on recycled concrete

- aggregate performance: a comprehensive review. Environmental Science and Pollution Research, 2025, 1-34.
- [29] BARDAN, Magdalena; CZARNECKI, Lech. Green Recycled Aggregate in Concrete: Feasibility Study. Materials, 2025, 18.3: 488.
- [30] HUBERT, Julien, et al. Effect of crushing method on the properties of produced recycled concrete aggregates. Buildings, 2023, 13.9: 2217.
- [31] SALEHI, Safoura, et al. Sustainable pavement construction: A systematic literature review of environmental and economic analysis of recycled materials. Journal of Cleaner Production, 2021, 313: 127936.

prof. dr hab. inż. Anna Halicka

Politechnika Lubelska

prof. dr hab. inż. Paweł Łukowski

Politechnika Warszawska

Projektowanie konstrukcji betonowych ze względu na trwałość według nowelizacji PN-EN 206 i PN-EN 1992-1

Design of concrete structures with respect of durability in accordance with PN-EN 206 and PN-EN 1992-1 standards

Streszczenie

Jednym z kierunków nowelizacji norm EN 206 i EN 1992-1 jest nowe podejście do trwałości konstrukcji z betonu i ich projektowania ze względu na trwałość. Znowelizowana norma PN-EN 1992-1 została już wprowadzona przez Polski Komitet Normalizacyjny do katalogu norm aktualnych i jako taka winna być podstawą projektowania konstrukcji z betonu. Natomiast nowelizacja normy EN 206 jest wciąż na etapie uzgodnień na szczęblu Europejskiego Komitetu Normalizacyjnego. W artykule omówiono czynniki korozyjne i klasyfikację środowisk w dokumentach normalizacyjnych oraz założenia projektowania konstrukcji ze względu na trwałość ze szczególnym uwzględnieniem karbonatyzacji i agresji chlorkowej. Przedstawiono zastosowaną w normie metodę Exposure Resistance Classes (ERC) oraz przedyskutowano związek składu betonu z jego klasą odporności.

Abstract

An important direction of amendment of the European Standards EN 206 and EN 1992-1 is a new approach to the durability of concrete structures and their design towards durability. The amended Eurocode EN 1992-1 has already been introduced by the Polish Committee for Standardisation and should be a base for concrete structures' design. However, the amendment of EN 206 is still in the process of searching for consensus within the European Committee for Standardisation. The paper presents the corrosion factors and environment categorisation in the European Standards and the assumptions for structures' design towards durability, with particular attention paid to carbonation and chloride aggression. The exposure Resistance Classes (ERC) approach is described, and the relation between concrete composition and its resistance class is discussed.

1. Wprowadzenie

Jednym z kierunków nowelizacji norm EN 206 *Beton. Wymagania, właściwości, produkcja i zgodność* [1] i EN 1992-1 *Projektowanie konstrukcji z betonu* [2] jest nowe podejście do trwałości konstrukcji z betonu i ich projektowania ze względu na trwałość. Znowelizowana EN 1992-1 została już w 2024 r. wprowadzona przez PKN do katalogu norm aktualnych i jako taka jest (do 2028 r. równolegle z poprzednią wersją) podstawą projektowania konstrukcji z betonu. Natomiast nowelizacja EN 206 jest na etapie uzgodnień i poszukiwania konsensusu w obrębie KT104 Europejskiego Komitetu Normalizacyjnego (CEN). W czasie przygotowania niniejszego artykułu sprawa ta wydaje się wciąż jeszcze daleka od skutecznej finalizacji.

Norma PN-EN 1992-1 [2] podniosła rangę trwałości konstrukcji żelbetowej, uznając ją za „stan graniczny trwałości” (*condition limit state* lub *durability limit state*), który powinien być rozważany dodatkowo do sprawdzenia stanów granicznych nośności i użyteczności. Przyjęto, że koniec projektowanego okresu „życia” konstrukcji następuje wtedy, gdy korozja zbrojenia albo ubytek pola przekroju lub/i wytrzymałości betonu osiągnie poziom uniemożliwiający dalsze użytkowanie. Ten stan graniczny zidentyfikowano jako sytuację, gdy wskutek karbonatyzacji nastąpi zmniejszenie średnicy pręta o 50 μm lub gdy wskutek wniknięcia chlorków powstaną w zbrojeniu wżery o głębokości 500 μm .

2. Czynniki korozyjne i klasyfikacja środowisk

W normie EC2-1 [2] wymieniono następujące czynniki korozyjne:

- AAR – reakcja alkalia-kruszywo,
- czynniki biologiczne: algi, wegetacja roślin,
- czynniki chemiczne z gruntu, wody gruntowej i procesów technologicznych (kwasy, miękka woda, siarczany, inne),
- opóźniona formacja etryngitu,
- czynniki fizyczne (abrazja, zmiany temperatury, w tym zamrażanie/rozmarzanie, penetracja wody),
- korozja zbrojenia wskutek karbonatyzacji lub wniknięcia chlorków,
- korozja zbrojenia wskutek chlorków zawartych w mieszance betonowej,
- spękania wskutek naprężeń korozyjnych.

Klasyfikacja środowisk w nowelizacji normy [2] jest analogiczna jak w dotychczasowej normie [3], z tym że obok klas X0 – brak korozji, XC – korozja spowodowana przez karbonatyzację (XC1÷XC4), XD (korozja spowodowana przez chlorki nie pochodzące z wody morskiej) (XD1÷XD3), XS – korozja spowodowana przez chlorki z wody morskiej (XS1÷XS3), XF – zamrażanie/rozmarzanie (XF1÷XF3), XA – korozja chemiczna (XA1÷XA3), dodano korozję mechaniczną spowodowaną przez abrazję XM (XM1÷XM3). Nieco różnią się opisy środowisk odpowiadających klasom X0 i XC. Klasie X0 odpowiadają jedynie konstrukcje betonowe niezbrojone, podczas gdy dotychczas w normie [3] podawano, że odpowiadają jej konstrukcje niezbrojone w budynkach i znajdujące się w warunkach niskiej wilgotności powietrza. Klasy ekspozycji związane z karbonatyzacją opisane są w normie [2] następująco:

- XC1: środowisko suche (wewnątrz budynków o niskiej wilgotności); podczas gdy dotychczas: środowisko suche lub permanentnie mokre (wewnątrz budynków o niskiej wilgotności, konstrukcje stale zanurzone w wodzie),
 - XC2: środowisko mokre lub o permanentnie wysokiej wilgotności, rzadko suche (powierzchnie narażone na długotrwały kontakt z wodą, konstrukcje trwale zanurzone w wodzie, stale narażone na wysoką wilgotność, wiele fundamentów i zbiorników nie-zewnętrznych); podczas gdy dotychczas: środowisko mokre, rzadko suche (narażone na długotrwały kontakt z wodą, wiele fundamentów).
- W przypadku klas XC3, XC4, XD, XS, XF i XA nie ma różnic pomiędzy normą [3] i jej nowelizacją [2].

3. Projektowanie konstrukcji z betonu ze względu na trwałość w warunkach karbonatyzacji i agresji chlorkowej

Podstawowym sposobem zapewnienia trwałości konstrukcji żelbetowej i sprężonej poddanej karbonatyzacji i agresji chlorkowej na jest betonowa otulina tę trwałość zapewniającej. Dotychczas stosowana była metoda *klas konstrukcji*, a nowa norma wprowadza metodę *klas odporności na agresję środowiska* ERC.

3.1 Dotychczasowa metoda klas konstrukcji

Dotychczas, według normy [3] określenia grubości otuliny $c_{min,dur}$ ze względu na trwałość dokonuje się w zależności od tzw. klasy konstrukcji, ustalonej następująco. Przyjmuje się wstępnie klasę konstrukcji „4” i modyfikuje się ją dodając lub odejmując „1” zależnie od klasy ekspozycji projektowanej konstrukcji, przewidywanego okresu użytkowania, założonej klasy betonu, oraz od tego, czy konstrukcja jest płytą i czy stosowano specjalne zasady kontroli w czasie jej wykonania. Po ustaleniu klasy konstrukcji grubość otuliny określana jest w zależności od klasy ekspozycji (tablica 1), przy czym jest to ekspozycja jedynie na karbonatyzację i agresję chlorkową.

Tablica 1. Minimalne grubości otuliny $c_{min,dur}$ ze względu na trwałość w zależności od klasy konstrukcji i klasy ekspozycji wg EN 1992-1-1 [3]

Wymagania środowiskowe dla $c_{min,dur}$ [mm]							
Klasa konstrukcji	X0	XC1	XC2/XC3	XC4	XD1/XS1	XD2/XD2	XD3/XS3
S1	10	10	10	15	20	25	30
S2	10	10	15	20	25	30	35
S3	10	10	15	25	30	35	40
S4	10	15	25	30	35	40	45
S5	15	20	30	35	40	45	50
S6	20	25	35	40	45	50	55

3.2 Metoda Exposure Resistance Classes ERC

W normie PN-EN 1992-1 [2] metoda klas konstrukcji została przeniesiona do załącznika P jako alternatywna, natomiast jako podstawową wprowadzono metodę Exposure Resistance Classes ERC. Metoda alternatywna może zostać wybrana jako podstawowa w załączniku krajowym.

Metoda ERC pozwala na określenie minimalnej grubości otuliny ze względu na trwałość $c_{min,dur}$ w warunkach karbonatyzacji i penetracji chlorków. Jej podstawą jest stwierdzenie, że na trwałość wpływa klasa ekspozycji, klasa odporności betonu i grubość otuliny. Aby zapewnić założoną trwałość przy danej klasie ekspozycji, otulina zbrojenia wykonana z betonu o klasie odporności XR winna być nie cieńsza $c_{min,dur}$. To znaczy, że już na etapie projektowania konstrukcji należy przyjąć, tak jak klasę wytrzymałości betonu, także klasę odporności XR betonu. Do decyzji projektanta pozostaje więc, czy przyjąć grubą otulinę i beton o niższej klasie odporności czy przyjąć cieńszą otulinę i beton o wyższej klasie odporności.

Tablica 2. Minimalna grubość otuliny $c_{min,dur}$ [mm] ze względu na trwałość, zależna od klasy odporności betonu na karbonatyzację i klasy ekspozycji wg PN-EN 1992-1 [2]

Klasy ekspozycji z uwagi na karbonatyzację								
ERC	XC1		XC2		XC3		XC4	
	Przewidywany czas życia [lata]							
	50	100	50	100	50	100	50	100
XRC 0,5	10	10	10	10	10	10	10	10
XRC 1	10	10	10	10	10	15	10	15
XRC 2	10	15	10	15	15	25	15	25
XRC 3	10	15	15	20	20	30	20	30
XRC 4	10	20	15	25	25	35	25	40
XRC 5	15	25	20	30	25	45	30	45
XRC 6	15	25	25	35	35	55	40	55
XRC 7	15	30	25	40	40	60	45	60

Tablica 3. Minimalna grubość otuliny $c_{min,dur}$ [mm] ze względu na trwałość, zależna od klasy odporności betonu na chlorki i klasy ekspozycji wg PN-EN 1992-1 [2]

ERC	Klasy ekspozycji z uwagi na wnikanie chlorków											
	XS1		XS2		XS3		XD1		XD2		XD3	
	Przewidywany czas życia [lata]											
	50	100	50	100	50	100	50	100	50	100	50	100
XRDS 0,5	20	20	20	30	30	40	20	20	20	30	30	40
XRDS 1	20	25	25	35	35	45	20	25	25	35	35	45
XRDS 1,5	25	30	30	40	40	50	25	30	30	40	40	50
XRDS 2	25	30	35	45	45	55	25	30	35	45	45	55
XRDS 3	30	35	40	50	55	65	30	35	40	50	55	65
XRDS 4	30	40	50	60	60	80	30	40	50	60	60	80
XRDS 5	35	45	60	70	70	-	35	45	60	70	70	-
XRDS 6	40	50	65	80	-	-	40	50	65	80	-	-
XRDS 8	45	55	75	-	-	-	45	55	75	-	-	-
XRDS 10	50	65	80	-	-	-	50	65	80	-	-	-

W przypadku betonu poddanego karbonatyzacji, klasy odporności betonu XRC mają wymiar szybkości karbonatyzacji ($\text{mm}/\sqrt{rok}$). W tablicy 2 podane są minimalne grubości otuliny $c_{min,dur}$ ze względu na karbonatyzację dla różnych klas XRC, które zostały ustalone w założeniu, że karbonatyzacja osiągnie grubość otuliny po 50 latach w warunkach referencyjnych (400 ppm CO_2 , RH=65%, 20°C).

W przypadku korozji spowodowanej chlorkami, klasy odporności betonu XRDS mają wymiar współczynnika dyfuzji ($10^{-13} \text{ m}^2/\text{s}$). W tablicy 3 zestawiono minimalne grubości otuliny $c_{\min, \text{dur}}$ ze względu na penetrację chlorków dla różnych klas XRDS, które zostały ustalone w założeniu, że głębokość penetracji chlorków osiągnie grubość otuliny po 50 latach w warunkach referencyjnych (zawartość chlorków - 6% masy spoiwa łącznie z dodatkami II typu), przy jednostronnej ekspozycji na referencyjną wodę morską (30 g NaCl / liter w temp. 20°C).

W pracy [4] podsumowano metodę ERC stwierdzeniem, że co prawda metoda ta zwiększa transparentność, zapewnia unifikację wymagań co do klasyfikacji betonu oraz ułatwia stosowanie nowych rozwiązań materiałowych, jednak jej wprowadzenie do praktyki wymaga zapewnienia, że istnieją wiarygodne metody badawcze, oraz że znane są skutki długotrwałego zachowania się betonów, zwłaszcza nowych, w warunkach agresywnych. Jeśli nie – stosowane będzie podejście konserwatywne, co może ograniczyć wprowadzanie nowości materiałowych. Autorzy [4] postulują też, aby w przypadku wielkoskalowych konstrukcji pracujących w warunkach silnej agresji i wysokich wymagań co do niezawodności, stosować podejście w pełni probabilistyczne, jakie zaprezentowane jest w *fib Model Code* [5,6].

Tablica 4. Podstawowe elementy normowych procedur badania odporności betonu na karbonatyzację

Norma / procedura	Próbki	Pielęgnacja	Czas badania po pielęgnacji
EN 12390-10 / Karbonatyzacja w komorze klimatycznej	2 beleczki o minimalnej długości 350 mm	24 ± 2 h w formach pod folią + 27 dni w war. normowych + 16 ± 2 h w war. laboratoryjnych powietrzno-suchych	Badanie po 3, 6 i 12 mies. Jeśli po 1 roku głębokość karbonatyzacji jest mniejsza niż 5 mm, czas badania wydłuża się do 2 lat
EN 12390-10 / Karbonatyzacja w warunkach naturalnych		24 ± 2 h w formach pod folią + 2 to 7 dni w szczelnym opakowaniu, do osiągnięcia 50% wytrzymałości proj.	
EN 12390-12 / Karbonatyzacja przyspieszona	2 beleczki min. 280mm lub 8 kostek lub 5 walców o boku ≥ 3 x maks. rozmiar kruszywa	20 ± 4 h w formach pod folią + 28 dni w war. normowych + 14 dni w war. laboratoryjnych powietrzno-suchych	Badanie po 7, 28 i 70 dniach w komorze karbonatyzacyjnej o stężeniu CO ₂ 3,0 ± 0,5%

Tablica 5. Podstawowe elementy normowych procedur badania odporności betonu na wnikanie jonów chlorkowych

Norma / procedura	Próbki	Pielęgnacja	Czas do badania po pielęgnacji
EN 12390-11 / Dyfuzja jednokierunkowa	Kostka, walec lub rdzeń	28 dni w war. normowych lub dłużej, odpowiednio do rodzaju spoiwa	90 dni w 3% NaCl
EN 12390-18 / Oznaczanie wsp. migracji	5 walców 50 ± 1 mm lub 3 walce 100 ± 1 mm	28 dni w warunkach normowych	6 h do 7 dni w ~5% NaCl przy napięciu 30 V

3.3 Procedury badania odporności betonu na karbonatyzację i chlorki

Metody oznaczania odporności betonu na karbonatyzację są opisane w PN-EN 12390-10 [10] – badanie w warunkach atmosferycznego stężenia CO₂ i PN-EN 12390-12 [11] – badanie w warunkach karbonatyzacji przyspieszonej. Miarą odporności betonu jest szybkość postępu karbonatyzacji [mm/ $\sqrt{\text{lata}}$]. Głębokość karbonatyzacji oznacza się metodą fenoloftaleinową. Badanie przy naturalnym stężeniu dwutlenku węgla, które w standardowych warunkach (temperatura 20°C, wilgotność względna 65%) wynosi około 400 ppm, tj. 0,04% obj., można prowadzić w środowisku naturalnym lub w komorze klimatycznej; jest to badanie długotrwałe (minimum 1 rok). Badanie przyspieszone wymaga zastosowania specjalnej komory karbonatyzacyjnej, w której utrzymuje się stężenie CO₂ wynoszące ok. 3% obj. (tablica 4).

Metody badania odporności betonu na wnikanie jonów chlorkowych są opisane w PN-EN 12390-11 [12] – wnikanie w warunkach dyfuzji jednokierunkowej i PN-EN 12390-18 [13] – oznaczanie współczynnika migracji chlorków (tablica 5). Miarą odporności betonu jest współczynnik dyfuzji jonów chlorkowych [m²/s], z uwzględnieniem wskaźnika starzenia określanego dla wieku 50 lat na podstawie przyjętego modelu. Dopuszcza się stosowanie alternatywnych metod badawczych i kryteriów, obowiązujących w miejscu stosowania, pod warunkiem ich skalibrowania z metodami i kryteriami odniesienia. Po przeprowadzeniu badania typu, alternatywne metody i kryteria mogą być również stosowane do oceny zgodności.

3.4 Skład betonu a jego klasa odporności ERC

Dla prawidłowego zastosowania metody ERC niezbędne jest zapewnienie, że beton o przewidzianej w projekcie klasie XRC lub XRSD taką klasę wykaże w rzeczywistości. Według dostępnych projektów nowelizowanej normy [1], odporność betonu (szybkość karbonatyzacji lub współczynnik dyfuzji), charakterystyczną dla danej klasy, można osiągnąć przez:

- zgodność z odpowiednimi wartościami granicznymi składu betonu (mają być one podane w normie EN 206 lub dokumentach krajowych),
- i/lub potwierdzenie standaryzowanymi badaniami, że dana klasa jest osiągnięta.

Wydaje się, że o jednoznaczne rekomendacje normowe będzie trudno, szczególnie ze względu na dużą różnorodność stosowanych cementów [5], zatem to producenci betonu będą musieli wykazać na podstawie badań, że zastosowane przez nich receptury zapewnią żądaną klasę odporności betonu.

Badacze wskazują na zależność klasy odporności od wielu czynników. Poniżej zostaną przytoczone te zależności dla odporności na karbonatyzację.

W publikacji [7], bazując na zaleceniach hiszpańskiego Min. Transportu, założono, że szybkość karbonatyzacji zależy od wytrzymałości charakterystycznej betonu i zawartości powietrza i sporządzono tablicę zależności klasy odporności XRC od tych czynników. I tak dla przykładu:

- beton na cem. portlandzkim o zaw. powietrza < 4,5% zapewnia klasę XRC 0,5, jeśli $f_{ck}=80\text{MPa}$, a klasę XRC 7, jeśli $f_{ck}=26\text{MPa}$,
- beton na cem. portlandzkim z 25% dodatkiem popiołu lotnego o zaw. powietrza < 4,5% zapewnia klasę XRC 0,5 przy $f_{ck}=128\text{MPa}$, a klasę XRC 7 przy $f_{ck}=27\text{MPa}$,
- beton na cem. portlandzkim z 9% dodatkiem mikrokrokrzemionki o zaw. powietrza < 4,5% zapewnia klasę XRC 0,5 przy $f_{ck}=139\text{MPa}$, a klasę XRC 7 przy $f_{ck}=29\text{MPa}$.

Wydaje się jednak, że uzależnienie klasy odporności betonu od wytrzymałościowej jest uproszczeniem, a wytrzymałość na ściskanie mogłaby być traktowana jedynie jako „parametr zastępczy” będący wynikiem wieloparametrowego składu betonu. Naszym zdaniem, nie jest to więc zależność w pełni miarodajna.

Pewną orientację co do składów betonów odpornych na karbonatyzację znaleźć można w pracy [8]. Zaprezentowano tu badania szybkości karbonatyzacji w zależności od typu cementu i jego zawartości oraz wskaźnika w/c. Stwierdzono, że szybkość ta wyniosła w przypadku cementu CEM I ok. $1 \div 3 \frac{\text{mm}}{\sqrt{\text{rok}}}$, jeśli użyto cementu CEM II – $1 \div 4 \frac{\text{mm}}{\sqrt{\text{rok}}}$, przy cemencie CEM IIb – $2 \div 7 \frac{\text{mm}}{\sqrt{\text{rok}}}$, a przy CEM III – $3 \div 9 \frac{\text{mm}}{\sqrt{\text{rok}}}$.

Badano też zależność szybkości karbonatyzacji od w/c oraz zawartości klinkieru. I tak szybkość karbonatyzacji waha się:

- od ok. $4 \text{ mm}/\sqrt{\text{rok}}$ przy zaw. klinkieru ok. 250 kg/m^3 do ok. $9 \text{ mm}/\sqrt{\text{rok}}$ przy zaw. klinkieru ok. 150 kg/m^3 , jeśli $w/c=0,64 \div 0,65$;
- od ok. $3 \text{ mm}/\sqrt{\text{rok}}$ przy zaw. klinkieru ok. 320 kg/m^3 do ok. $6 \text{ mm}/\sqrt{\text{rok}}$ przy zaw. klinkieru ok. 170 kg/m^3 , jeśli $w/c=0,59$;
- od ok. $2 \text{ mm}/\sqrt{\text{rok}}$ przy zaw. klinkieru ok. 300 kg/m^3 do ok. $5 \text{ mm}/\sqrt{\text{rok}}$ przy zaw. klinkieru ok. 170 kg/m^3 , jeśli $w/c=0,54$;
- od ok. $2 \text{ mm}/\sqrt{\text{rok}}$ przy zaw. klinkieru ok. 350 kg/m^3 do $3 \text{ mm}/\sqrt{\text{rok}}$ przy zaw. klinkieru 180 kg/m^3 , $w/c=0,46$;
- od ok. $0 \text{ mm}/\sqrt{\text{rok}}$ do $3 \text{ mm}/\sqrt{\text{rok}}$, jeśli $w/c=0,30$.

W pracy [9] przebadano 4 składy betonów CEM II/AM i CEM II/AS o różnych zawartościach żużla i wapienia w ilości $280 \div 470 \text{ kg/m}^3$ oraz wskaźnikach $w/c = 0,36 \div 0,61$. Betony badano w wieku 7, 28, 90, 180 i 365 dni. Metodą najmniejszych kwadratów dobrano współczynniki proporcjonalności pomiędzy głębokością karbonatyzacji a pierwiastkiem z wieku betonu i na tej podstawie oszacowano szybkość karbonatyzacji w wieku 50 i 100 lat. Stwierdzono, że wszystkie składy betonów zapewniają osiągnięcie klas od XRC2 do XCR7, przy czym im większe w/c tym wyższa klasa. Ta liniowa zależność jest odwrotna do zależności „w/c- wytrzymałość” i w takim sensie wytrzymałość może być „zastępczą miarą” odporności na karbonatyzację, ale tylko w obrębie jednego składu betonu. Najniższą odporność wykazał beton na cemencie CEM II/AM(SLL)32,5R o nie dobranej ściśle zawartości składników, a najwyższą beton na tym samym cemencie ale przy zawartości 14 lub 17% żużla i 4 lub 3 % wapienia. Beton na cemencie CEM II/AS 32,5R miał pośrednie odporności.

6. Projektowanie konstrukcji z betonu ze względu na trwałość w warunkach innych agresji

Według znowelizowanej normy PN-EN 1992-1 [2], odporność betonów w innych klasach ekspozycji niż karbonatyzacja i agresja chlorkowa, winna być zapewniona przez dobrany celowo skład, a w szczególności w przypadku:

- zamrażania/rozmarzania - skład winien być zgodny z rekomendacjami znowelizowanej normy EN 206 [1],
- agresji chemicznej - winien być użyty beton o udokumentowanym składzie zapewniającym odporność na dany czynnik, a w przeciwnym przypadku należy zastosować wykładziny lub powłoki.

- ścierania – należy zastosować beton o składzie, który jest udokumentowany jako odporny na ścieranie w planowanym okresie użytkowania (w tym przypadku należy dodatkowo zwiększyć grubość otuliny ustalonej z innych warunków w zależności od klasy ekspozycji: dla XM1 o 5 mm, dla XM2 o 10 mm, dla XM3 o 15 mm), a w przeciwnym przypadku należy zastosować okładziny.

7. Podsumowanie

Wprowadzenie metody ERC do praktyki wymagać będzie obszernych badań betonów o typowych składach, wykonanych na polskich cementach. Ze względu na założoną trwałość konstrukcji 50 lub 100 lat konieczne będzie zastosowanie wiarygodnego przejścia od wyników badań krótkoterminowych do przewidywanego zasięgu korozji w ciągu tego właśnie długiego okresu. Zwrócić też trzeba uwagę na konieczność wykonywania znacznej liczby powtórzeń pozwalających na określenie miarodajnych, opracowanych statystycznie wartości XRC i XRS.

Literatura

- [1] PN-EN 206+A2:2021-08 Beton – wymagania, właściwości użytkowe, produkcja i zgodność
- [2] PN-EN 1992-1-1:2024 Eurokod 2: Projektowanie konstrukcji z betonu. Część 1-1: Reguły ogólne i reguły dla budynków, mostów i konstrukcji inżynierskich
- [3] PN-EN 1992-1-1:2008 Eurokod 2: Projektowanie konstrukcji z betonu .Część 1-1: Reguły ogólne i reguły dla budynków,
- [4] Geiker M.R., Hendriks M.A.N., Elsner B., Durability-based design: the European perspective, Sustainable and Resilient Infrastructure, 2023, vol. 8 no 2, 169-184
- [5] fib Model Code for Service life design, Bulletin 34, 2006
- [6] fib Model Code 2010, Bulletin 56, 2012
- [7] Gil-Martin L.M., Hdz-Gil L., Molero E., Hernández-Montes E., The relationship between concrete strength and classess of resistance against corrosion induced by carbonatisation: a proposal for the design of extreamly durable structures in accordance with Eurocode 2, *Sustainability* 2023, 15, 7976
- [8] Müller Ch.: How standards suport sustainability of cement and concretein Europe, *Cement and Concrete Research* 173 (2023) 107288
- [9] Georgescu D., Vacareanu R., Aldea A., Apostu A., Arion C., Assessment of the sustainability of concreto by ensuring performance during structure service life, *Sustainability* 2022, 14, 617
- [10] PN-EN 12390-10:2019-02 Badania betonu, Cz.10: Oznaczanie odporności betonu na karbonatyzację w warunkach stężeń CO₂ na poziomie atmosferycznym
- [11] PN-EN 12390-12:2020-06 Badania betonu –, Cz. 12: Oznaczanie odporności betonu na karbonatyzację – Przyspieszona metoda karbonatyzacji
- [12] PN-EN 12390-11:2015-09 Badania betonu – Cz. 11: Oznaczanie odporności betonu na wnikanie chlorków w warunkach jednokierunkowej dyfuzji
- [13] PN-EN 12390-18+A1:2025-04 Badania betonu – Cz. 18: Oznaczanie współczynnika migracji chlorków

mgr inż. Patryk Ślęczka
Cemex Polska Sp. z o.o.

mgr inż. Marta Skorniewska
Cemex Polska Sp. z o.o.

mgr inż. Michał Kałużyński
Cemex Polska Sp. z o.o.

Betony wodoprzepuszczalne *PERVIA* dla poprawy retencji wody – praktyczne przykłady zastosowań

PERVIA water-permeable concretes for improved water retention - practical application examples

Streszczenie

Jaka jest trwałość betonów jamistych oraz jak sprawdzić, czy filtracja wody nadal działa? - to pytanie pojawiło się po jednej z prezentacji na XII Konferencji Dni Betonu. Wówczas nie uzyskano w pełni satysfakcjonującej odpowiedzi. Kontynuując tę dyskusję, przedstawiamy nasze praktyczne doświadczenia ze stosowania betonów wodoprzepuszczalnych jako warstwy nawierzchniowej. To rozwiązanie, z uwagi na unikatową zdolność do filtracji wody, przyczynia się do poprawy gospodarki wodnej oraz estetyki, szczególnie w miejskich przestrzeniach publicznych.

Beton ten, nazywany potocznie „jamistym” czy „drenażowym”, ponownie zyskuje na popularności również w Polsce. W ostatnich latach jest aplikowany nie tylko na podbudowy, ale coraz częściej także jako nawierzchnia. Prowadzone są ponadto badania nad jego nowymi, potencjalnymi zastosowaniami np. w fotokatalizie czy immobilizacji metali ciężkich. Jak każdy materiał, beton wodoprzepuszczalny ma swoje ograniczenia, zwłaszcza w zakresie wytrzymałości - gdzie natomiast leży granica jego odporności na agresję środowiskową oraz zachowania właściwości filtracyjnych?

Autorzy referatu od lat poszukują odpowiedzi na te pytania, prowadząc prace laboratoryjne oraz zbierając doświadczenia z wykonanych realizacji. W artykule opisano zastosowania betonów wodoprzepuszczalnych *PERVIA* przy rewitalizacji parków, ulic, budowie parkingów, chodników, skwerów i ścieżek rowerowych. Szczególną uwagę poświęcono innowacyjnemu zastosowaniu jako warstwy odsączającej w tunelu na węźle „MPL Okęcie” w Warszawie. Takie rozwiązanie pozwoliło uniknąć nadmiernej przebudowy obiektu i skutecznie wspiera odprowadzenie wody.

Doświadczenia autorów pokazują, że użycie betonu wodoprzepuszczalnego jest uzasadnione nie tylko z powodów ekologicznych, ale także estetycznych i funkcjonalnych.

Abstract

What is the durability of porous concretes and how to check if water filtration is still working? - this question arose after one of the presentations at the 12th Concrete Days Conference. At the time, there was no fully satisfactory answer. Following on from this discussion, here is our practical experience of using water-permeable concrete as a top layer. This solution, due to its unique ability to filter water, contributes to improved water management and aesthetics, especially in urban public spaces.

This type of concrete is gaining popularity again in Poland. In recent years, it has not only been applied to substructures, but increasingly also as pavements. In addition, research is being conducted into its new potential applications, e.g. in photocatalysis or heavy metal immobilisation. Like any material, water-permeable concrete has its limitations, especially in terms of strength - but where do the limits of its resistance to environmental aggression and water retention properties lie?

The authors of the paper have been searching for answers to these questions for years, carrying out laboratory work and gathering experience from completed projects. The paper describes the use of *PERVIA* water-permeable concretes in the revitalisation of parks, streets, the construction of car parks, pavements, squares and bicycle paths. Special attention was given to the innovative use as a drainage layer in the tunnel at the 'MPL Okęcie' junction in Warsaw. This solution avoided excessive reconstruction of the facility and effectively promotes water drainage.

The authors' experience shows that the use of water-permeable concrete is justified not only for ecological, but also for aesthetic and functional reasons.

1. Wprowadzenie, charakterystyka i zastosowanie betonów przepuszczalnych dla wody z grupy *PERVIA*

Postępująca urbanizacja prowadzi do ograniczania naturalnych przestrzeni biologicznie czynnych, co niesie ze sobą liczne negatywne konsekwencje, z którymi jako społeczeństwo musimy się mierzyć. Wśród wyzwań, które już dziś stają się odczuwalne, należy wymienić: zanieczyszczenie powietrza, ograniczoną retencję wód opadowych, coraz częstsze okresy suszy oraz wzrastające ryzyko powodzi.

Jednym z rozwiązań umożliwiających częściowe ograniczenie skutków intensywnej zabudowy miejskiej jest stosowanie betonów porowatych, przepuszczalnych dla wody, w miejsce tradycyjnych powierzchni szczelnych. Wpływa to korzystnie nie tylko na retencję wód (umożliwiając większy odpływ bezpośrednio do gruntu i odciążając sieć kanalizacji deszczowej), ale również przyczynia się do chłodzenia i oczyszczania utwardzonych powierzchni, zmniejszając tym samym efekt miejskich wysp ciepła [8]. Betony z grupy *PERVIA* to specjalistyczne rozwiązanie służące do budowy trwałych i wodoprzepuszczalnych nawierzchni, umożliwiających infiltrację wody deszczowej bezpośrednio do gruntu. Znajdują one zastosowanie zarówno w warstwach filtracyjnych pełniących funkcję podbudowy (wersja *PERVIA Classic*), jak i w warstwach wierzchnich (wersja *PERVIA path*).

Podstawową zaletą betonu jamistego jest jego zdolność do szybkiego i swobodnego odprowadzania wód opadowych z powierzchni do głębszych warstw konstrukcji. Ogranicza to ryzyko zalegania wody podczas intensywnych opadów oraz zmniejsza zagrożenie gwałtownego przyboru wód w rzekach po silnych deszczach lub wiosennych roztopach. Właściwości te są możliwe do osiągnięcia dzięki specjalnie zaprojektowanej strukturze – systemowi połączonych ze sobą pustek o łącznej objętości wynoszącej od 10 do 25%. Projektując recepturę do zastosowań nawierzchniowych należy dobrać odpowiednie surowce wsadowe oraz ich proporcje, tak aby znaleźć balans pomiędzy wytrzymałością, porowatością i przepuszczalnością, które w tym przypadku są ze sobą silnie powiązane. Podstawowe parametry techniczne obu rozwiązań zestawiono w tabeli numer 1.

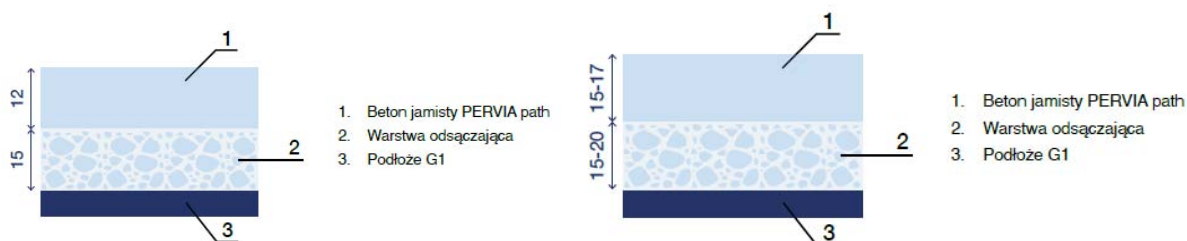
Tab. 1. Zestawienie podstawowych parametrów betonów *PERVIA classic* oraz *PERVIA path* (na podstawie kart technicznych obu produktów). [14]

<i>PERVIA path</i>	Właściwość betonu	<i>PERVIA classic</i>
C16/20	Wytrzymałość na ściskanie	max. C20/25
≥ 3 MPa	Wytrzymałość na rozciąganie przy zginaniu	≥ 1 MPa
≥ 100 L/min/m ²	Przepuszczalność wody	≥ 100 L/min/m ²
F100	Mrozoodporność	nie deklarowana (w razie potrzeby spełnia F25/F50)
D _{max} = 8 mm	Wymiar kruszywa	D _{max} = 16 mm
15 – 20 %	Zawartość pustek	10 – 25 %

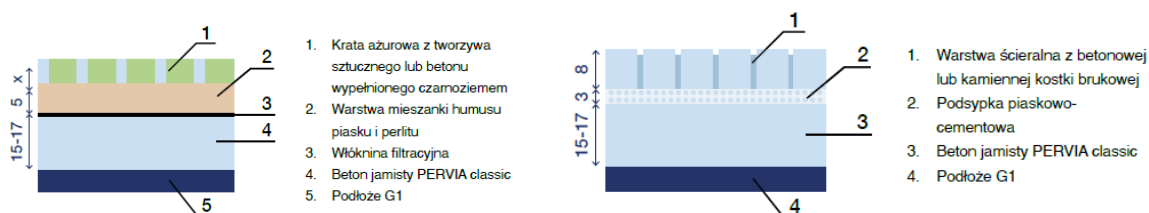
Pomimo, że betony porowate znane są od dziesięcioleci, przez długi czas były niedoceniane jako pełnoprawny materiał konstrukcyjny – ich zastosowanie ograniczano głównie do warstw podbudowy, najczęściej pod nawierzchnie obiektów sportowych. Warto w tym kontekście wspomnieć o znaczącym wkładzie dra inż. prof. PRz Grzegorza Bajorka [6] w propagowanie i wdrażanie tej technologii na polskim rynku już w latach 90. XX wieku. Obecnie jednak zyskuje ona większe znaczenie – głównie za sprawą pojawienia się nowych obszarów aplikacji. Przykładem może być zastosowanie betonu *PERVIA* jako warstwy odsączającej w tunelu „MPL Okęcie” (opisane szczegółowo w rozdziale 3). Stosowanie betonów wodoprzepuszczalnych przy projektowaniu konstrukcji nawierzchni z betonu cementowego, pozwala wyeliminować ryzyko związane ze zjawiskiem erozji podbudowy – wypłukiwania drobnoziarnistych części z jej górnej warstwy [7]. Coraz liczniejsze są zastosowania betonu jamistego jako warstwy nawierzchniowej – w niniejszej publikacji przedstawiono wybrane przykłady takich realizacji.

Nawierzchnie wykonane z betonu jamistego należą do grupy tzw. nawierzchni sztywnych, jednak nie powinny być traktowane tożsamo z klasycznym betonem drogowym. Mimo licznych zalet, ich zastosowanie wiąże się z pewnymi ograniczeniami (m.in. maksymalna wytrzymałość na ściskanie zazwyczaj nie przekracza 25–30 MPa), dlatego kluczowe jest prawidłowe prognozowanie obciążeń ruchem oraz analiza warunków gruntowo-wodnych w miejscu budowy. Jest to szczególnie istotne w Polsce, ze względu na klimat i zmiany dobowe temperatury oraz częste przejścia przez 0°C. W przypadku, gdy dodatkowo występuje nieodpowiednie podłoże, może dochodzić do wysadzin, a w konsekwencji przełomu nawierzchni. W celu poprawnego zaprojektowania warstwy podłoża należy określić jego rodzaj. Jeśli na podstawie uzyskanych wyników badań stwierdzono, że podłoże ma nośność G2–G4 (grunty wysadzinowe o niewielkim wskaźniku nośności), należy je wymienić na grunt o kategorii G1.

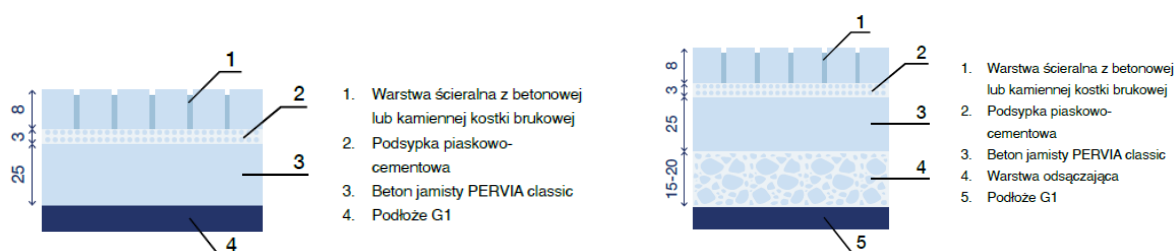
Przykładowe przekroje nawierzchni z wykorzystaniem betonu *PERVIA* przedstawiono na Rys. 1, 2 oraz 3 [14].



Rys.1. Warstwy nawierzchni z wykorzystaniem betonu *PERVIA* w przypadku: a) ruchu pieszego i rowerowego b) ruchu pieszego i rowerowego z możliwością sporadycznego wjechania pojazdem do 2,5 tony.



Rys.2. Warstwy nawierzchni z wykorzystaniem betonu *PERVIA* w przypadku ciągów komunikacji samochodowej o masie nie przekraczającej 2,5 tony w przypadku a) obsiania trawą b) obłożenia kostką brukową.



Rys.3. Warstwy nawierzchni z wykorzystaniem betonu *PERVIA* w przypadku ciągów komunikacji samochodowej o masie przekraczającej 2,5 tony w przypadku a) bez zastosowania dodatkowej warstwy odsączającej b) z zastosowaniem dodatkowej warstwy odsączającej.

Pierwsze dostawy betonów wodoprzepuszczalnych *PERVIA* na warstwę wierzchnią miały miejsce w 2019 r. Od tego czasu wykonano dziesiątki realizacji, obejmujących przede wszystkim budowę nawierzchni alejek, chodników dla pieszych, placów, skwerów, tarasów, a także ścieżek rowerowych. Coraz częściej inwestorzy przy wyborze rodzaju nawierzchni, szczególnie w przestrzeniach miejskich, uwzględniają nie tylko aspekty kosztowe, lecz także funkcjonalność, estetykę i trwałość rozwiązania konstrukcyjnego. Z uwagi na fakt, że niektóre z wymienionych nawierzchni poddane są już użytkowaniu przez okres kilku lat, warto było pokusić się o zestawienie i podsumowanie realizacji z użyciem betonu *PERVIA path*.

2. Wybrane przykłady realizacji nawierzchniowych z wykorzystaniem betonu *PERVIA path*.

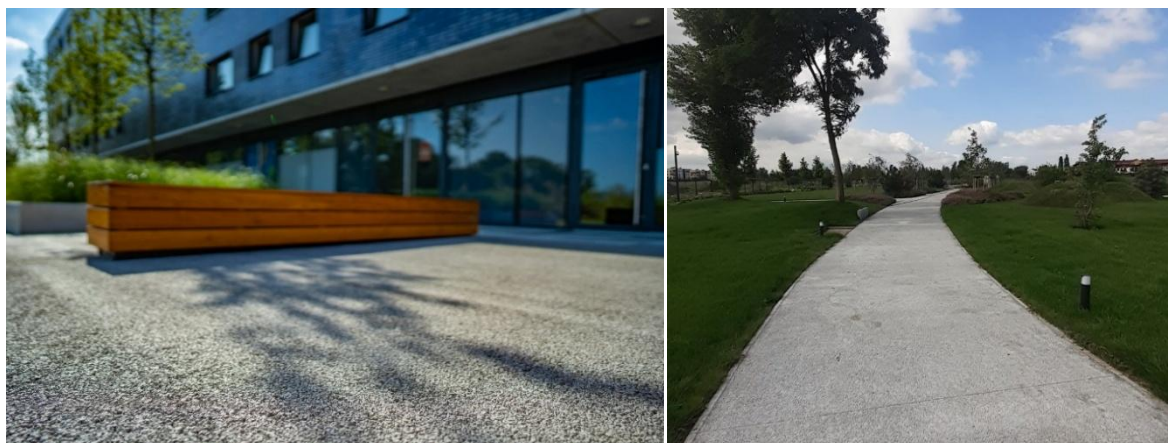
Poniżej przedstawiono przykładowe realizacje, w których wykorzystano beton *PERVIA path* w latach 2019-2024, z opisem charakterystycznych aspektów wybranych inwestycji.

2.1. Park osiedlowy *Slow City* w Krakowie

- Klasa betonu: C16/20
- Zastosowanie: alejki i chodniki dla pieszych
- Grubość nawierzchni: 10 cm
- Powierzchnia zabudowana: ~1000 m²

Pierwsza komercyjna realizacja betonu *PERVIA path* miała miejsce w 2019 r. na osiedlu *Mieszkaj w Mieście*. Kraków stał się swoistą „mekką” nowego rozwiązania, o czym świadczą realizacje w kolejnych latach, m.in. na nowych osiedlach *Slow City* oraz *Sitowie*, przy przystani *Bagry* czy w leśnym w parku kieszonkowym przy stadionie KS Wieczysta. Nawierzchnie wykonane 3–5 lat temu w dalszym ciągu spełniają swe funkcje użytkowe i nie uległy negatywnym skutkom działania mrozu.

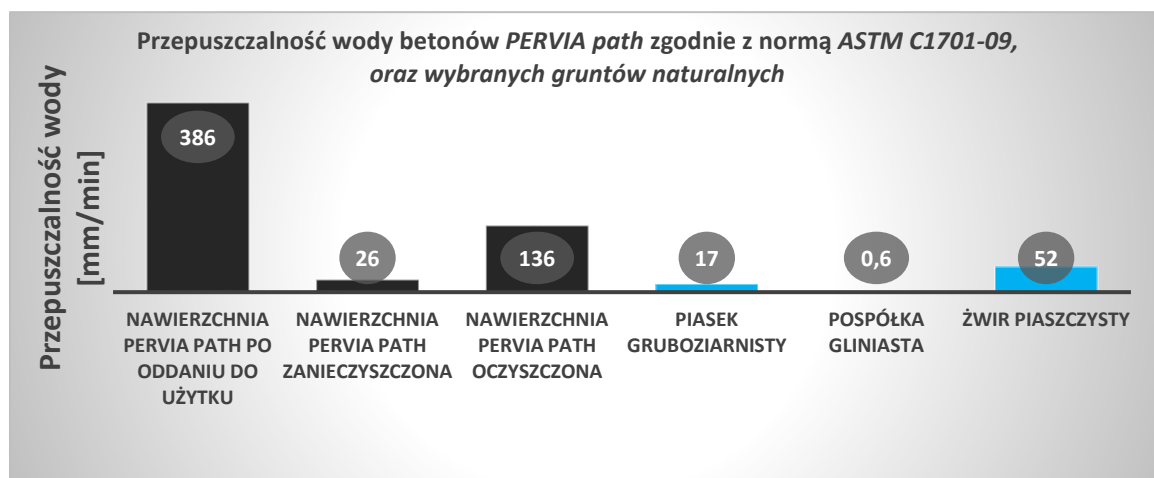
Fot.1 i 2. Realizacja na osiedlach *Mieszkaj w Mieście* (po lewej) oraz *Slow City* (po prawej).



Warto zaznaczyć, że pełnię swoich właściwości nawierzchnia utrzymuje w przypadku odpowiedniego podejścia do jej eksploatacji – szczególnie w zakresie czyszczenia i konserwacji. *PERVIA path* należy traktować jak system filtracyjny, który działa pod warunkiem, że jego struktura porów jest regularnie udrażniana. Kluczowe jest monitorowanie stanu nawierzchni oraz jej systematyczne mycie, dlatego zaleca się przeprowadzanie kompleksowego czyszczenia co najmniej dwa razy w roku – przed i po okresie zimowym. Najbardziej efektywne jest jednoczesne mycie ciśnieniowe i odkurzanie za pomocą specjalistycznego sprzętu.

Tabela 2 przedstawia wpływ czyszczenia na jakość filtracji betonu *PERVIA path* o zawartości pustek wynoszącej 20% – takiej samej, jaka została zastosowana w realizacji na osiedlu *Slow City*. Przed pomiarem nawierzchnia została celowo „ekstremalnie” zanieczyszczona mieszaniną piasku, pyłu, ziemi oraz substancji organicznych. Następnie została oczyszczona w najprostszy możliwy sposób przy użyciu myjki ciśnieniowej. Badania przepuszczalności wykonano zgodnie z normą ASTM C1701-09 [9]. Wyniki eksperymentu dowodzą, że nawet silnie zabrudzona nawierzchnia zachowuje zadowalające właściwości filtracyjne, porównywalne z niektórymi gruntami naturalnymi. Co istotne, nadal jest w stanie skutecznie odprowadzać wodę podczas deszczów nawalnych V stopnia (czyli o intensywności opadu na poziomie 8,0 mm/min).

Tab.2. Szybkość odprowadzenia wody dla betonu *Pervia Path* o zawartości pustek 20%, w porównaniu do wybranych gruntów naturalnych (wartości orientacyjne).

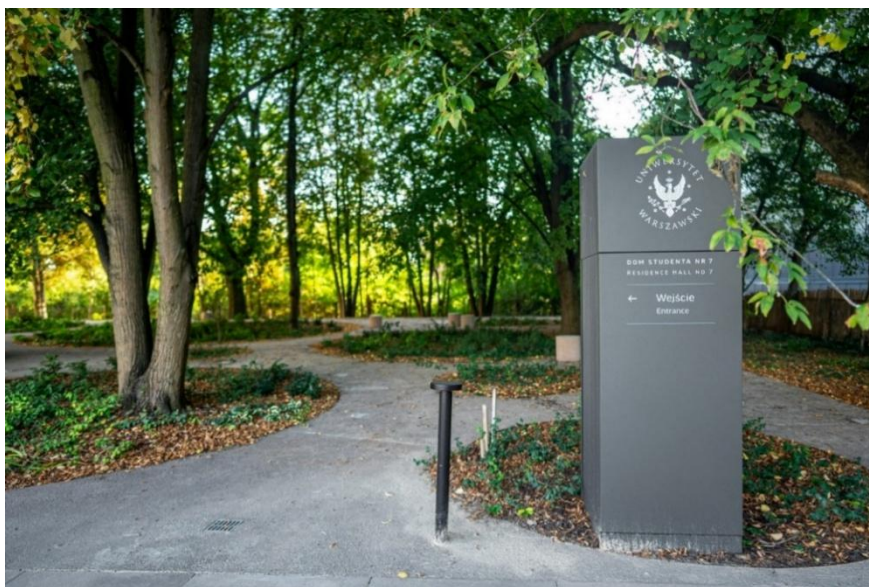


2.2. Dom Studenta przy ulicy Smyczkowej w Warszawie

- Klasa betonu: C20/25
- Zastosowanie: warstwa wierzchnia na chodniki wokół domu studenckiego
- Grubość nawierzchni: 15 cm
- Powierzchnia zabudowana: ~1000 m²

W latach 2023–2024 w otoczeniu Domu Studenckiego nr 5 „Smyczkowa”, będącego częścią kampusu Uniwersytetu Warszawskiego, zrealizowano inwestycję, gdzie do budowy nowych ścieżek pieszych wykorzystano beton jamisty *PERVIA path* barwiony w masie. Oczywiście głównym celem jego zastosowania było zapewnienie efektywnego odprowadzania wód opadowych bezpośrednio do gruntu, co jest szczególnie istotne w kontekście otaczającej roślinności oraz dbałości o lokalny mikroklimat. Dzięki strukturze *PERVIA* woda deszczowa nie zalega na powierzchni, lecz swobodnie przenika przez nawierzchnię, wspierając naturalne procesy hydrologiczne i ograniczając ryzyko podtopień. Dodatkowo, zastosowanie barwienia matrycy betonowej pozwoliło na uzyskanie estetycznej i trwałej nawierzchni, która harmonijnie wpisuje się w otoczenie Domu Studenckiego. Kolorystyka ścieżek została dobrana tak, aby współgrała z zielenią oraz architekturą budynku, tworząc spójną i przyjazną przestrzeń dla mieszkańców i odwiedzających. Ta inwestycja stanowi przykład nowoczesnego podejścia do projektowania infrastruktury miejskiej, łączącego funkcjonalność, estetykę oraz troskę o środowisko naturalne.

Fot.3. Realizacja przy Domu Studenta w Warszawie.



2.3. Rewitalizacja ulic miejskich na przykładzie miasta Wrocław

- Klasa betonu: C16/20
- Zastosowanie: ciągi piesze oraz pieszo-rowerowe
- Grubość nawierzchni: 10-12 cm
- Powierzchnia zabudowana: ~3500 m²

W dobie zmian klimatycznych i coraz wyższych wymagań dotyczących zrównoważonego rozwoju, projektowanie infrastruktury pieszo-rowerowej nie może ograniczać się wyłącznie do aspektów użytkowych i ekonomicznych – dziś liczy się również jej wpływ na środowisko, trwałość w warunkach zmiennego klimatu oraz zdolność do współpracy z systemami retencji miejskiej. Odpowiedzią na te wyzwania jest beton jamisty *Pervia Path* – wodoprzepuszczalna nawierzchnia, która idealnie sprawdza się w miastach stawiających na zrównoważony rozwój. Technologia ta jest doskonałą, z uwagi na swą wysoką trwałość oraz estetykę, alternatywą dla ścieżek i chodników z kostki brukowej czy nawierzchni MMA – dla przykładu, została już z powodzeniem zastosowana we Wrocławiu (ulice Pomorska oraz Różyckiego).

Wrocław od kilku lat konsekwentnie realizuje politykę adaptacji miasta do zmian klimatycznych. Decyzja o zastosowaniu betonowych nawierzchni wodoprzepuszczalnych wynikała z kilku powodów. Po pierwsze, nawierzchnie jamiste pozwalają na szybkie wchłanianie i odprowadzanie wód deszczowych do gruntu, odciążając miejską kanalizację deszczową i zmniejszając ryzyko lokalnych podtopień w czasie gwałtownych opadów. Po drugie, powierzchnie te pomagają ograniczać efekt miejskiej wyspy ciepła, co przekłada się na większy komfort mieszkańców w okresach letnich upałów. Dodatkowo, wodoprzepuszczalne ścieżki korzystnie wpływają na kondycję zieleni miejskiej, zapewniając lepsze nawodnienie dla drzew i nasadzeń w pasach zieleni. Władze miasta podkreślają, że inwestycje w rozwiązania retencyjne są nie tylko odpowiedzią na bieżące wyzwania, ale także elementem długofalowej

strategii zwiększania odporności Wrocławia na zmiany klimatyczne. Podobne decyzje podjęli władze w innych miastach – w Tychach (ul. Nowokościelna oraz ul. Curie-Skłodowskiej, a także przy II LO im. C.K. Norwida), w Krakowie oraz w Warszawie (realizacje opisywane szerzej w innych podrozdziałach), a także w Trójmieście (Gdynia - ul. Rolnicza, Gdańsk - ul. Pniewskiego). Przykłady tych realizacji, gdzie powstały nowoczesne ciągi piesze bądź pieszko-rowerowe z nawierzchnią wodoprzepuszczalną pokazują, że możliwe jest połączenie trwałości, funkcjonalności i proekologicznego podejścia bez kompromisów.

Fot.4 i 5. Realizacje we Wrocławiu (po lewej) oraz w Tychach (po prawej).



2.4. Ścieżka pieszko-rowerowa wzdłuż wałów rzeki Rudawy w Krakowie

- Klasa betonu: C16/20
- Zastosowanie: ścieżka rowerowo-piesza
- Grubość nawierzchni: 15 cm
- Powierzchnia zabudowana: ~13 000 m² (wykonana częściowo z betonu *PERVIA path*)

Beton wodoprzepuszczalny, w kontekście infrastruktury rowerowej, to rozwiązanie, które skutecznie łączy dostępność nawierzchni dla rowerów, wózków dziecięcych oraz wózków inwalidzkich z wymogiem efektywnego odprowadzania wody opadowej. Dobrym przykładem takiej realizacji jest nawierzchnia przy wałach rzeki Rudawy w Krakowie — ciąg pieszko-rowerowy o łącznej długości ok. 6,5 km, w całości wykonany z betonu porowatego, w tym częściowo z zastosowaniem technologii *PERVIA Path*. Nowa nawierzchnia zastąpiła dotychczasową ścieżkę gruntową, znacząco podnosząc komfort jej użytkowania, a jednocześnie zachowując proekologiczny charakter inwestycji [4]. Wybór nawierzchni z betonu wodoprzepuszczalnego okazał się w tym przypadku jedynym możliwym kompromisem pomiędzy wymaganiami technicznymi, środowiskowymi i użytkowymi. Został on

wypracowany wspólnie z inwestorem – Zarządem Zieleni Miejskiej w Krakowie – i uwzględniony w dokumentacji projektowej przy wsparciu przedstawicieli dostawcy technologii, firmy Cemex. Wykonana nawierzchnia betonowa gwarantuje nie tylko przepuszczalność wody, ale również zapewnia trwałość ścieżki w momencie wezbrania wód Rudawy, co od czasu jej wykonania w 2023 r. zdarzyło się już kilkakrotnie.

Fot.6. Realizacja ścieżki rowerowej przy rzece Rudawie w Krakowie.



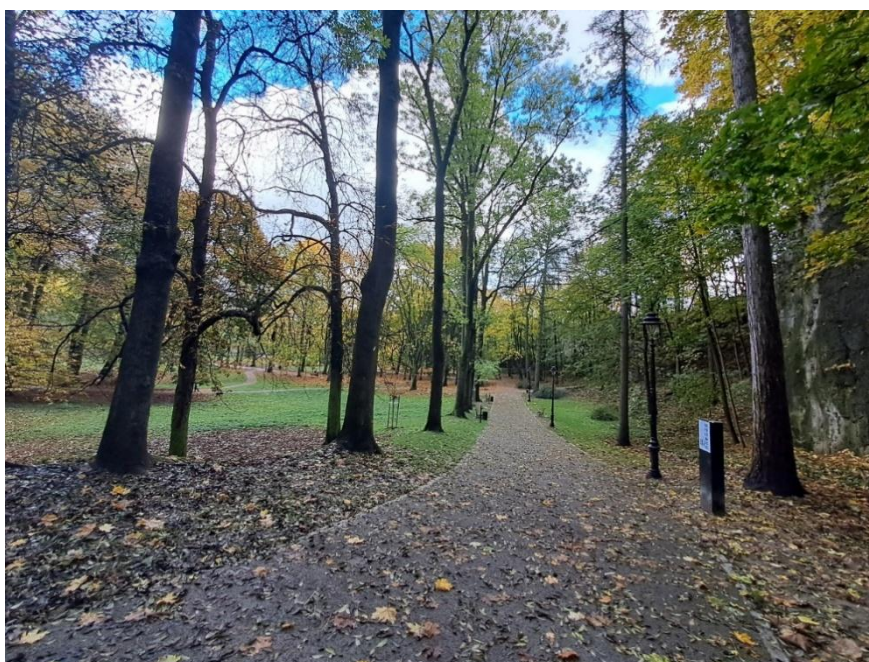
2.5. Park im. Wojciecha Bednarskiego w Krakowie

- Klasa betonu: C16/20
- Zastosowanie: alejki piesze oraz ciągi komunikacyjne
- Grubość nawierzchni: 10-15 cm
- Powierzchnia zabudowana: ~ 3500 m²

Beton wodoprzepuszczalny zastosowany w Parku Bednarskiego w Krakowie nie tylko zapewnia skuteczne odprowadzanie wód opadowych, ale także łączy dostępność nawierzchni dla pieszych, rowerzystów oraz osób poruszających się na wózkach z ochroną istniejącego starodrzewia w zabytkowym parku [3]. Szczególne ukształtowanie alejek w parku, wśród licznie rosnących drzew, stanowiło wyzwanie dla dostawcy oraz wykonawcy inwestycji, z uwagi na fakt, że mieszanka nie może być podawana pompą. Wobec tego była transportowana przy użyciu wozideł, co opóźniało czas dostarczenia jej w miejsce aplikacji, która w całości odbywała się przy użyciu narzędzi ręcznych. Zadanie ponadto komplikowała charakterystyka mieszanki, która w okresie letnim ma tendencję do szybkiego wysychania (z uwagi na niewielką zawartość wody w recepturze), co wymusza na uczestnikach całego procesu zachowanie ścisłego reżimu i powtarzalności. Dostawy zakończyły się w 2022 r., więc

beton przeszedł 3 lata naturalnych cykli zamrażania i rozmrażania, nie wykazując po tym czasie objawów destrukcji mrozowej. Wykonane alejki nie posiadają ponadto innych istotnych wad technicznych czy usterek, pomimo że nawierzchnia utrzymywana jest w sposób „naturalny” tzn. nie jest regularnie czyszczona z zabrudzeń oraz materiałów organicznych, szczególnie liści, które w okresie jesiennym sownie wypełniają powierzchnię ścieżek (Fot.7).

Fot.7. Realizacja w Parku Bednarskiego w Krakowie.



2.6. Park Szymańskiego w Warszawie jako przykład maszynowego układania nawierzchni z betonu porowatego

- Klasa betonu: C16/20
- Zastosowanie: nawierzchnia drogi przeznaczona dla ruchu pieszego i rowerowego, ze sporadycznym wjazdem samochodów do 3,5 t
- Grubość nawierzchni: 16 cm
- Powierzchnia zabudowana: ~3000 m²

W 2024 r. zrealizowano pierwszą w Polsce inwestycję na tak dużą skalę, gdzie nawierzchniowy beton jamisty *PERVIA path* został ułożony z wykorzystaniem rozścielacza. Dotychczas beton tego typu na warstwę wierzchnią był aplikowany wyłącznie ręcznie (wcześniej rozścielacze stosowano do rozwiązań *PERVIA classic* na podbudowy). Wybór technologii układania maszynowego w Parku Szymańskiego był podyktowany uzyskaniem bardziej jednolitej, estetycznej powierzchni oraz ograniczeniem ryzyka wyrywania kruszywa w trakcie eksploatacji. Jednak największą zaletą tej metody jest zwiększenie szybkości aplikacji materiału. W ciągu 8 godzin ekipa wykonawcza układała ok. 130 m³ mieszanki, co byłoby niewykonalne przy układaniu ręcznym. Podczas realizacji wykazano, że rozścielacz pozwala na bardziej

równomierne rozłożenie mieszanki i skuteczniejsze „zatopienie” kruszywa przy powierzchni. Efektem jest gładka, zwarta struktura, w której kruszywo nie wystaje ponad powierzchnię betonu. Dzięki temu wykonaną nawierzchnię cechuje nie tylko funkcjonalność, ale również estetyka i trwałość.

Fot.8. Realizacja w Parku Szymańskiego w Warszawie.

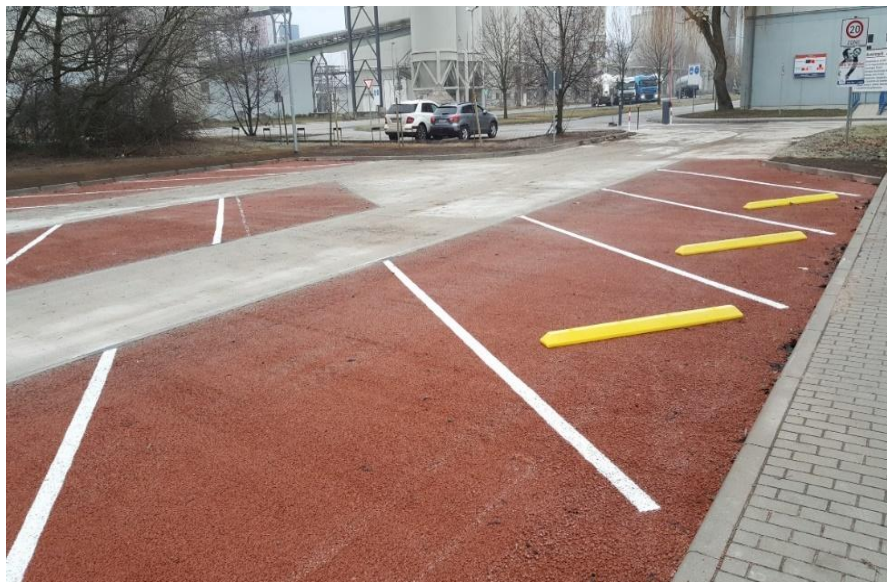


2.7. **PERVIA jako nawierzchnia dróg i parkingów**

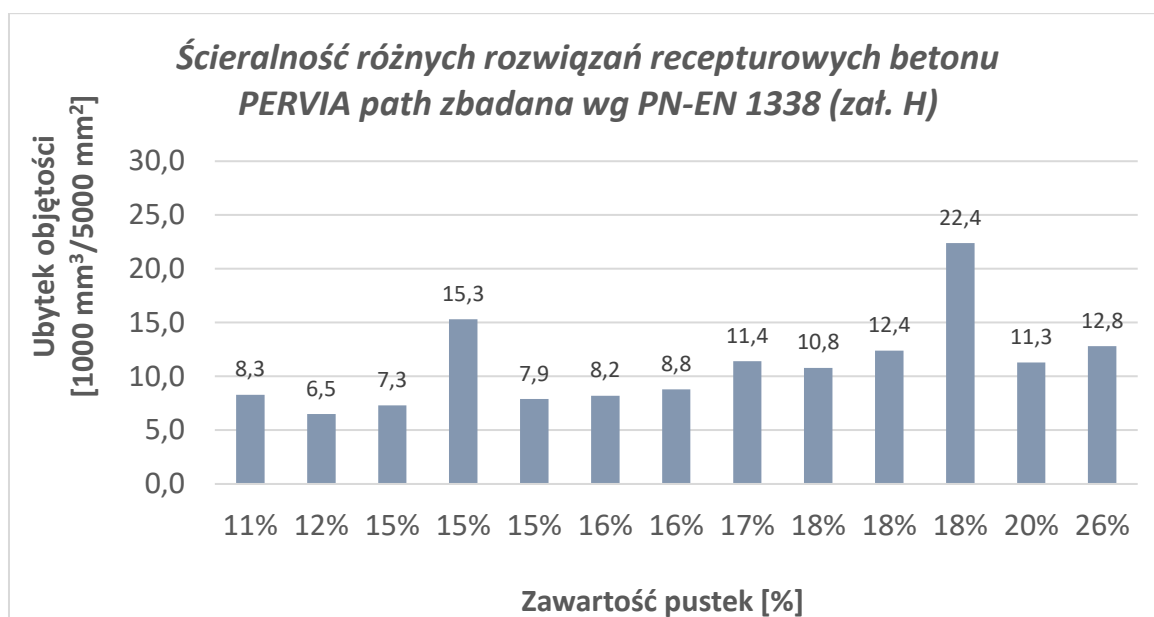
W Stanach Zjednoczonych już od dziesięcioleci betony porowate wykorzystywane są do wykonywania nawierzchni dróg i parkingów. Skutkiem zdobytego w tej materii doświadczenia było wydanie dedykowanych norm ASTM (2009 r. uznaje się moment oficjalnego ich wprowadzenia) dotyczących standaryzacji podejścia materiałowego przy projektowaniu i badaniu, jak również propagowanie dobrych praktyk wykonawczych, kładąc na ten aspekt szczególny nacisk [12]. Natomiast jeżeli chodzi o Europę, doświadczenia te są zdecydowanie krótsze, co oznacza, że prawdopodobnie jeszcze daleka droga do ustanowienia odrębnych norm dla tego wyrobu. W tym kontekście szczególnie cenne będą kolejne realizacje, stanowiące referencje dla potwierdzenia zasadności przywoływanych zastosowań betonów wodoprzepuszczalnych. Najdłużej funkcjonująca nawierzchnia parkingu z betonu *PERVIA path* ma już 9 lat i wykonana została przed cementownią Cemex w miejscowości Rüdersdorf w Niemczech [14]. Parking ten jest obiektem referencyjnym, który po tak wielu latach w dalszym ciągu spełnia swoje funkcje użytkowe (co roku wykonywane jest czyszczenie oraz badania przepuszczalności) i nie wykazuje wad z perspektywy trwałości. Nie zanotowano również wystąpienia zjawiska wrywania

kruszywa (z j.ang. „raveling”). Załączone zdjęcie (Fot.10) przedstawia stan nawierzchni po jej ostatnim odświeżeniu w 2024 r.

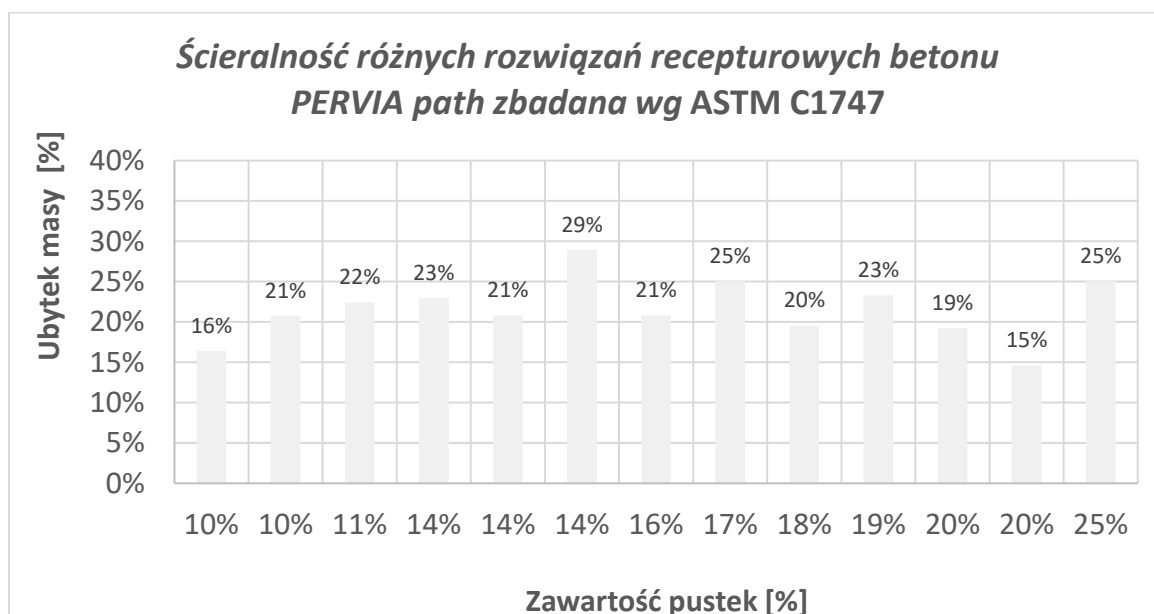
Fot.10. Parking z betonu *PERVIA* przy cementowni Cemex Rüdersdorf w Niemczech.



„Raveling” może być istotnym zagrożeniem dla trwałości betonu porowatego, w przypadku jego niewłaściwego zaprojektowania i/lub wbudowania, doprowadzając do uszkodzeń wodoprzepuszczalnej nawierzchni parkingu czy drogi, szczególnie na skutek ruchów skrętnych kół pojazdów. Aby zmniejszyć ryzyko związane z tym zjawiskiem, można posłużyć się klasycznym badaniem ścieralności zgodnie z normą PN-EN 1338 [11], lub skorzystać z doświadczeń amerykańskich i przetestować receptury zgodnie ze standardem ASTM C1747 [10]. Dla wybranych rozwiązań *PERVIA path* wykonano badania ścieralności, przy wykorzystaniu obu przywołanych metod. Badania te nie są w stanie w pełni odzwierciedlić rzeczywistych oddziaływań abrazyjnych, którym poddana jest nawierzchnia parkingu w rzeczywistych warunkach. Jednakże takie testy można wykorzystać, aby zminimalizować ryzyko „ravelingu”, poprzez wybór najbardziej optymalnych rozwiązań recepturowych. Norma PN-EN 1338 (Zał. H) wskazuje wartość ubytku masy poniżej $18\,000\text{ mm}^3/5000\text{ mm}^2$, jako najwyższą klasę odporności badanej przy użyciu tarczy Bohmego, natomiast doświadczenia amerykańskie sugerują ubytek masy w badaniu wg ASTM C1747 nie wyższy niż 25-30%. Na podstawie wykonanych testów można stwierdzić, że możliwe jest uzyskanie dla betonu porowatego wyników na poziomie nie gorszym niż betony nawierzchniowe zbadane tą samą metodą [13]. Warto jednak nadmienić, że uzyskanie wysokiej odporności na ścieranie w tym przypadku zależy nie tylko od porowatości, ale wpływ na ten parametr mają również rodzaj zastosowanego kruszywa, wskaźnik w/c, czy nawet konsystencja mieszanki oraz sposób pielęgnacji betonu (a więc również aspekty związanych z wbudowaniem produktu).



Rys.4. Badania ścieralności betonu wodoprzepuszczalnego wg PN-EN 1338 (zał. H), dla różnych zawartości pustek (rozwiązania recepturowe różniły się ponadto wskaźnikiem w/c oraz rodzajem kruszywa).



Rys.5. Badania ścieralności betonu wodoprzepuszczalnego wg ASTM C1747, dla różnych zawartości pustek (rozwiązania recepturowe różniły się ponadto wskaźnikiem w/c oraz rodzajem kruszywa).

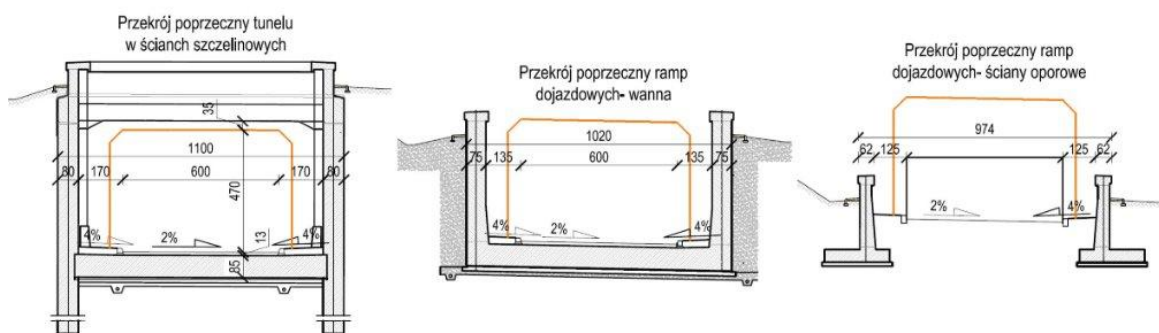
3. PERVIA jako warstwa odsączająca w tunelu na węźle „MPL Okęcie” w Warszawie

- Klasa betonu: C16/20
- Zastosowanie: podbudowa pod nawierzchnię asfaltową oraz kapy chodnikowe

- Grubość nawierzchni: 20-25 cm
- Powierzchnia zabudowana: ~3500 m²

W ciągu drogi ekspresowej S79 w Warszawie, prowadzącej na lotnisko Okęcie, w 2022 r. przeprowadzony został remont tunelu drogowego TD-34. Innowacyjne zastosowanie betonu jamistego *PERVIA*, jako warstwy odsączającej w tunelu na węźle „MPL Okęcie”, pozwoliło na uniknięcie nadmiernej jego przebudowy i sprawne odprowadzenie wody. Rozwiązanie to wpisuje się w trendy zrównoważonego rozwoju miast i stanowi kompromis pomiędzy rozbudową infrastruktury drogowej, a zapewnieniem swobodnego ujścia wód gruntowych [2].

Tunel na węźle MPL Okęcie, zlokalizowany w ciągu łącznicy Ł1 drogi krajowej S79a (km 1+665) w Warszawie, prowadzi ruch kołowy w kierunku Międzynarodowego Portu Lotniczego Okęcie, stanowiąc istotny element infrastruktury dojazdowej. Obiekt ma konstrukcję żelbetową, jednokomorową, w technologii ścian szczelinowych. Wjazdy do tunelu prowadzą przez rampy oporowe, których ściany wystają ok. 90 cm ponad teren. Długość tunelu wynosi 145 m, a z rampami – 501,8 m. Skrajnia pionowa to 5,05 m. Podłoże stanowią gliny zwałowe, piaski wodnolodowcowe oraz grunty antropogeniczne. Ściany oporowe i żelbetowe wanny zasypane są gruntami nasypowymi (piaski, pospółki), co zwiększa dopływ wód gruntowych. Zgodnie z dokumentacją, pierwsze zwierciadło wód gruntowych występuje ok. 1 m poniżej płyty dennej. Po wykonaniu skarp dojazdowych poziom wód lokalnie wzrósł – w rejonie stacji energetycznej woda utrzymywała się na poziomie terenu. Przed remontem jezdnia składała się z betonu asfaltowego i mastyksu grysowego, ułożonych bezpośrednio na izolacji płyty dennej. System odwodnienia obejmował spadki podłużne i poprzeczne oraz dreny z polipropylenu zatopione w grysie z żywicą.



Rys. 6. Typowe przekroje poprzeczne tunelu przed remontem.

Pomimo prowadzonych wielu prac naprawczych, pierwsze już na etapie budowy, tunel na węźle „MPL Okęcie” wymagał uszczelnienia. Główne uszkodzenia obiektu związane były z nieszczelnościami konstrukcji. W trakcie przeglądów oraz ekspertyz zaobserwowano m.in. powstawanie rys poprzecznych do osi obiektu, a także rozszerzanie się szczelin styków roboczych na płycie dennej. Stwierdzono, że spowodowane było to początkowym skurczem betonu oraz odkształceniami termicznymi. Należy tu podkreślić, że płyta na odcinku konstrukcji w ścianach szczelinowych (łącznie ok. 300 m) nie była zdylatowana. Przy swobodzie odkształceń konstrukcja o takiej długości uległaby skróceniu o 60 mm przy zmianie temperatury o

20°C. Zespoleńie płyty ze ścianami szczelinowymi oraz tarcie o grunt powoduje jednak otwieranie się wszystkich rys skurczowych. Lokalizacja przecieków na obiekcie wskazuje na napływ wody przez warstwy filtracyjne. Następnie woda wydostaje się do wnętrza obiektu poprzez najbardziej osłabione miejsca konstrukcji, takie jak dylatacje – zwłaszcza na styku ścian szczelinowych i wanien. Wyżej wymienione uszkodzenia powodują nadmierną filtrację wody do środka obiektu. Dopływ wody zwiększa się ponadto w okresie zimowym, kiedy obiekt ulega odkształceniom termicznym i wszystkie rysy oraz szczeliny dylatacyjne się rozszerzają. Na przykładzie dotychczasowych prób uszczelnienia obiektu można było stwierdzić, że naprawy metodą iniekcji poliuretanowych mają skuteczność ograniczoną w czasie. Jest to najprawdopodobniej związane z niewystarczającą elastycznością iniektowanej mieszanki, która pęka pod wpływem odkształceń termicznych płyty dennej. [1].

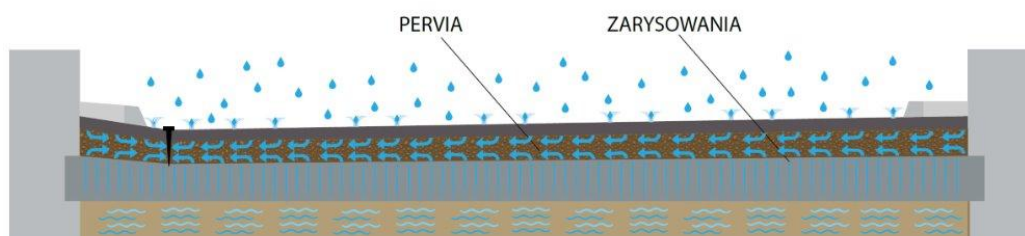
Brak dylatacji sprawił, że nie można było wykluczyć powstawania kolejnych rys w ścianach szczelinowych i płycie dennej pod wpływem zmian temperatury. Aby uniknąć okresowego powtarzania napraw mających na celu zwiększenie szczelności obiektu, zaprojektowano rozwiązanie uwzględniające powstanie przecieków w dłuższym czasie eksploatacji obiektu. Woda przesączająca się przez szczeliny w płycie dennej oraz w ścianach szczelinowych zostaje odebrana przez drenaże oraz warstwę filtracyjną wykonaną z betonu wodoprzepuszczalnego *PERVIA* wybudowaną na całej szerokości obiektu. Następnie woda jest odprowadzona do istniejących studni i wypompowana poza obiekt. Jest to o pierwsze tego typu zastosowanie betonu jamistego w Polsce, a prawdopodobnie również w Europie. Warstwę filtracyjną stanowi beton *PERVIA path* wykonany z grys granitowego o frakcji do 8 mm oraz klasie wytrzymałości C16/20. W tym przypadku nie zastosowano rozwiązania dedykowanego na warstwy podkładowe tj. *PERVIA classic*, z uwagi na podwyższone wymagania wytrzymałościowe oraz trwałościowe wobec tej warstwy konstrukcyjnej, które zostały uwzględnione w SST. W trakcie realizacji spełnienie parametrów zostało sprawdzone m.in. przez laboratorium nadzoru GDDKiA. Wymagania specyfikacji oraz wyniki badań (z etapu zatwierdzania receptury) zestawiono w tabeli 3.

Tab. 3. Wymagania SST oraz wyniki badań betonu jamistego na potrzeby wykonania warstwy filtracyjnej w tunelu przy węźle „MPL Okęcie”.

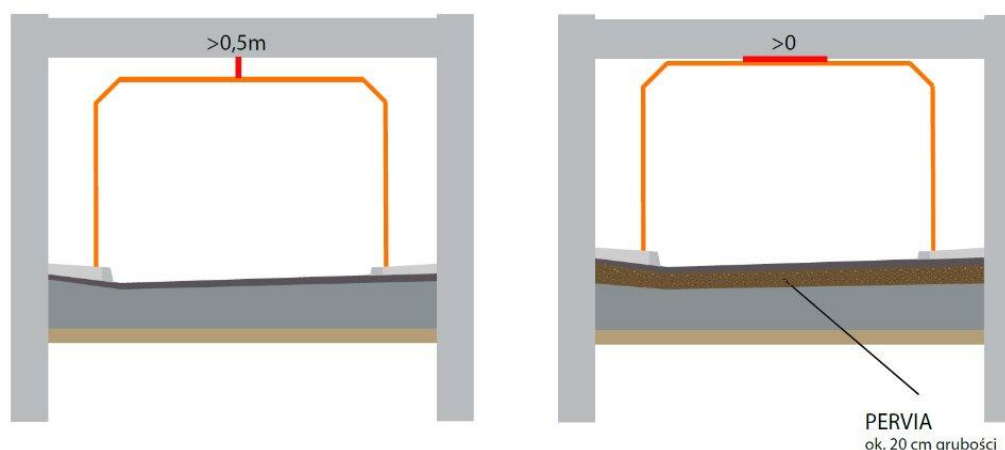
L.p.	Właściwości betonu	Wymagania	Metoda badania	Wyniki badań (wartości uśrednione)
1	Gęstość, tolerancja w stosunku do betonu wg zatwierdzonej receptury	± 3,0 %	PN-EN 12390-7	2059 kg/m ³
2	Klasa wytrzymałości na ściskanie w 28 dniu wg PN-EN 206, nie niższa niż (dla kategorii ruchu KR5+KR7)	C16/20	PN-EN 12390-3	26,1 MPa
3	Wytrzymałość betonu na zginanie w 28 dniu twardnienia (średnia z trzech próbek) nie niższa niż (dla kategorii ruchu KR5+KR7)	3 MPa	PN-EN 12390-5	4,3 MPa
4	Wytrzymałość betonu na rozciąganie przy rozłupywaniu w 28 dniu twardnienia (średnia z trzech próbek) nie niższa niż (dla kategorii ruchu KR5+KR7)	2 MPa	PN-EN 12390-6	3,3 MPa

5	Mrozoodporność F100, przy badaniu odporności betonu na działanie mrozu, w 28 dniu • ubytek masy próbki, nie więcej niż • spadek wytrzymałości na ściskanie, nie więcej niż	5 % 20 %	PN-B-06265	0,1 % 11,7 %
6	Przepuszczalność	≥ 20 mm/min	ASTM C1701-09	134 mm/min

Zastosowanie betonu drenażowego pozwoliło na bezpieczne przeniesienie obciążeń ruchem kołowym, przy jednoczesnym zachowaniu wysokiej przepuszczalności. Umożliwia to skuteczne odprowadzanie wody do istniejących studni, zanim dotrze ona ponad powierzchnię drogową. Dzięki temu zostało zwiększone bezpieczeństwo użytkowników obiektu. Z uwagi na bardzo niską wysokość tunelu, dzięki użyciu betonu jamistego jako warstwy filtracyjnej, zbierająca się woda jest skutecznie odprowadzana, jednocześnie zachowano przy tym wysokość skrajni drogowej. Obecnie na rynku polskim nie istnieje alternatywne rozwiązanie, umożliwiające skuteczne odprowadzenie wody przy tak małej grubości warstwy filtracyjnej. Powszechnie w tym celu stosowane kruszywa niespoiste o wysokim współczynniku filtracji, wymagają zastosowania znacznie grubszych warstw, a tym samym prowadzą do nadmiernego przegłębiania nowopowstałych tuneli.



Rys.7. Innowacyjne zastosowanie betonu jamistego *PERVIA* jako warstwy filtracyjnej.



Rys.8. Zmiana wysokości światła w tunelu po dodaniu warstwy betonu *PERVIA*.

Wykonana pod kapami chodnikowymi warstwa filtracyjna o grubości ok. 25 cm z betonu *PERVIA* rozprowadzana była ręcznie, a następnie ubijana zagęszczarką płytową. W drugim etapie, wykonywana była podbudowa o grubości ok. 20 cm w ciągu komunikacyjnym za pomocą rozścielacza. Dostawy realizowane były w okresie letnim, więc aby złagodzić skutki wpływu wysokiej temperatury oraz uniknąć korków w czasie transportu, mieszankę dostarczano w godzinach nocnych. Łącznie na zrealizowanie tego zadania wyprodukowano ponad 700 m³ betonu *PERVIA path*, z węzła Cemex w Pruszkowie. Opisany system funkcjonuje już z powodzeniem trzeci rok, skutecznie rozwiązując problem przenikającej wody przez płytę denną i wydalnie przyczyniając się do poprawy bezpieczeństwa ruchu drogowego poprzez eliminację wody oraz oblodzenia na nawierzchni.

Fot.10 i 11. W trakcie wykonywania warstwy filtracyjnej kap chodnikowych (po lewej) oraz podbudowy w ciągu komunikacyjnym za pomocą rozścielacza (po prawej).



Fot.12. Gotowa podbudowa z *PERVIA path* w ciągu komunikacyjnym.



4. Podsumowanie, perspektywy rozwoju dla betonów wodoprzepuszczalnych

Nowoczesne miasta dążą dziś nie tylko do zaspokajania bieżących potrzeb mieszkańców, ale również – zgodnie z ideą zrównoważonego rozwoju – poszukują trwałych, przyszłościowych rozwiązań. Kluczowe staje się projektowanie nawierzchni, które nie będą wymagały częstych napraw ani generalnych remontów. Każda ingerencja w infrastrukturę to potencjalne utrudnienia komunikacyjne oraz spadek atrakcyjności inwestycyjnej danego obszaru. Wszystkie opisane w artykule realizacje łączy wspólny cel: stworzenie nawierzchni nie tylko funkcjonalnych (ze względu na właściwości filtracyjne), ale też trwałych, estetycznych i łatwych w utrzymaniu. Betony wodoprzepuszczalne *PERVIA* spełniają te oczekiwania – są odporne na czynniki atmosferyczne, dobrze komponują się z innymi materiałami (np. kostką brukową, drewnem, szkłem), a nawet w przypadku zaniedbania konserwacji nadal zachowują swoją funkcję. Obserwowany obecnie wzrost zainteresowania tego typu nawierzchniami w miastach, gminach i powiatach stanowi pozytywny sygnał. Odpowiedzialną rolą branży betonowej jest wspieranie lokalnych inicjatyw poprzez profesjonalne doradztwo, projektowanie i realizację inwestycji. Stosowanie przytoczonych w artykule dobrych praktyk to klucz do utrzymania i dalszego rozwoju tego trendu.

Zdaniem autorów, tylko świadome i profesjonalne podejście do każdej – nawet najmniejszej – realizacji pozwoli kontynuować popularyzację technologii betonów wodoprzepuszczalnych. W obliczu coraz bardziej odczuwalnych wyzwań

środowiskowych, każde działanie wspierające retencję wód opadowych ma znaczenie. Warto w tym miejscu przytoczyć znane powiedzenie: „*kropla drąży skałę*” – każda nawierzchnia wodoprzepuszczalna to krok w stronę bardziej odpornego i zrównoważonego miasta. Równolegle w tym temacie rozwija się też zaplecze naukowe – wybrane jednostki badawcze prowadzą intensywne prace nad poszerzeniem możliwości wykorzystania unikalnych właściwości betonów porowatych. Wśród nich znajduje się m.in. wykorzystanie zwiększonego rozwinięcia powierzchni adsorpcji do redukcji zanieczyszczeń, co może wspomagać oczyszczanie spływów powierzchniowych z zanieczyszczeń organicznych i nieorganicznych, w tym metali ciężkich, takich jak ołów czy cynk [5].

Przytoczone w artykule przykłady pokazują rosnącą rolę betonów wodoprzepuszczalnych w polskich projektach infrastrukturalnych – zarówno w kontekście gospodarowania wodami, jak i kreowania bardziej atrakcyjnej i nowoczesnej przestrzeni publicznej. Autorzy mają nadzieję, że publikacja ta będzie nie tylko podsumowaniem dotychczasowych działań, ale również inspiracją do dalszego rozwoju tej technologii – także jako ciekawej, estetycznej alternatywy dla powszechnie stosowanych klasycznych rozwiązań nawierzchniowych.

5. Literatura

- [1] Kałużyński M., Banaś A., Kuryłowicz A. - *Innowacyjne zastosowanie betonu jamistego Pervia, jako warstwy odsączającej w tunelu na węźle MPL Okęcie w Warszawie*, Wrocławskie Dni Mostowe, Wrocław, 11/2022
- [2] Kałużyński M. - *Beton wodoprzepuszczalny – główny bohater remontu tunelu lotniska Okęcie*, Budownictwo Technologie Architektura, 3/2024
- [3] Piestrzyński P. - *Beton jamisty zwiększy retencję wody w krakowskim parku Bednarskiego*, Budownictwo Technologie Architektura, 4/2023
- [4] Piestrzyński P. - *Rowerem wzdłuż Rudawy po betonie wodoprzepuszczalnym*, Budownictwo Technologie Architektura, 4/2023
- [5] Kalinowski M., Chilmon K., Jackiewicz-Rek W., Jaworska B., Wojtkowska M. - *Filtracja spływu powierzchniowego przez beton wodoprzepuszczalny – immobilizacja metali ciężkich*, Dni Betonu 2023
- [6] Bajorek G., *Porowaty beton wodoprzepuszczalny – wpływ doboru składników na jego właściwości i trwałość*, Rozprawa doktorska, Instytut Techniki Budowlanej, Warszawa 1994
- [7] Beblacz D., *Właściwości betonu przepuszczalnego do podbudów drogowych w konstrukcji nawierzchni z betonu cementowego*, Drogi i Mosty 20 (2021), s. 359-378
- [8] Siedlecka M., Suchocka M., *Wodoprzepuszczalne nawierzchnie a zrównoważony rozwój terenów miejskich*, Drogownictwo 2/2017, s. 60-67

[9] ASTM C 1701/C 1701M-09 Standard Test Method for Infiltration Rate of In Place Pervious Concrete

[10] ASTM C 1747/C 1747M-11 Standard Test Method for Determining Potential Resistance to Degradation of Pervious Concrete by Impact and Abrasion

[11] PN-EN 1338 Betonowe kostki brukowe -- Wymagania i metody badań

[12] ACI 522 R10 Reported by ACI Committee 522 Report on Pervious Concrete

[13] Ślęczka P., Rymek M., *Czynniki determinujące odporność betonu na agresję wywołaną*

ścieraniem, Dni Betonu 2016

[14] Materiały wewnętrzne Cemex Polska Sp. z o.o.

dr inż., Maria Ratajczak, inż., Jakub Książek, mgr inż., Marta Thomas, dr hab. inż., prof. PP, Agnieszka Śłosarczyk
Politechnika Poznańska

Ocena mrozoodporności zapraw cementowych z dodatkiem kruszywa pochodzącego z recyklingu

Evaluation of Frost Resistance in Cement Mortars Containing Recycled Aggregate

Streszczenie

Konieczność dekarbonizacji branży betonowej oraz wdrażanie idei gospodarki obiegu zamkniętego przejawia się, między innymi, poprzez stosowanie na coraz większą skalę kruszyw recyklingowych, także tych o drobnym uziarnieniu. Równie istotnym aspektem jest zapewnienie odpowiednich parametrów wytrzymałościowych oraz trwałościowych wznoszonych konstrukcji. Wymaga to holistycznego podejścia do zagadnień związanych z projektowaniem i wdrażaniem na rynek nowych materiałów. Trend ten jest wyraźnie widoczny w prowadzonych badaniach naukowych, gdzie charakterystyki środowiskowe stają się równie ważnym czynnikiem w ocenie jakości nowych rozwiązań materiałowych.

Celem przeprowadzonych badań była ocena trwałości oraz analiza oddziaływania środowiskowego recyklingowych zapraw cementowych. W pracy wykorzystano dwa rodzaje kruszywa recyklingowego o frakcji 0 – 2 mm: miał ceramiczny oraz miał betonowy, które podstawiano za piasek normowy w ilościach 20% oraz 40% wagowo. Badania wykazały, że dodatek drobnych kruszyw recyklingowych w nieznacznym stopniu obniża wytrzymałość na ściskanie po 28 dniach dojrzewania w stosunku do próbki referencyjnej. Badania mrozoodporności wykazały, iż zaprawy recyklingowe charakteryzują się znacznie lepszą odpornością na cykliczne zamrażanie i rozmrażanie w porównaniu do zaprawy na kruszywie naturalnym, dzięki czemu mogą być stosowane w miejscach narażonych na działanie niekorzystnych warunków atmosferycznych. Analiza śladu węglowego wykazała, że zaprawy cementowe z dodatkiem kruszyw recyklingowych mają nieznacznie niższy ślad węglowy w porównaniu do zaprawy normowej, a kluczowym czynnikiem wpływającym na emisyjność zapraw jest rodzaj oraz zawartość cementu, który charakteryzuje się najwyższym współczynnikiem emisji dwutlenku węgla. W związku

z tym, jako dalszy etap badań, zaproponowano ocenę trwałości zapraw recyklingowych na bazie spoiw o obniżonym śladzie węglowym.

Abstract

The necessity to decarbonize the concrete industry and implement the principles of a circular economy is increasingly reflected in the use of recycled aggregates, including those with fine particle sizes. Equally important is ensuring appropriate strength and durability parameters in constructed structures. This requires a holistic approach to the design and market implementation of new materials. This trend is clearly evident in current scientific research, where environmental characteristics are becoming as important as mechanical properties in evaluating the quality of novel material solutions.

The aim of this study was to assess the durability and analyze the environmental impact of recycled cement mortars. Two types of fine recycled aggregates (0–2 mm fraction) were used: crushed ceramic waste and crushed concrete waste, which were substituted for standard sand in amounts of 20% and 40% by weight. The tests showed that the addition of fine recycled aggregates slightly reduces the 28-day compressive strength compared to the reference sample. Freeze–thaw resistance tests revealed that recycled mortars exhibit significantly better resistance to cyclic freezing and thawing compared to mortars made with natural aggregate, indicating their suitability for use in environments exposed to harsh weather conditions.

Carbon footprint analysis demonstrated that cement mortars containing recycled aggregates have a slightly lower carbon footprint compared to conventional mortars. The key factor affecting mortar emissions was found to be the type and content of cement, which has the highest carbon dioxide emission factor. As a next stage of the research, it is proposed to evaluate the durability of recycled mortars based on binders with a reduced carbon footprint.

1. Zaprawy cementowe na bazie kruszyw recyklingowych

Współczesne budownictwo zmaga się z licznymi wyzwaniami wynikającymi z ogólnościowych trendów dotyczących ochrony środowiska, idei zrównoważonego rozwoju oraz zmian w przepisach prawnych i wymaganiach technologicznych. W dobie intensywnego wykorzystywania zasobów naturalnych i konieczności ograniczania emisji gazów cieplarnianych, coraz większego znaczenia nabierają alternatywne rozwiązania materiałowe, w tym wykorzystanie surowców wtórnych pozyskanych z recyklingu. Szczególne miejsce w tych rozważaniach zajmuje produkcja zapraw cementowych, powszechnie używanych w branży budowlanej – zarówno przy wznoszeniu nowych konstrukcji, jak i przy pracach remontowych. Tradycyjne zaprawy cementowe opierają się głównie na kruszywach naturalnych, co prowadzi do nadmiernego zużycia zasobów oraz generowania wysokiej emisji dwutlenku węgla. W związku z tym niezbędne jest wdrażanie bardziej ekologicznych i zrównoważonych rozwiązań, które zmniejszą negatywne oddziaływanie sektora budowlanego na środowisko naturalne, jednocześnie zachowując wymagane właściwości techniczne i trwałość materiałów.

1.1 Kruszywa z recyklingu w ujęciu norm europejskich

Obecnie norma PN-EN 12620+A1 Kruszywa do betonu [1] rozróżnia następujące składniki kruszywa z recyklingu:

- Rc – gruz betonowy,
- Ru – niezwiązany kamień, kamień naturalny, kruszywo niezwiązane hydraulicznie,
- Rb – gruz z elementów murowych,
- Ra – materiały bitumiczne,
- Rg – szkło,
- FL – materiał pływający po wodzie
- X- inne składniki.

Ponadto norma PN-EN 206+A2 Beton -- Wymagania, właściwości użytkowe, produkcja i zgodność [2] wprowadza zalecenia dotyczące maksymalnej procentowej wartości zastąpienia kruszyw grubych w zależności od rodzaju kruszywa z recyklingu oraz klasy ekspozycji. Stosowanie kruszyw recyklingowych jest zalecane jedynie przy klasach ekspozycji: X0 (do 50%), XC1, XC2 (do 30% lub 20% w zależności od składu kruszywa recyklingowego), XC3, XC4, XF1, XA1, XD1 (do 30%). W przypadku pozostałych, bardziej wymagających, klas ekspozycji stosowanie kruszyw recyklingowych w betonach nie jest zalecane. Należy tutaj podkreślić, że rekomendacje te dotyczą jedynie zaazotowanie kruszywa grubego.

W odniesieniu do drobnych frakcji materiałów odpadowych, powstających podczas prac rozbiórkowych oraz w efekcie procesów kruszenia, normy dopuszczają stosowanie pyłu z recyklingu betonowego (F) jako dodatek do cementu [3], wprowadzając przy tym sześć nowych rodzajów cementów powszechnego użytku: cementy portlandzkie recyklingowe CEM II/A-F i CEM II/B-F, cementy portlandzkie wieloskładnikowe CEM II/A-M, CEM II/B-M i CEM II/C-M oraz cement wieloskładnikowy CEM VI. Zastosowanie wtórnego kruszywa drobnego jako alternatywy dla kruszywa naturalnego w kompozytach cementowych wciąż napotyka na bariery prawne, które ograniczają możliwości pełnego zagospodarowania odpadów budowlanych. Brak odpowiednich regulacji utrudnia wdrożenie tego rozwiązania na szerszą skalę, co hamuje postęp w kierunku realizacji założeń gospodarki o obiegu zamkniętym.

1.2 Kompozyty cementowe na bazie kruszyw recyklingowych

Badania nad zastosowanie kruszyw recyklingowych w materiałach cementowych trwają od wielu lat i prowadzone są przez wiele ośrodków badawczych. Począwszy od badań skupiających się na właściwościach samego kruszywa recyklingowego [4], poprzez wydajność i efektywność sposobów ich otrzymywania [5, 6]. W badaniach laboratoryjnych jako surowiec kruszyw wtórnych wykorzystuje się głównie destrukty betonowy [7, 8] i ceramiczny, np. z płytek ceramiczne [5], armatury sanitarnej [9], ceramicznych izolatorów elektrycznych [10], czy elementów murowych [11, 12, 13], choć wśród surowców kruszyw recyklingowych można również znaleźć alternatywne źródła, takie jak np. elektrośmieci [14]. Głównym polem zainteresowań badaczy jest wykorzystanie kruszyw recyklingowych jako zamiennik naturalnego kruszywa grubego [9, 13], a badania laboratoryjne wykazują, że optymalny dodatek kruszywa recyklingowego kształtuje się na poziomie 20% [8]. Prowadzone prace badawcze

prezentują potencjał wykorzystania drobnych frakcji kruszyw recyklingowych jako zamiennik kruszywa drobnego lub jako dodatek do spoiwa cementowego [15, 16]. Większość dotychczasowych prac prezentuje wyniki badań laboratoryjnych skupiających się na cechach mechanicznych i trwałościowych projektowanych rozwiązań materiałowych, nie uwzględniając aspektów środowiskowych. Zaproponowany w artykule plan badań, analizujący wpływ recyklingowych kruszyw drobnych na parametry wytrzymałościowe i trwałość kompozytów cementowych, w połączeniu z oceną środowiskową są odpowiedzią na potrzebę naukowego uzasadnienia i standaryzacji stosowania drobnokruszywowych materiałów z recyklingu w budownictwie. Tego rodzaju podejście może przyczynić się do opracowania wytycznych technicznych i prawnych, które zwiększą zaufanie branży do alternatywnych surowców, a tym samym ułatwią ich szersze wdrażanie w praktyce inżynierskiej.

2. Materiały i plan badań

W artykule przedstawiono wyniki badań mechanicznych oraz trwałościowych wraz z analizą środowiskową zapraw cementowych wykonanych na bazie kruszyw naturalnych oraz recyklingowych. Próbkę badawczą stanowiły normowe beleczki o wymiarach 40x40x160 mm, wykonane zgodnie z normą PN-EN 196-1 Metody badania cementu – Część 1. Oznaczanie wytrzymałości [17].

2.1 Materiały

Zaprawy cementowe, zarówno próbki referencyjne, jak i próbki z kruszywem recyklingowym, wykonano na bazie cementu portlandzkiego CEM I 42,5R, piasku normowego oraz wody destylowanej. Jako kruszywo recyklingowe wykorzystano dwa rodzaje destruktywów: ceramiczny oraz betonowy.

Miał ceramiczny o frakcji 0 – 2 mm pozyskano w wyniku przekruszenia przesiewania materiałów ceramicznych, składających się z fragmentów cegieł, dachówek oraz ewentualnych resztek elementów drewnianych. Surowce te pochodziły ze składowiska odpadów budowlanych, gdzie były wystawione przez nieokreślony okres czasu na działanie niekorzystnych warunków atmosferycznych. Miał betonowy o frakcji 0 – 2 mm został pozyskany w wyniku przekruszenia i przesiewania zdemontowanych peronowych płyt betonowych. peronowych. W tabeli 1 zestawiono receptury badanych próbek laboratoryjnych wraz z ich akronimami stosowanymi w dalszej części artykułu.

Tab. 1. Receptury zapraw cementowych.

Lp.	Akronim	Składniki zapraw cementowych				
		Cement [g]	Piasek normowy [g]	Miał ceramiczny [g]	Miał betonowy [g]	Woda destylowana [g]
1	REF	450	1350	0	0	225
2	20_CERAM	450	1080	270	0	225
3	40_CERAM	450	810	540	0	225
4	20_BET	450	1080	0	270	225
5	40_BET	450	810	0	540	225

2.2 Badania laboratoryjne

W ramach badań laboratoryjnych wykonano podstawowe badania właściwości geometrycznych oraz fizycznych kruszyw: oznaczono skład ziarnowy kruszyw metodą przesiewania, zgodnie z normą PN-EN 933-1 Badania geometrycznych właściwości kruszyw – Część 1. Oznaczanie składu ziarnowego – Metoda przesiewania [18] oraz oznaczono gęstość nasypową kruszyw w stanie luźnym oraz zagęszczonym, zgodnie z normą PN-EN 1097-3: Badania mechanicznych i fizycznych właściwości kruszyw – Część 3: Oznaczanie gęstości nasypowej i jamistości [19].

Dla wykonanych zapraw cementowych oznaczono wytrzymałość na rozciąganie przy zginaniu i wytrzymałość na ściskanie po 28 dniach dojrzewania, zgodnie z normą PN-EN 196-1 [17]. Następnie przeprowadzono badania trwałościowe, polegające na ocenie stopnia mrozoodporności recyklingowych zapraw cementowych. Badanie przeprowadzono zgodnie z załącznikiem N normy PN-B-06265 Beton – Wymagania, właściwości użytkowe, produkcja i zgodność – Krajowe uzupełnienie PN-EN 206+A2:2021-08 [20]. Próbkę laboratoryjną badano po 25, 50, 75, 100, 125 oraz 150 cyklach zamrażania i rozmrażania, a do oceny mrozoodporności zastosowano dwa kryteria:

- łączna masa ubytków materiału w postaci zniszczonych narożników i krawędzi, odprysków kruszywa itp.,
- obniżenie wytrzymałości na ściskanie, w stosunku do wytrzymałości próbek niezamrażanych.

Ostatnim etapem prac laboratoryjnych była ocena środowiskowa analizowanych receptur zapraw recyklingowych. W tym celu obliczono wartości potencjału tworzenia efektu cieplarnianego (ang. GWP – Global Warming Potential) zgodnie z wytycznymi z normy PN-EN 15804+A2 Zrównoważenie obiektów budowlanych – Deklaracje środowiskowe wyrobu – Podstawowe zasady kategoryzacji wyrobów budowlanych [21]. Analiza została przeprowadzana w oparciu o metodologię oceny cyklu życia (ang. LCA – Life Cycle Assessment), koncentrując się na etapach A1-A3, obejmujących procesy związane z pozyskiwaniem surowców, ich transportem oraz produkcją materiału. Obliczenia wykonano z wykorzystaniem oprogramowania OneClick LCA (One Click LCA© Version: 0.30.0, Database version: 7.), zaś w tabeli 2 zestawiono wartości GWP dla poszczególnych materiałów. W przypadku kruszyw recyklingowych na wartość GWP składa się ślad węglowy pochodzący od nakładów energetycznych kruszarek budowlanych (przyjęto założenie, że gruz jest przekruszony bezpośrednio na placu budowy i po przekruszeniu ponownie wykorzystany jako składnik zapraw).

Tab. 2. Wartości GWP materiałów wykorzystanych do zapraw.

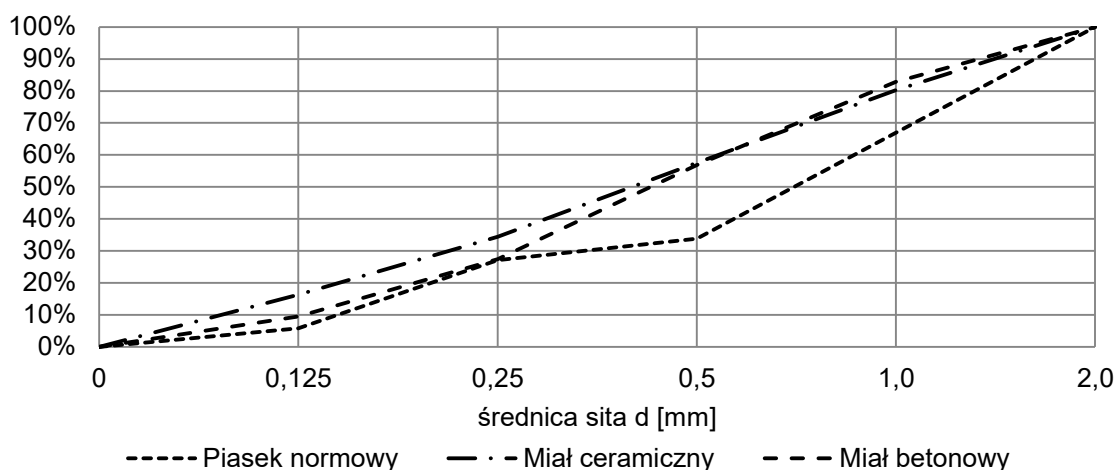
Lp.	Materiał	GWP (A1-A3) eqkgCO ₂ /kg	Źródło
1	Cement CEM I 42,5 R	0,6640	[22]
2	Woda destylowana	0,00030	[23]
3	Piasek normowy	0,00232	[23]
4	Miał ceramiczny	0,001675	opracowanie własne
5	Miał betonowy	0,001675	opracowanie własne

3. Wyniki badań wraz z analizą

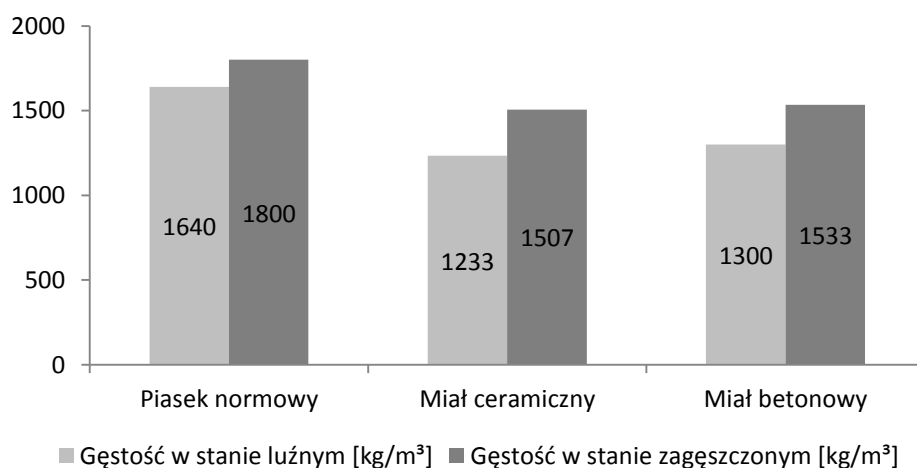
3.1 Właściwości geometryczne oraz fizyczne kruszyw

Na rysunku 1 przedstawiono wyniki oznaczania składu ziarnowego analizowanych kruszyw: piasku normowego oraz kruszyw recyklingowych (miału ceramicznego oraz miału betonowego). Na rysunku 3 przedstawiono wyniki oznaczania gęstości nasypowej w stanie luźnym oraz w stanie zagęszczonym.

Rys. 1. Skład ziarnowy kruszyw.



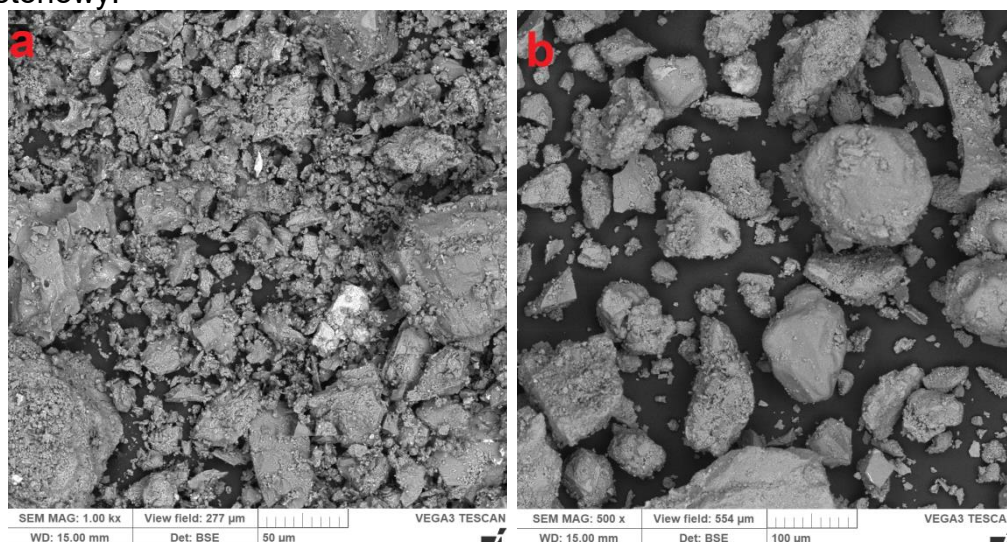
Rys. 2. Gęstości nasypowe kruszyw.



Na podstawie przeprowadzonych badań stwierdzono, że wszystkie analizowane kruszywa, zgodnie z normą PN-EN 12620 Kruszywa do betonu, należy zaklasyfikować do kategorii Gf₈₅, jednak warto zauważyć, że kruszywa recyklingowe charakteryzują się większym udziałem frakcji drobnych, zwłaszcza w przedziale 0,25 – 0,5 mm. Ponadto miału ceramiczny cechuje się drobniejszym uziarnieniem niż miał betonowy, co zostało potwierdzone obrazowaniem mikroskopowym SEM (Rys. 3). Badanie oznaczanie gęstości nasypowych wykazało, że oba kruszywa recyklingowe mają niższe wartości gęstości nasypowych, zarówno w stanie luźnym, jak i zagęszczonym, w porównaniu do piasku normowego. Ponadto wartość gęstości

nasypowej miálu ceramicznego w stanie luźnym jest na pograniczu wartości dla kruszyw lekkich ($< 1200 \text{ kg/m}^3$).

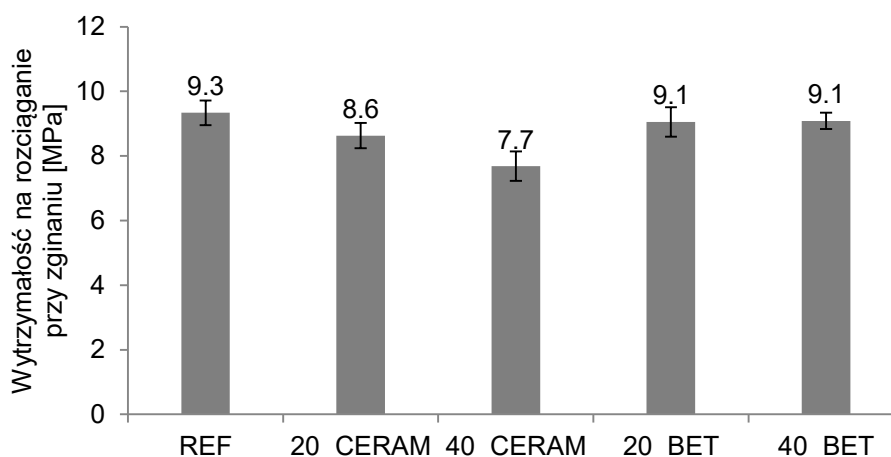
Rys. 3. Obrazy mikroskopowe SEM kruszyw recyklingowych: (a) miál ceramiczny, (b) miál betonowy.



3.2 Właściwości mechaniczne i trwałościowe recyklingowych zapraw cementowych

Na rysunku 4 i 5 przedstawiono wyniki oznaczania wytrzymałości na rozciąganie przy zginaniu oraz wytrzymałości na ściskanie próbek zapraw cementowych po 28 dniach dojrzewania.

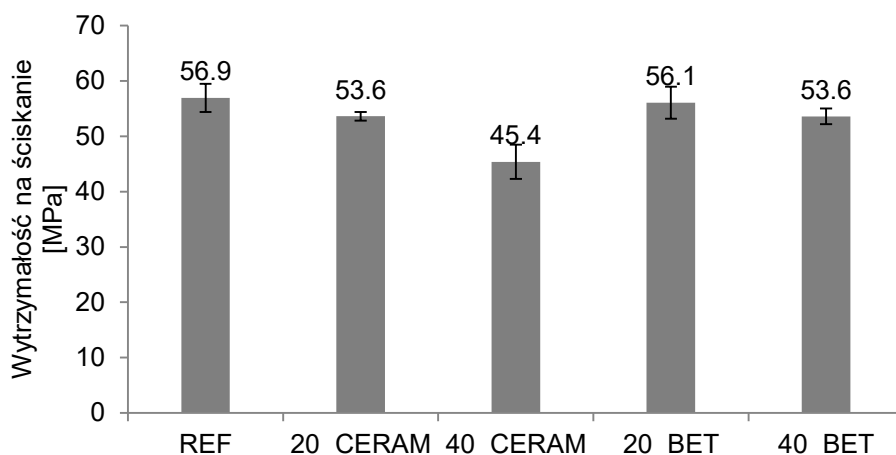
Rys. 4. Wyniki oznaczania wytrzymałości na rozciąganie przy zginaniu po 28 dniach dojrzewania.



Badania oznaczania wytrzymałości na rozciąganie przy zginaniu oraz wytrzymałości na ściskanie po 28 dniach dojrzewania wykazały, że dodatek kruszywa recyklingowego w postaci miálu ceramicznego powoduje nieznaczny spadek obu wartości parametrów mechanicznych i jest on zależny od ilości użytego kruszywa recyklingowego. Przy 40% podstawieniu zaobserwowano ok. 17% spadek wartości

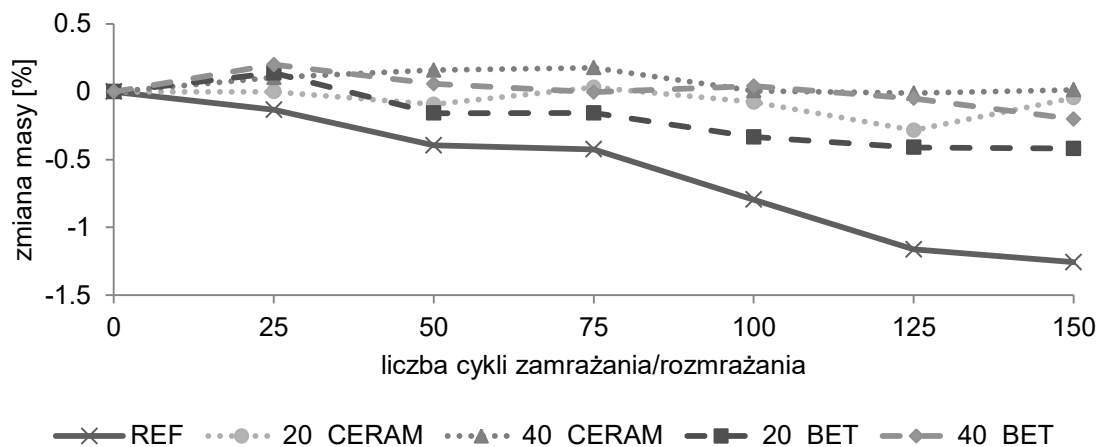
wytrzymałości na rozciąganie przy zginaniu oraz ok. 20% spadek wartości wytrzymałości na ściskanie. W przypadku zastąpienia kruszywa naturalnego miałem betonowym w ilości 20% oraz 40% zaobserwowane zmiany wartości parametrów wytrzymałościowych nie są statystycznie istotne.

Rys. 5. Wyniki oznaczania wytrzymałości na ściskanie po 28 dniach dojrzewania.



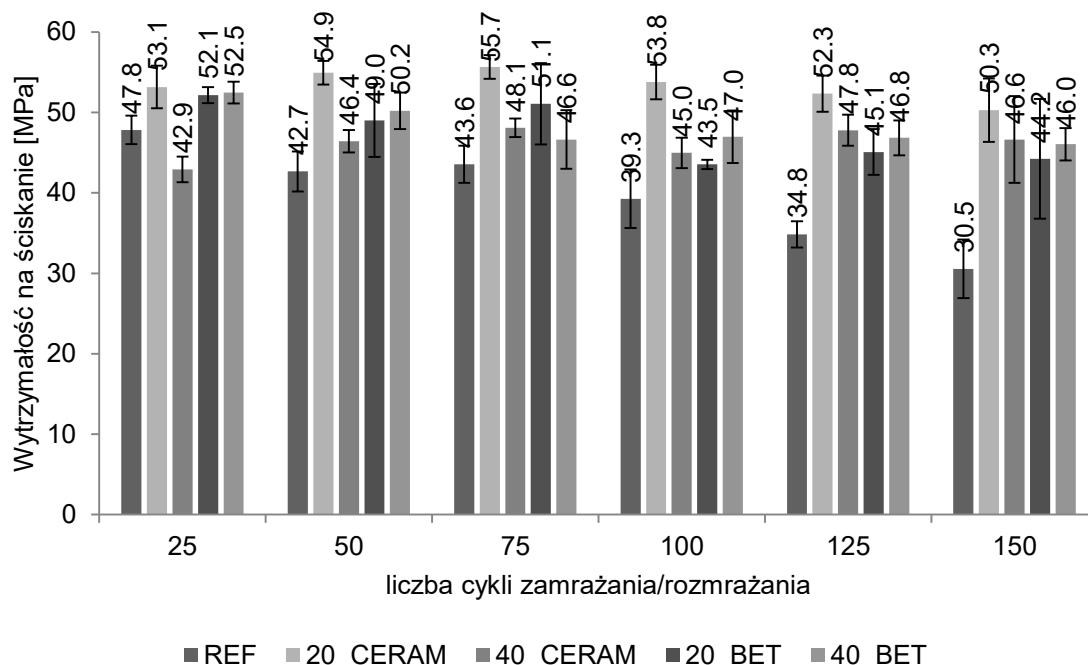
Na rysunku 6 przedstawiono wyniki oznaczania ubytków masy po kolejnych cyklach zamrażania – rozmrażania. Na podstawie uzyskanych wyników badań stwierdzono, że wszystkie badane próbki spełniają normowe kryterium dotyczące maksymalnego dopuszczalnego ubytku masy na poziomie 5%. We wszystkich analizowanych zaprawach zaobserwowano stopniowy wzrost wartości ubytków masy w miarę postępujących cykli zamrażania i rozmrażania. Największy ubytek masy w każdym etapie badania odnotowano w próbkach referencyjnych, które po 150 cyklach osiągnęły wartość 1,26%. Dla zapraw cementowych zawierających kruszywa recyklingowe zaobserwowano dużo niższe wartości ubytku masy, a najwyższą wartość, na poziomie 0,42% po 150 cyklach zamrażania – rozmrażania, osiągnęły próbki z 20% zawartością miału betonowego. Najniższe wartości ubytku masy odnotowano dla próbek z 40% zawartością miału ceramicznego.

Rys. 6. Ubytki masy po kolejnych cyklach zamrażania – rozmrażania.



Na rysunku 7 przedstawiono wyniki badań wytrzymałości na ściskanie zapraw cementowych po kolejnych cyklach zamrażania i rozmrażania. Wszystkie analizowane próbki wykazują stopniowy spadek wytrzymałości w miarę zwiększającej się liczby cykli. Już po 50 cyklu zaobserwowano wyraźne różnice pomiędzy próbkami referencyjnymi a tymi zawierającymi kruszywo recyklingowe – na korzyść tych drugich. W przypadku próbek z dodatkiem miazu ceramicznego stwierdzono istotne statystycznie różnice w wytrzymałości na ściskanie w zależności od zastosowanej ilości kruszywa, przy czym wyższe wartości uzyskano dla zapraw zawierających 20% tego dodatku. Z kolei dla próbek z miazem betonowym nie odnotowano istotnych statystycznie różnic w wytrzymałości niezależnie od zawartości kruszywa recyklingowego, na żadnym etapie badania mrozoodporności.

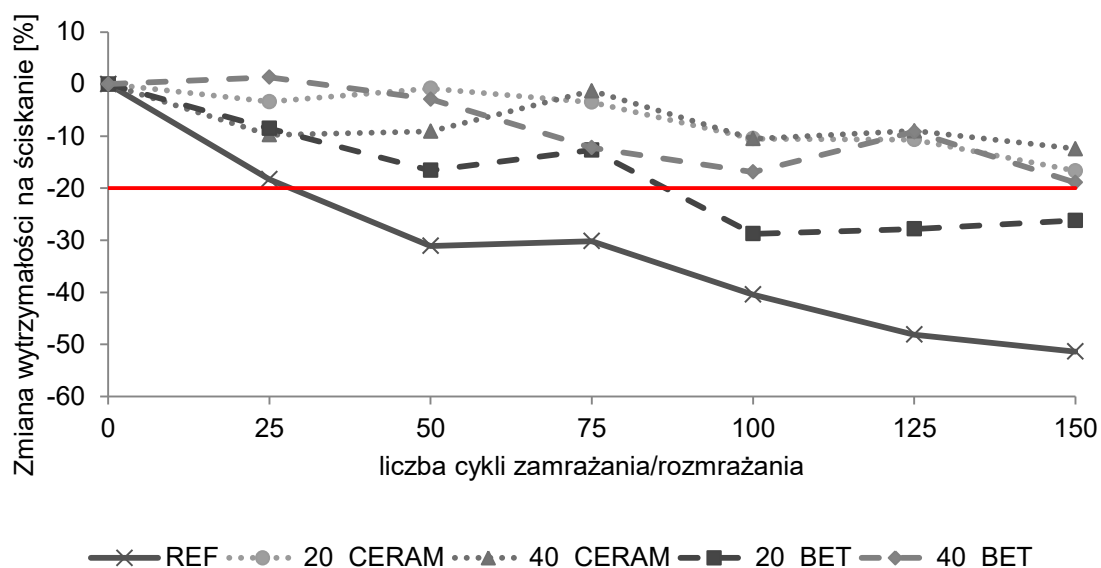
Rys. 7 Wyniki oznaczania wytrzymałości na ściskanie po kolejnych cyklach zamrażania – rozmrażania.



Na rysunku 8 przedstawiono procentowy spadek wytrzymałości na ściskanie zapraw cementowych po kolejnych cyklach zamrażania i rozmrażania. Próbkę referencyjną już po 25 cyklu nie spełniały normowego kryterium maksymalnego dopuszczalnego spadku wytrzymałości na poziomie 20%, co świadczy o ich ograniczonej odporności na działanie mrozu. W przypadku zapraw z dodatkiem kruszywa recyklingowego jedynie próbki zawierające 20% miazu betonowego po 100 cyklach przekroczyły próg 20% spadku wytrzymałości. Pozostałe próbki wykazały większą odporność, osiągając stopień mrozoodporności F150. Najmniejszy spadek wytrzymałości na ściskanie odnotowano dla zapraw zawierających 40% miazu ceramicznego, co wskazuje na szczególnie korzystny wpływ tego rodzaju kruszywa na odporność na cykliczne działanie mrozu. Analiza zarówno ubytków masy, jak i spadków wytrzymałości potwierdza, że dodatek kruszywa recyklingowego poprawia odporność zapraw cementowych na cykliczne zamrażanie i rozmrażanie. Lepsze wyniki uzyskano przy zastosowaniu miazu ceramicznego, dla którego zarejestrowano niższe

ubytki masy oraz mniejsze obniżenie wytrzymałości w porównaniu z zaprawami zawierającymi miąż betonowy. Mrozoodporność badanych zapraw była również zależna od ilości zastosowanego kruszywa. Zarówno w przypadku miąż ceramicznego, jak i betonowego, lepsze rezultaty uzyskano przy zawartości 40% w porównaniu do 20%.

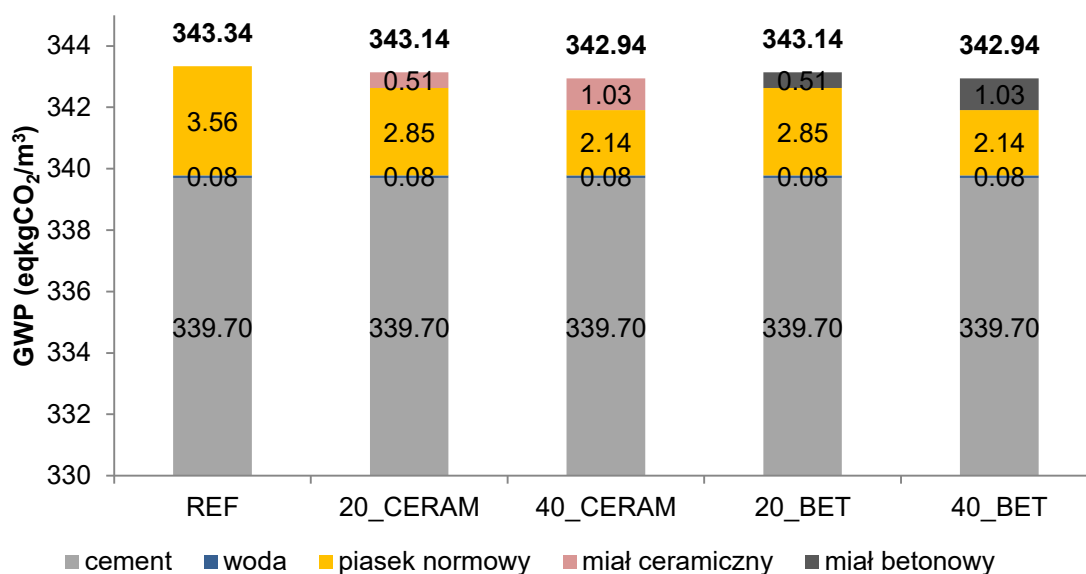
Rys. 8 Spadki wytrzymałości na ściskanie po kolejnych cyklach zamrażania – rozmrażania.



3.3 Analiza środowiskowa recyklingowych zapraw cementowych

Na rysunku 9 przedstawiono wartości GWP (A1-A3) dla zaprawy referencyjnej oraz zapraw wykonanych na bazie kruszyw recyklingowych.

Rys. 9. Wartości GWP (A1-A3) badanych zapraw.



Na podstawie uzyskanych wyników analiz stwierdzono, że podstawienie kruszywa recyklingowego za kruszywo naturalne w nieznacznym stopniu obniża wartość śladu węglowego zapraw cementowych. Wynika to przede wszystkim z relatywnie niskiej wartości śladu węglowego kruszyw naturalnych w stosunku do wartości śladu węglowego spoiwa cementowego. We wszystkich przeanalizowanych wariantach cement odpowiada za ponad 99% skumulowanej wartości wskaźnika GWP, co jednoznacznie wskazuje, że kluczowy potencjał redukcji oddziaływania środowiskowego zapraw cementowych związany jest z zastosowaniem niskoemisyjnych spoiw alternatywnych.

Przeprowadzone analizy środowiskowe nie obejmują jednak dwóch istotnych czynników: ograniczonej dostępności zasobów kruszyw naturalnych oraz konieczności zagospodarowania odpadów budowlanych powstających w wyniku prac rozbiórkowych. Czynniki te stanowią kluczowe determinanty intensyfikacji wykorzystania kruszyw pochodzących z recyklingu w przemyśle materiałów cementowych, ukierunkowanej na maksymalizację ich zastosowania w praktyce inżynierskiej.

4. Podsumowanie i wnioski

Na podstawie przeprowadzonych badań laboratoryjnych stwierdzono, że:

- zastosowanie miałów pochodzenia wtórnego w zaprawach cementowych prowadzi do nieznacznego obniżenia ich wytrzymałości na rozciąganie przy zginaniu oraz wytrzymałości na ściskanie, przy czym kluczowe znaczenia ma rodzaj i ilość zastosowanego materiału;
- zaprawy recyklingowe charakteryzują się wysoką odpornością na cykliczne działanie zamrażania i rozmrażania, dzięki czemu mogą być stosowane w miejscach narażonych na działanie niekorzystnych warunków atmosferycznych;
- analiza śladu węglowego wykazała, że zaprawy cementowe z dodatkiem kruszyw recyklingowych mają nieznacznie niższy ślad węglowy w porównaniu do zapraw normowych, a kluczowym czynnikiem wpływającym na wartość GWP jest rodzaj i zawartość cementu.

Przeprowadzone badania laboratoryjne wykazały, iż zaprawy cementowe zawierające komponenty pochodzące z recyklingu mogą stanowić pełnowartościową alternatywę dla konwencjonalnych mieszanek cementowych, oferując zarówno korzyści środowiskowe, jak i użytkowe — w tym poprawę odporności na cykliczne zamrażanie i rozmrażanie. Pomimo nieznacznie obniżonych parametrów wytrzymałościowych na ściskanie i rozciąganie przy zginaniu, materiały te wykazują istotny potencjał w zastosowaniach narażonych na oddziaływanie niekorzystnych warunków atmosferycznych. Z punktu widzenia zrównoważonego rozwoju, ich wdrażanie znajduje uzasadnienie w ograniczeniu negatywnego wpływu na środowisko. Niemniej jednak należy podkreślić, iż całkowity ślad węglowy zapraw recyklingowych pozostaje w dużej mierze determinowany przez rodzaj i zawartość cementu, który ze względu na wysoki współczynnik emisji dwutlenku węgla istotnie obciąża bilans środowiskowy analizowanych kompozytów.

Badania były współfinansowane przez Unię Europejską w ramach programu Horyzont Europa FP4 — projekt Rail4EARTH „Zrównoważone i ekologiczne systemy kolejowe” (GA 101101917) oraz współfinansowane przez Ministerstwo Nauki i Szkolnictwa Wyższego (dawniej Ministerstwo Edukacji i Nauki) w ramach programu „Projekty Międzynarodowe Współfinansowane” (umowa nr 5400/HE/2023/2) oraz współfinansowane przez Politechnikę Poznańską, numer grantu 0412/SBAD/0080.

5. Literatura

- [1] PN-EN 12620+A1:2010 Kruszywa do betonu.
- [2] PN-EN 206+A2:2021-08 Beton -- Wymagania, właściwości użytkowe, produkcja i zgodność.
- [3] PN-EN 197-6:2023-09 Cement – Część 6: Cement z materiałów budowlanych pochodzących z recyklingu.
- [4] P. Ogrodnik, B. Zegardło, D. Pieniak, Badanie twardości jako metoda oceny jakości recyklingowych kruszyw ceramicznych do betonów, Zeszyty Naukowe SGSP 2017, Nr 62 (tom 2)/2/2017.
- [5] T. Gawenda, Z. Naziemiec, A. Walerak, Badania wybranych właściwości kruszyw z odpadów ceramicznych oraz betonu wytworzonego z ich udziałem, Rocznik Ochrona Środowiska, vol. 15, 2013, s. 2003–2013.
- [6] V. Venkrbec, N. Haond, V. Boel, I. Novakova, Towards sustainable construction: RCA under different crushing techniques to determine the utilisation potential index for concrete production, Sustainable Materials and Technologies 45 (2025) e01493, DOI: 10.1016/j.susmat.2025.e01493.
- [7] G. Łój, Możliwości stosowania kruszyw z recyklingu budowlanego do wytwarzania betonów wibroprasowanych, Dni Betonu, 2016, s. 1–8.
- [8] L. Lu, Optimal Replacement Ratio of Recycled Concrete Aggregate Balancing Mechanical Performance with Sustainability: A Review, Buildings 2024, 14, 2204. DOI: 10.3390/buildings14072204.
- [9] N. Gasik-Kowalska, A. Koper, P. Wieszczyńska, P. Lisiecka, P. Syska, „Wpływ recyklingowego kruszywa ceramicznego na cechy wytrzymałościowe betonu wysokowartościowego”, Materiały Budowlane, vol. 2, nr 618, 2024, s. 39–44.
- [10] R. M. Senthamarai, P. Devadas Manoharan, D. Gobinath, Concrete made from ceramic industry waste: Durability properties, Construction and Building Materials 25 (2011) 2413–2419, DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2010.11.049.
- [11] J. R. Correia, J. de Brito, A. S. Pereira, Effects on concrete durability of using recycled ceramic aggregates, Materials and Structures (2006) 39:169–177, DOI: 10.1617/s11527-005-9014-7
- [12] J. de Brito, A.S. Pereira, J.R. Correia, Mechanical behaviour of non-structural concrete made with recycled ceramic aggregates, Cement & Concrete Composites 27 (2005) 429–433, DOI:10.1016/j.cemconcomp.2004.07.005.
- [13] P. B. Cachim, Mechanical properties of brick aggregate concrete, Con. and Building Materials 23 (2009) 1292–1297, DOI:10.1016/j.conbuildmat.2008.07.023.
- [14] J. Ramteke, Kaminee Rathore, J. Damodar Supe, Green concrete incorporating industrial waste and E-waste: a review of compressive strength, CO2 emissions, and replacement levels, Asian Journal of Civil Engineering (2025) 26:1881–1906, DOI: 10.1007/s42107-025-01284-0.

- [15] F. Bektas, K. Wang, H. Ceylan, Effects of crushed clay brick aggregate on mortar durability, *Construction and Building Materials* 23 (2009) 1909–1914, DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2008.09.006.
- [16] B. Zegardło, T. Drzymała, W. Andrzejuk, D. Tokarski, J. Nitychoruk, B. Jaworska, Ceramiczne odpady budowlane powstające w procesie rewitalizacji miasta – badanie możliwości ich wykorzystania jako substytutu cementu do betonów i zapraw, *Przegląd Naukowy – Inżynieria i Kształtowanie Środowiska* (2018), 27 (4), 452–462, DOI: 10.22630/PNIKS.2018.27.4.43.
- [17] PN-EN 196-1:2016-07 Metody badania cementu – Część 1. Oznaczanie wytrzymałości.
- [18] PN-EN 933-1:2012 Badania geometrycznych właściwości kruszyw – Część 1. Oznaczanie składu ziarnowego – Metoda przesiewania.
- [19] PN-EN 1097-3:2000 Badania mechanicznych i fizycznych właściwości kruszyw – Część 3: Oznaczanie gęstości nasypowej i jamistości.
- [20] PN-B-06265:2022-08 Beton – Wymagania, właściwości użytkowe, produkcja i zgodność – Krajowe uzupełnienie PN-EN 206+A2:2021-08.
- [21] PN-EN 15804+A2:2020-03 Zrównoważenie obiektów budowlanych – Deklaracje środowiskowe wyrobu – Podstawowe zasady kategoryzacji wyrobów budowlanych.
- [22] https://www.cemex.pl/documents/46481509/67411456/D236-2023_PL_EPD_CEMEX_CEM-I-42_5.pdf/
- [23] <https://oneclicklcaapp.com/main/>

Dr hab. inż. Tomasz Baran

Sieć Badawcza Łukasiewicz - Instytut Ceramiki i Materiałów Budowlanych w Krakowie

Dr inż. Mikołaj Ostrowski

Sieć Badawcza Łukasiewicz - Instytut Ceramiki i Materiałów Budowlanych w Krakowie

Dr inż. Magda Kosmal

Sieć Badawcza Łukasiewicz - Instytut Ceramiki i Materiałów Budowlanych w Krakowie

Skład i kierunki stosowania niskoemisyjnego betonu z cementów wieloskładnikowych

Composition and directions of application of low-emission concrete made of multi-component cements

Streszczenie

Niskoemisyjne cementy wieloskładnikowe produkowane w Polsce, głównie z udziałem popiołu lotnego krzemionkowego i/lub granulowanego żużla wielkopiecowego oraz wapienia, jako zamienników wysokoemisyjnego klinkieru portlandzkiego, zapewniają duży poziom obniżenia emisji CO₂ na jednostkę produktu. Stosowanie tych cementów w przemyśle betonowym umożliwia projektowanie i wytwarzanie niskoemisyjnych betonów o obniżonej emisji CO₂. W artykule przedstawiono dane potwierdzające możliwość uzyskania wysokich wytrzymałości betonu, przy niskiej zawartości klinkieru portlandzkiego w mieszance betonowej. Przy zawartości 100-120 kg klinkieru portlandzkiego w 1 m³ mieszanki betonowej można uzyskać beton o wytrzymałości na ściskanie blisko 100 MPa, po 28 dniach. Dla betonu towarowego klasę wytrzymałości C40/50 można uzyskać przy udziale 70 - 100 kg klinkieru portlandzkiego w 1 m³ mieszanki betonowej. Wprowadzono wskaźnik emisji CO₂ betonu (We) obliczony jako ilość kg CO₂ w 1 m³ betonu, przypadająca na 1MPa wytrzymałości na ściskanie betonu po 28 dniach twardnienia.

Niskoemisyjne cementy wieloskładnikowe zawierające powyżej 30% składnika nieklinkierowego granulowanego żużla wielkopiecowego lub popiołu lotnego krzemionkowego umożliwiają projektowanie betonów niskoemisyjnych, dla których

wskaźnik emisji CO₂ betonu jest 4-5 krotnie niższy w porównaniu z betonem z cementu portlandzkiego CEM I. Niskoemisyjne betony kształtują korzystne cechy użytkowe i trwałość betonu, osiągając parametry porównywalne lub lepsze w porównaniu do betonu z cementu portlandzkiego CEM I.

Abstract

Low-emission multi-component cements produced in Poland, mainly with siliceous fly ash and/or granulated blast furnace slag and limestone, as substitutes for high-emission Portland clinker, provide a high level of CO₂ emission reduction per unit of product. The use of these cements in the concrete industry makes it possible to design and produce low-emission concretes with reduced CO₂ emissions. The article presents data confirming the possibility of obtaining high concrete strengths with a low Portland clinker content in the concrete mix. At a content of 100-120 kg of Portland clinker in 1 m³ of concrete mix, concrete with a compressive strength close to 100 MPa can be obtained after 28 days. For ready-mix concrete, the strength class C40/50 can be obtained with 70 - 100 kg of Portland clinker in 1 m³ of concrete mix. The CO₂ emission factor of concrete (We), calculated as the amount of kg of CO₂ in 1 m³ of concrete, per 1MPa of concrete compressive strength after 28 days of hardening, has been introduced.

Low-emission multi-component cements containing more than 30% of the non-clinker component of granulated blast furnace slag or siliceous fly ash enable the design of low-emission concretes, for which the CO₂ emission rate of concrete is 4-5 times lower compared to concrete made from Portland cement CEM I. Low-emission concretes provide favourable performance characteristics and durability of concrete, achieving parameters comparable or better compared to Portland cement CEM I concrete.

1. Wprowadzenie

W Polsce do produkcji cementów wieloskładnikowych, oprócz klinkieru portlandzkiego, stosuje się głównie popiół lotny krzemionkowy V i/lub granulowany żużel wielkopiecowy. Te dwa nieklinkierowe składniki główne cementu (popiół i żużel) charakteryzują się dobrymi właściwościami pucolanowych lub hydraulicznymi, co pozwala na maksymalną substytucję klinkieru w cemencie, nawet do 95%. Najważniejszymi efektami ekologicznymi oraz ekonomicznymi produkcji cementów z dużym udziałem składników nieklinkierowych są:

- ☐ obniżenie emisji CO₂ na jednostkę produktu (cementu),
- ☐ stosowanie odpadowych surowców wtórnych, zastępujących klinkier portlandzki, tj. najbardziej energochłonny składnik główny cementu.

Całkowita emisja w procesie produkcji klinkieru portlandzkiego o przeciętnym składzie fazowym, z naturalnych surowców węglanowych i przy opalaniu tylko pyłem węglowym (bez udziału biomasy) kształtuje się na poziomie ok. 900 kg CO₂/Mg klinkieru [1]. Zastąpienie więc 1% klinkieru portlandzkiego dowolnym nieklinkierowym składnikiem głównym w cemencie obniża emisję CO₂ o 9,0 kg na tonę cementu. Obniżenie emisji CO₂ związane z produkcją cementów CEM II – CEM IV, z maksymalnym, normowym udziałem składnika nieklinkierowego, w porównaniu do cementu portlandzkiego CEM

I bez udziału składnika drugorzędowego, zestawiono w tablicy 1. W tablicy tej przedstawiono także względną emisję CO₂ dla tych cementów w porównaniu do cementu portlandzkiego, dla którego założono 100% emisję CO₂.

Tablica 1. Emisja CO₂ przypadająca na Mg produkowanego cementu, z maksymalnym normowym udziałem głównego składnika nieklinkierowego

Rodzaj cementu wg PN-EN 197-1 i wg PN-EN 197-5	Skład cementu, % masy				Emisja CO ₂ , kg/Mg cementu	Względna emisji CO ₂ %
	Klinkier	Popiół	Żużel	Gips		
CEM I	95,0	-	-	5,0	855	100
CEM II/A-S	77,0	-	18,0	5,0	693	81
CEM II/A-V	77,0	18,0	-	5,0	693	81
CEM II/B-S	62,0	-	33,0	5,0	558	65
CEM II/B-V	62,0	33,0	-	5,0	558	65
CEM II/B-M (S-V)	62,0	16,5	16,5	5,0	558	65
CEM II/C	48,0	47,0	-	5,0	432	51
CEM III/A	34,0	-	61,0	5,0	306	36
CEM III/B	19,0	-	76,0	5,0	171	20
CEM III/C	5,0	-	90,0	5,0	44	5
CEM IV/A	62,0	33,0	-	5,0	558	65
CEM IV/B	43,0	52,0	-	5,0	387	45
CEM V/A (S-V)	39,0	28,0	28,0	5,0	351	41
CEM V/B (S-V)	19,0	38,0	38,0	5,0	171	20
CEM VI	34,0	15,0	46,0	5,0	306	36

Stosowanie niskoemisyjnych cementów z dużą ilością składników nieklinkierowych w przemyśle betonowym umożliwia projektowanie i wytwarzanie niskoemisyjnych betonów o obniżonej emisji CO₂.

W niniejszym artykule przedstawiono wyniki badań betonów, wykonanych z przemysłowych niskoemisyjnych cementów wieloskładnikowych, o zawartości składnika głównego, nieklinkierowego w cemencie w ilości od 18 do 70%.

2. Emisja CO₂ a produkcja cementów w Polsce

Rodzaje najczęściej produkowanych cementów wieloskładnikowych w Polsce, o składach wykonanych na pobranych próbkach jednostkowych cementów, przedstawiono w tablicy 2 [1]. W tablicy tej podano/obliczono także ilość emisji CO₂ przypadającą na jednostkę produkcji cementu oraz względną emisję CO₂ dla tych cementów, w porównaniu do cementu portlandzkiego CEM I, dla którego założono 100% względną emisję CO₂.

Tablica 2. Udział nieklinkierowych składników głównych w cementach przemysłowych oraz emisja CO₂ związana z produkcją danego cementu [1]

Rodzaj cementu handlowego	Granulowany żużel wielkopiecowy S *	Popiół lotny krzemionkowy V**	Wapień LL ***	Emisja CO ₂ , kg/Mg cementu ****	Względna emisja CO ₂ , %
	% masy				
CEM I 42,5R	-	-	-	855	100
CEM II/A-V 42,5N-NA,	-	18	-	693	81
CEM II/B-V 32,5R-HSR	-	29	-	594	69
CEM IV/B (V) 32,5N-LH/NA	-	41	-	486	57
CEM II/A-S 52,5N	18	-	-	693	81
CEM II/B-S 42,5N-NA	29	-	-	594	69
CEM III/A 42,5N-LH/HSR/NA	54	-	-	369	43
CEM III/B 42,5L-LH/SR/NA	70	-	-	225	26
CEM II/A-LL 42,5R	-	-	17	702	82
CEM II/B-LL 32,5R	-	-	22	657	77
CEM II/B-M (S-V) 42,5N	14	15	-	594	69
CEM II/B-M (V-LL) 32,5R	-	21	10	576	67
CEM V/A (S-V) 42,5N-LH/HSR/NA	18	23	-	486	57
CEM V/B (S-V) 32,5N-LH/HSR/NA	32	28	-	315	37
Uwagi: * dla jednego składnika badanie wg PN-B-19707, załącznik B; dla dwóch składników badanie wg CEN TR 196-4. ** obliczono z części nierozpuszczalnych NR, oznaczonych wg PN-EN 196-2. *** badanie wg CEN TR 196-4. **** uwzględniono 5% dodatek regulatora wiązania w cementach (tab. 1).					

Mniejsza emisja CO₂ związana z produkcją cementów CEM II-CEM V, w stosunku do cementu portlandzkiego CEM I, potwierdza niskoemisyjność cementów przemysłowych z udziałem składnika głównego nieklinkierowego. Ze wzrostem udziału składnika głównego nieklinkierowego w cemencie, emisja CO₂ przypadająca na jednostkę masy produkowanego cementu ulega zmniejszeniu (tab. 2). W przypadku cementu pucolanowego CEM IV/B (V) 32,5N-LH/NA, zawierającego 41% popiołu lotnego krzemionkowego V obserwujemy obniżenie emisji o 369 kg (43%) CO₂ na Mg tego cementu, w porównaniu z cementem portlandzkim CEM I 42,5R. W przypadku

cementów hutniczych CEM III/A 42,5N-LH/HSR/NA i CEM III/B 42,5L-LH/SR/NA odnotowujemy jeszcze większe obniżenie emisji, odpowiednio o 486 kg (57%) i 630 kg (74%) CO₂ na Mg cementu, w porównaniu z cementem portlandzkim CEM I 42,5R. Natomiast w przypadku cementów wieloskładnikowych CEM V/A (S-V) 42,5N-LH/HSR/NA i CEM V/B (S-V) 32,5N-LH/HSR/NA obniżenie emisji CO₂ na Mg tego cementu, w porównaniu z cementem portlandzkim CEM I 42,5R wynosi odpowiednio 369 kg (43%) i 540 kg (63%).

Zastosowanie wymienionych niskoemisyjnych cementów z dużą ilością nieklinkierowych składników głównych w produkcji betonu daje możliwość wytwarzania betonu o niskim wskaźniku emisji CO₂ [1].

Efekt obniżenia emisji CO₂ w przypadku stosowania przemysłowych cementów na jednostkę objętości i masy wytworzonego betonu, w porównaniu z cementem portlandzkim przedstawiono w tabeli 3. W tabeli tej przedstawiono teoretyczne obliczenia emisji CO₂ betonu o zawartości 330, 400 i 450 kg cementu/m³ mieszanki betonowej. Powyższe zawartość cementu w mieszance betonowej założono odpowiednio dla betonu klasy C25/30, C40/50 i C50/60.

Tabela 3. Emisja CO₂ przypadająca na beton wykonany z cementów przemysłowych

Rodzaj cementu przemysłowego*	Zawartość cementu w 1 m ³ mieszanki betonowej, kg					
	330		400		450	
	Emisja CO ₂ , kg					
	m ³ betonu*	Mg betonu**	m ³ betonu*	Mg betonu**	m ³ betonu*	Mg betonu*
CEM I 42,5R	282	123	342	149	385	167
CEM II/A-V 42,5N-NA,	229	100	277	120	312	136
CEM II/B-V 32,5R-HSR	196	85	238	103	267	116
CEM IV/B (V) 32,5N-LH/NA	160	70	194	84	219	95
CEM II/A-S 52,5N	229	100	277	120	312	136
CEM II/B-S 42,5N-NA	196	85	238	103	267	116
CEM III/A 42,5N-LH/HSR/NA	122	53	148	64	166	72
CEM III/B 42,5L-LH/SR/NA	74	32	90	39	101	44
CEM II/A-LL 42,5R	231	100	280	122	316	137
CEM II/B-LL 32,5R	217	94	263	114	296	129
CEM II/B-M (S-V) 42,5N	196	85	238	103	267	116
CEM II/B-M (V-LL) 32,5R	190	83	230	100	259	113
CEM V/A (S-V) 42,5N-LH/HSR/NA	160	70	194	84	219	95
CEM V/B (S-V) 32,5N-LH/HSR/NA	104	45	126	55	142	62
* składki cementów przemysłowych wg tab. 2,						
** przeciętna gęstość betonu zwykłego 2,3 tony/m ³						

Przy zawartości 29% dodatków w cementach przemysłowych CEM II/B-V 32,5R-HSR i CEM II/B-S 42,5N-NA (tab. 2), w zależności od zawartości cementu w betonie emisja CO₂ wynosi od 196 kg do 267 CO₂/m³ betonu (tab. 3). Przy bardzo dużym udziale składnika nieklinkierowego w cemencie, np. CEM III/B 42,5L-LH/SR/NA emisja CO₂ w betonie z tego cementu, w zależności od zawartości cementu (klasy betonu) wynosi od 74 do 101 kg CO₂/m³ betonu.

Beton o wysokiej zawartości wieloskładnikowego cementu portlandzkiego można kwalifikować jako niskoemisyjny. W literaturze branżowej oraz podczas ostatnich wydarzeń poświęconych zrównoważonemu rozwojowi w budownictwie, takich jak konferencja "Dni Betonu 2023", pojawiły się dyskusje na temat betonu niskoemisyjnego. Niemniej jednak, nie istnieje powszechnie przyjęta definicja tego pojęcia. Stwierdzenie, iż beton można uznać za niskoemisyjny już przy zastąpieniu cementu portlandzkiego CEM I cementem wieloskładnikowym CEM II, jest, według autorów niniejszego opracowania, niewystarczające.

Cement CEM I może zawierać do 5% składnika drugorzędowego, natomiast cement CEM II/A-V, będący cementem portlandzkim popiołowym, zawiera co najmniej 6% popiołu lotnego krzemionkowego. Zatem różnica procentowa w zawartości składników nieklinkierowych wynosi około 1%, co według autorów nie jest wystarczającym kryterium do określenia betonu jako niskoemisyjnego. W związku z tym konieczne jest opracowanie jednoznacznych kryteriów oceny niskoemisyjności betonu. Autorzy niniejszego artykułu definiują beton niskoemisyjny, jako kompozyt do wykonania którego został zastosowany cement przy substytucji minimum 30% klinkieru portlandzkiego innym składnikiem głównym [1].

3. Skład i badania betonu niskoemisyjnego

Jako dodatek typu II zastosowano popiół lotny krzemionkowy o mieliwości kategorii N lub S. W celu optymalizacji właściwości mieszanki, zastosowano superplastyfikator nowej generacji GleniumSky 430, a beton wykonano przy różnych wskaźnikach wodno-cementowych. W ramach porównania przygotowano beton odniesienia (referencyjny), w którym jako spoiwo użyto cementu portlandzkiego klasy CEM I 42,5 R. Charakterystyka fizyczna cementów CEM III/B 42,4L-LH/HSR/NA oraz CEM I 42,5 R zastosowanych w badaniach została przedstawiona w tabeli 4.

Zaprojektowano mieszanki betonowe o niskiej zawartości klinkieru portlandzkiego; 70 kg, 100 kg, 120 kg w 1 m³ mieszanki betonowej. Do przygotowania mieszanek betonowych zastosowano cement hutniczy CEM III/B 42,4L-LH/SR/NA o zawartości 70% żużla granulowanego. Jako dodatek typu II, do mieszanki betonowej dodano popiół lotny krzemionkowy o mieliwości kategorii N lub S. Wykonano betony przy różnych wskaźnikach wodno-cementowych z dodatkiem superplastyfikatora nowej generacji GleniumSky 430. W celu porównawczym wykonano beton odniesienia/referencyjny, w którym jako spoiwo zastosowano cement portlandzki CEM I 42,5 R. Właściwości fizyczne cementów CEM III/B 42,4L-LH/HSR/NA i CEM I 42,5 R zastosowanych do betonów przedstawiono w tablicy 4.

Tablica 4. Właściwości fizyczne cementów przemysłowych

Rodzaj cementu	Powierzchnia właściwa cm^2/g	Czas wiązania		Konsystencja normowa %	Wytrzymałość na ściskanie po dniach, MPa			
		początek	koniec		2	7	28	90
CEM I 42,5 R	3600	160	210	28,0	26,6	46,4	58,9	61,3
CEM III/B 42,5L-LH/SR/NA	5200	240	285	26,5	11,1	24,3	54,1	71,2

Zaprojektowano 3 betony odniesienia, zakładając udział cementu; 450, 360 i 280 kg/m^3 mieszanki betonowej, odpowiednio jak dla betonów wysokiej wytrzymałości, betonu wzorcowego wg norm czynnościowych badania właściwości betonu oraz betonu zawierającego minimalną zawartość cementu, z uwagi na klasy ekspozycji wg normy PN-EN 206-1 [2]. Mieszanki betonowe przygotowano z naturalnych kruszyw bazaltowych, żwirowych i piasku.

Składy betonów zawierające klinkier w ilości 120, 100 i 70 kg w 1 m^3 betonu spełniały wymagania dotyczące zawartości cementu i stosunku wody do cementu (w/c), uwzględniając wymagania określone dla klas ekspozycji zgodnie z normą PN-EN 206-1 [2].

Ustalone składy mieszanek betonowych przedstawiono w tablicy 5.

W celu uzyskania zakładanej wytrzymałości betonu dla wymienionych klas: C25/30, C40/50 i C50/60, przy ograniczonej ilości klinkieru portlandzkiego od 70 do 120 kg na 1 m^3 mieszanki betonowej (tab. 3), wymagana jest modyfikacja składu mieszanki betonowej uwzględniająca:

- ☐ aktywację mechaniczną składników nieklinkierowych cementu, poprzez zapewnienie wysokiego stopnia rozdrobnienia granulowanego żużla wielkopiecowego w cemencie oraz wykorzystanie popiołu lotnego krzemionkowego o dużej mialkości; odmiany N, korzystnie odmiany S,
- ☐ wysoką aktywność cementów poprzez ich aktywację mechaniczną mielenia do dużej powierzchni właściwej,
- ☐ wykorzystanie efektu synergii granulowanego żużla wielkopiecowego z popiołem lotnym krzemionkowym,
- ☐ stosowanie efektywnych domieszek w celu uzyskania odpowiednio niskiego współczynnika wodno-cementowego oraz polepszenia urabialności mieszanki betonowej.

Przedstawione modyfikacje składu mieszanki betonowej, mające na celu ograniczenie emisji dwutlenku węgla (CO_2) w produkcji betonu o niskim śladzie węglowym, zostały zweryfikowane w warunkach laboratoryjnych [3]. Następnie, rozwiązania te zostały wdrożone na skalę przemysłową w procesie produkcji betonów masywnych i wielkogabarytowych, przy użyciu cementu hutniczego typu CEM III/B 42,5L, charakteryzującego się zawartością żużla wynoszącą 70% i dodatku popiołu lotnego typu II o mialkości kategorii N lub S [4–6].

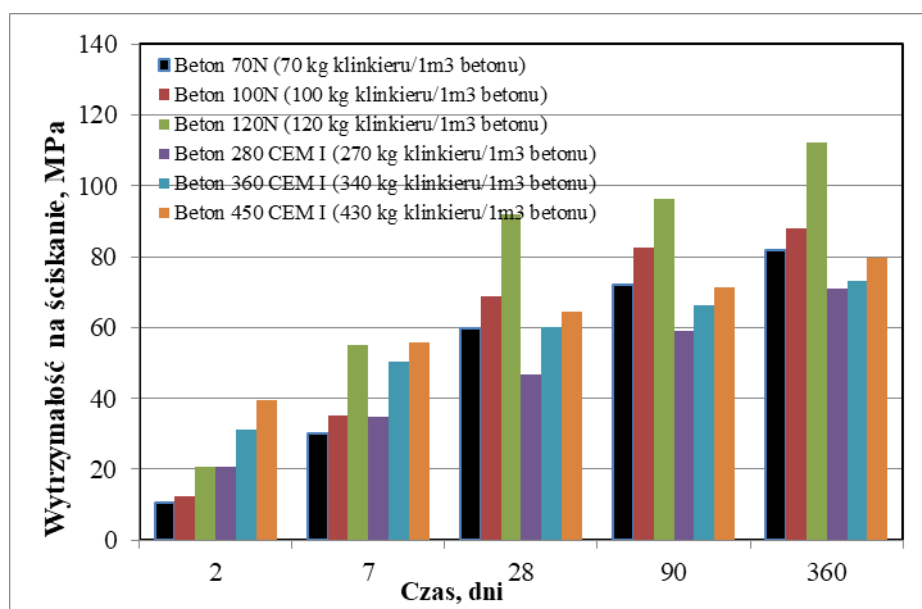
Różne warianty składu mieszanek betonowych zestawiono w tablicy 5 [3]. Wytrzymałości betonów przedstawiono w tablicy 6 oraz na rys. 1.

Tablica 5. Skład mieszanek betonowych [3]

Opis betonu	B120N	B120S	B450 CEM I	B100N	B100S	B360 CEM I	B70N	B280 CEM I
Udział składnika								
Cement hutniczy CEM III/B 42,5L [kg/m ³]	400	400	-	332	332	-	233	-
Popiół lotny krzemionkowy* [kg/m ³]	125 (kat. N)	125 (kat. S)	-	70 (kat. N)	70 (kat. S)	-	118 (kat. N)	-
Cement _{eq} = C + 0,4 p [N3]	450	450	-	360	360	-	280	-
Cement portlandzki CEM I 42,5R [kg/m ³]	-	-	450	-	-	360	-	280
Woda [kg/m ³]	167	167	167	162	162	162	154	154
Piasek 0-2 mm [kg/m ³]	655	655	690	705	705	730	620	650
Bazalt 2-8 mm [kg/m ³]	550	550	580	590	590	610	-	-
Bazalt 8-16 mm [kg/m ³]	635	635	670	680	680	705	-	-
Żwir 2-8 mm [kg/m ³]	-	-	-	-	-	-	375	395
Żwir 8-16 mm [kg/m ³]	-	-	-	-	-	-	415	435
Żwir 16-32 mm [kg/m ³]	-	-	-	-	-	-	470	495
w/s = (w/c+0,4p)	0,37	0,37	0,37	0,45	0,45	0,45	0,55	0,55
Zawartość klinkieru w 1m ³ [kg/m ³]	120	120	430	100	100	340	70	270
B120/100/70/N/S- mieszanki betonowe zawierające odpowiednio 120,100,70 kg/m ³ klinkieru z cementu CEM III/B 42,5L, zawierającego 70% żużla oraz popiół lotny V kategorii N lub S B450/360/280/CEM I - betony odniesienia zawierające odpowiednio 450,360,280 kg/m ³ cementu portlandzkiego CEM I 42,5R bez dodatku drugorzędowego * N – popiół lotny krzemionkowy kategorii N wg PN-EN 450-1:2012 * S – popiół lotny krzemionkowy kategorii S wg PN-EN 450-1:2012								

Tablica 6. Wytrzymałość na ściskanie betonów [3]

Rodzaj betonu	Wytrzymałość na ściskanie [MPa]					Klasa betonu
	2 dni	7 dni	28 dni	90 dni	360 dni	
B120 N	20,6	55,1	92,0	96,2	112,3	C50/60
B120 S	18,1	55,3	89,0	104,4	118,6	
B450 CEM I	39,5	55,8	64,3	71,2	79,6	
B100 N	12,4	35,3	68,9	82,4	87,9	C40/50 a nawet C50/60
B100 S	12,6	33,7	70,9	82,3	90,0	
B360 CEM I	31,3	50,3	60,3	66,3	73,1	
B70 N	10,4	30,2	59,6	72,1	81,7	C25/30 a nawet C40/50
B280 CEM I	20,8	34,9	46,8	59,0	71,0	



Rys. 1. Dynamika narastania wytrzymałości na ściskanie betonów [3]

Przedstawione dane potwierdzają możliwość uzyskania wysokich wytrzymałości betonu, przy niskiej zawartości klinkieru portlandzkiego w mieszance betonowej (tab. 6, rys. 1). Przy zawartości 100-120 kg klinkieru portlandzkiego w 1 m³ mieszanki betonowej można uzyskać beton o wytrzymałości na ściskanie blisko 100 MPa, po 28 dniach (rys. 1). Dla betonu towarowego klasę wytrzymałości C40/50 można uzyskać przy udziale 70-100 kg klinkieru portlandzkiego w 1 m³ mieszanki betonowej (rys. 1). Przy stosowaniu niskoemisyjnego cementu hutniczego CEM III/B 42,5L, zawierającego 70% granulowanego żużla wielopieczowego i przy stosowaniu popiołu lotnego krzemionkowego jako dodatku typu II, wskaźnik emisji CO₂ betonu jest 4 - 5 razy mniejszy w porównaniu do wskaźnika emisji betonu z cementu portlandzkiego CEM I (tab. 7).

Tablica 7. Wskaźnik emisji CO₂ betonu

Mieszanka wg tablicy 5	Rodzaj cementu	Ilość cementu [kg/m ³ betonu]	Wskaźnik w/s	Klasa betonu	Ilość klinkieru w cemencie [kg]	Emisja* CO ₂ [kg/m ³ betonu]	Wytrzymałość betonu po 28 dniach 28, (wg tab. 6), [MPa]	Wskaźnik** emisji betonu [kg CO ₂ /1MPa]
B120 N	CEM	400	0,37	C50/60	120	108	92,0	1,17
B100 N	III/B	332	0,45	C40/50	100	90	68,9	1,31
B70 N	42,5L	233	0,55	C25/30	70	63	59,6	1,06
B450 CEM I	CEM I 42,5R	450	0,37	C50/60	430	387	64,3	6,02
B360 CEM I		360	0,45	C40/50	340	306	60,3	5,07
B280 CEM I		280	0,55	C25/30	270	243	46,8	5,19

*do obliczeń przyjęto wartość emisji 900 kg CO₂/Mg klinkieru

**ilość emisji CO₂ przypadająca na 1 MPa wytrzymałości na ściskanie betonu po 28 dniach twardnienia

Wskaźnik emisji CO₂ betonu obliczono jako ilość kg CO₂ w 1 m³ betonu, przypadająca na 1MPa wytrzymałości na ściskanie betonu po 28 dniach twardnienia, zgodnie ze wzorem:

$$W_e = \frac{E \text{ CO}_2}{R28}$$

gdzie:

W_e - wskaźnik emisji betonu; kg CO₂/1 MPa

E CO₂ - emisja CO₂ przypadająca na 1 m³ betonu; kg

R28 - Wytrzymałość na ściskanie betonu po 28 dniach twardnienia; MPa

Wskaźnika emisji betonu zależy głównie od ilości klinkieru portlandzkiego w 1 m³ betonu. Dla betonu z cementu hutniczego CEM III/B 42,5L wskaźnik emisji, w zależności od ilości cementu w betonie wynosi od 1,06 do 1,31, natomiast dla betonu z cementu portlandzkiego CEM I 42,5R wskaźnik emisji wynosi od 5,07 do 6,02 (tab. 7).

Podane wskaźniki emisji CO₂ betonu wyznaczają trendy technologii produkcji betonu niskoemisyjnego, poprzez stosowanie cementów wieloskładnikowych z dużą ilością składników głównych nieklinkierowych. Niskoemisyjne cementy z dużą ilością granulowanego żużla wielkopieczowego i/lub popiołu lotnego krzemionkowego stosowane są w produkcji betonów o specjalnych właściwościach użytkowych, w tym do wykonawstwa konstrukcji wielkogabarytowych i masywnych. Wśród najważniejszych właściwości tych cementów, kształtujących korzystne cechy użytkowe i trwałość betonu należy wymienić:

- ☐ dobrą urabialność mieszanki betonowej,
- ☐ niski skurcz,
- ☐ niskie lub bardzo niskie ciepło uwodnienia cementu zapewniające bardzo niską egzotermię twardnienia betonu,
- ☐ dużą odporność na korozję chemiczną: siarczanową i wody morskiej,
- ☐ dużą odporność na korozję alkaliczną oraz możliwość zapobiegania reakcji alkalicznej ASR w betonie w przypadku stosowania kruszyw umiarkowanie reaktywnych R1 [1].

Możliwości stosowania betonów na bazie niskoemisyjnych cementów z dużą ilością dodatków mineralnych i małą ilością klinkieru portlandzkiego, ze względu na klasy ekspozycji betonu wg PN-EN 206 [2], przedstawiono w tablicy 8 [3].

Tablica 8. Zastosowanie betonów o niskiej zawartości klinkieru portlandzkiego [3]

Zawartość klinkieru [kg/m ³]	w/s	Dodatek popiołu	Zastosowanie
120	0,37	Odmiany S	☐ beton konstrukcyjny BWW klasy C50/60 i wyższej, ☐ monolityczne elementy wielkogabarytowe betonowane w sposób ciągły, ☐ betonowe konstrukcje masywne, np. obiekty hydrotechniczne, hydroenergetyczne, podziemne, ☐ elementy betonowe narażone na korozyjne oddziaływanie środowiska (agresję siarczanową, agresję chlorkową), np. beton na fundamenty, systemy odprowadzania i oczyszczania ścieków, infrastruktura dla rolnictwa, budownictwo morskie ☐ produkcja betonów z kruszywem reaktywnym,
100	0,45	Odmiany N lub S	☐ produkcja betonu towarowego w klasie wytrzymałości do C40/50, ☐ monolityczne elementy wielkogabarytowe betonowane w sposób ciągły, ☐ betonowe konstrukcje masywne, np. obiekty hydrotechniczne, hydroenergetyczne, podziemne, ☐ elementy betonowe narażone na korozyjne oddziaływanie środowiska (agresję siarczanową, agresję chlorkową), np. beton na fundamenty, systemy odprowadzania i oczyszczania ścieków, infrastruktura dla rolnictwa, ☐ produkcja betonów z kruszywem reaktywnym, ☐ beton podkładowy, wyrównawczy, wypełniający, ☐ stabilizacja podłoża i podbudowa dróg,
70	0,55	Odmiany N lub S	☐ produkcja betonu zwykłego i specjalnego w klasie wytrzymałości do C25/30, ☐ beton towarowy wymagający transportowania na większe odległości, ☐ monolityczne elementy betonowane w sposób ciągły, ☐ betonowe konstrukcje masywne; obiekty hydrotechniczne, hydroenergetyczne, podziemne, o bardzo małym efekcie samoociepłenia ☐ elementy betonowe narażone na korozyjne oddziaływanie środowiska (agresję siarczanową, agresję chlorkową), produkcja betonów z kruszywem reaktywnym, ☐ beton chudy, podkładowy, wyrównawczy, wypełniający, ☐ stabilizacja podłoża, ☐ podbudowa dróg.

Coraz częściej przy ustalaniu wskaźnika emisji CO₂ analizowany jest problem związany z pochłanianiem CO₂ przez produkty hydratacji cementu w zaprawie cementowej i betonie, które reagują z CO₂ z atmosfery, tworząc węglan wapnia i inne związki węglanowe [7,8]. Proces ten, zwany karbonatyzacją prowadzi do resorpcji CO₂ w zaprawie i betonie, obniżając całkowity wskaźnik emisji CO₂ betonu [7,8]. Szacowane ilości wiążanego CO₂ w całym cyklu eksploatacji obiektu (życia obiektu) z betonu i zaprawy cementowej mogą wynosić do 20% [7,8]. Tak wysoki poziom wiązania CO₂ w wyrobach cementopochodnych jest znaczący w bilansie emisji CO₂ w przemyśle cementowym. Pomimo coraz większego nacisku na Międzyrządowy Zespół do spraw Zmian Klimatu (ang. Intergovernmental Panel on Climate Change - IPCC), karbonatyzacja nie jest uwzględniana w bilansie emisji CO₂ w przemyśle cementowym [7,8].

4. Wnioski z badań

Przeprowadzone badania i uzyskane wyniki pozwoliły autorom na wyciągnięcie następujących wniosków:

1. Stosując cement hutniczy CEMIII/B o powierzchni właściwej ok. 5000 cm²/g, popiół lotny kategorii N lub S zawierający w swoim do 5% straty prażenia (kategoria A) i superplastyfikatory najnowszej generacji, możemy uzyskać w pełni przydatny w budownictwie beton konstrukcyjny w klasie wytrzymałościowej od C50/60 (zawartość klinkieru 120 kg w m³ mieszanki betonowej), poprzez klasę C40/50 (zawartość klinkieru 100 kg/m³) do klasy C 25/30 (zawartość klinkieru 70 kg/m³).
2. W betonach o niskim stosunku w/c (poniżej 0,4) szczególnie przydatny jest popiół lotny kategorii S. Stosowanie tego rodzaju popiołu pozwala znacząco polepszyć właściwości reologiczne (redukcja wodożądności spoiwa w betonie) i wytrzymałość po dłuższych terminach dojrzewania (powyżej 28 dni dojrzewania).
3. Zastosowanie do mieszanki betonowej cementów wieloskładnikowych o niskiej zawartości klinkieru cementowego pozwala na zmniejszenie blisko pięciokrotnie wskaźnika emisji (We) betonu w porównaniu z betonem wykonanym z cementu portlandzkiego CEM I.

5. Literatura

- [1] T. Baran: Cementy niskoemisyjne w składzie kompozytów cementowych. Monografia, Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice 2022.
- [2] PN-EN 206+A2:2021-08: Beton – Wymagania, właściwości, produkcja i zgodność.
- [3] M. Ostrowski: Rola popiołu lotnego i granulowanego żużla wielkopieczowego w kształtowaniu właściwości mieszanki betonowej i stwardniałego betonu o niskiej zawartości klinkieru portlandzkiego. Rozprawa doktorska, Politechnika Śląska 2017 rok.
- [4] M. Batog, A. Gołda, Z. Giergiczny: Popiół lotny składnikiem betonu masywnego na fundamenty nowych bloków energetycznych. XXIII Międzynarodowa Konferencja Popioły z Energetyki, s. 127-144, Zakopane 2016.

- [5] Z. Giergiczny, J. Małolepszy, J. Szwabowski, J. Śliwiński: Cementy z dodatkami mineralnymi w technologii betonów nowej generacji. Wydawnictwo Górażdże Cement HeidelbergCementGroup, Opole 2002.
- [6] A. Gołda: Beton w konstrukcjach masywnych na przykładzie budowy bloków nr 5 i 6 w Elektrowni Opole. XVI Konferencja Naukowo-techniczna, Reologia w technologii betonu, s. 155, Bełchatów 2018.
- [7] M.A. Sanjuan, C. Andrade, P. Mora, A. Zaragoza: Carbon dioxide uptake by cement-based materials: A Spanish case study. Applied Sciences, 2020, 10, 339, www.mdpi.com/jurnal/applsi.
- [8] M.A. Sanjuan, C. Andrade, P. Mora, A. Zaragoza: Carbon dioxide uptake by mortars and concrete made with Portuguese cements. Applied Sciences, 2020, 10, 646, www.mdpi.com/jurnal/applsi.

mgr inż. Anna Szwed
Solbet Kolbuszowa S.A.
dr hab. inż., prof. AGH Waldemar Pichór
Akademia Górniczo-Hutnicza

„Optymalizacja cyklu obróbki termicznej betonu w kontekście zrównoważonej produkcji prefabrykatów betonowych”

"Optimizing the thermal treatment cycle of concrete in the context of sustainable precast element manufacturing"

Streszczenie

Stając naprzeciw wyzwaniom związanym z polityką klimatyczną, podjęto próbę zoptymalizowania cyklu obróbki termicznej betonu, co może znacząco wpłynąć na zmniejszenie jego wpływu na środowisko. Celem przeprowadzonych badań było dostosowanie procesu produkcji prefabrykatów betonowych do bardziej zrównoważonych.

Prace badawcze zostały podzielone na dwa etapy, z których pierwszy dotyczył eksperymentalnych cykli naparzania zapraw normowych w temperaturach 50°C i 70°C. Zmiana schematu każdego kolejnego cyklu polegała na systematycznym wydłużaniu czasu wstępnego dojrzewania, od 0 do 120 minut, przy zachowaniu stałego czasu izotermicznego nagrzewu. W dalszej części eksperymentu, po utrzymaniu dwugodzinnego wstępnego dojrzewania w temperaturze 20°C, koncentrowano się na wydłużeniu czasu trzeciej fazy procesu. Tego typu modyfikacje miały na celu wyznaczenie cyklu najbardziej efektywnego, w którym 28-dniowa wytrzymałość na ściskanie zapraw poddanych obróbce termicznej była zbliżona do wytrzymałości zaprawy referencyjnej, przy jednoczesnym ograniczeniu zużycia energii.

W drugiej części pracy przeprowadzono obróbkę termiczną betonu w najbardziej efektywnych cyklach, które zostały wyznaczone w pierwszym etapie. Następnie dokonano porównania zmiany wybranych właściwości fizycznych betonu naparzanego z betonem referencyjnym.

Abstract

Facing to the challenges posed by climate policy, an attempt was made to optimize the thermal treatment cycle of concrete, which could significantly reduce its environmental impact. The aim of the conducted research was to adapt the production process of concrete prefabricates to develop more sustainable methods.

The research work was divided into two stages. The first stage involved experimental curing cycles of standard mortars at temperatures of 50°C and 70°C. The modification of each subsequent cycle involved systematically extending the initial curing time from 0 to 120 minutes while maintaining a constant isothermal heating time. In the next part of the experiment, after maintaining a two-hour initial curing at 20°C, the focus was on extending the third phase of the process. These modifications aimed to identify the most efficient cycle, in which the 28-day compressive strength of the thermally treated mortars was closest to the compressive strength of the reference mortar, while simultaneously reducing energy consumption.

In the second part of the study, thermal treatment of concrete was carried out using the most efficient cycles identified in the first stage. A comparison was then made of the changes in selected physical properties of the thermally treated concrete with those of the reference concrete.

1. Wstęp

Jednym z największych wyzwań dzisiejszego pokolenia jest globalne ocieplenie klimatu powodowane głównie z emisji gazów cieplarnianych do atmosfery. Cały przemysł budowlany odpowiada za 42% światowej emisji CO_{2eq}. Z czego 27,3% pochodzi działalności budowlanej, a najczęściej wykorzystywane materiały budowlane emitują dodatkowe 15% [1]. W związku z tym, poszukiwanie skutecznych metod redukcji zużycia energii i emisji CO₂ w tym sektorze jest istotne dla osiągnięcia celów dekarbonizacji. Inicjatywa wprowadzona przez Unię Europejską zakłada, że do końca 2030 roku zostanie zredukowana emisja CO₂ o 55% w stosunku do wartości emisji gazów cieplarnianych w roku 1990. Celem programu „Fit for 55” jest doprowadzenie do neutralności klimatycznej krajów Unii Europejskiej do 2050 roku.

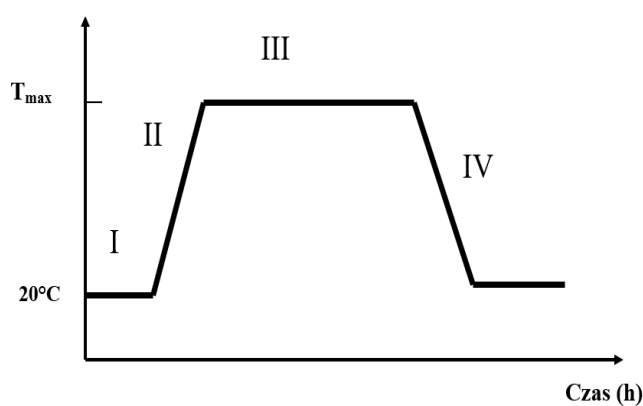
Prefabrykacja jest gałęzią budownictwa, która wykazuje obiecujące wyniki w ograniczeniu emisji i poprawie efektywności energetycznej. Oferuje korzyści w zakresie kontroli jakości, wydajności produkcji, krótsze czasy operacyjne, mniejsze zapotrzebowanie na pracę oraz mniejszą ilość odpadów w porównaniu z tradycyjnymi metodami budowy. Jedną z głównych zalet prefabrykacji jest stosunkowo szybki czas produkcji, dlatego w zakładach stosuje się różne metody, aby jak najszybciej osiągnąć wymaganą wytrzymałość prefabrykatów. Do takich metod zaliczają się: stosowanie cementów wysokich klas o odpowiednim składzie fazowym i wysokiej powierzchni właściwej, domieszki chemiczne i dodatki mineralne, optymalizacja składu receptur oraz podniesienie temperatury pielęgnacji. Z punktu widzenia przyspieszenia dojrzewania betonu duże znaczenie mają również różne rodzaje obróbki termicznej. Zabiegi te pozwalają przyspieszyć hydratację cementu, co skutkuje szybszym przyrostem wytrzymałości i skróceniem czasu potrzebnego do rozformowania elementu. Wybór odpowiedniego rodzaju obróbki cieplnej zależy od wymagań technologicznych, rodzaju prefabrykatów oraz dostępnych urządzeń w zakładzie produkcyjnym. W celu przyspieszenia dojrzewania betonu wdraża się różne procedury termicznego podgrzewania, w tym między innymi:

- Naparzenie pod ciśnieniem atmosferycznym. Polega ona na przeprowadzaniu pielęgnacji w warunkach kontrolowanej temperatury oraz odpowiedniego poziomu wilgotności [2]. Medium grzewczym jest nasycona para wodna o temperaturze 100°C.
- Autoklawizacja, to sposób obróbki materiałów za pomocą gorącej pary wodnej (około 200°C) i podniesionym ciśnieniu. Proces odbywa się w szczelnie zamkniętych urządzeniach zwanych autoklawami.
- Elektronagrzew. Metoda polegająca na przyłożeniu napięcia do pręta zbrojeniowego lub elektrody osadzonej wewnątrz betonu. Źródłem ciepła jest energia elektryczna, która przekształca się w ciepło w wyniku oporu elektrycznego elementów grzejnych.
- Promienie podczerwone. Metoda polega na zewnętrznym ogrzewaniu powierzchni betonu promieniowaniem podczerwonym..

- **Gorące formowanie.** Polega na podniesieniu temperatury świeżego betonu do temperatury powyżej 32°C poprzez wykorzystanie wstępnie podgrzanych surowców produkcyjnych lub wtrysk gorącej pary bezpośrednio do betoniarki [2,3]. W tej metodzie istotne jest izolowanie betonu przed stratami „ciepła technologicznego”[4].

Ze względu na prostotę i łatwość kontroli procesu najbardziej rozpowszechnioną w prefabrykacji metodą przyspieszenia dojrzewania betonu jest obróbka termiczna parą wodną pod ciśnieniem atmosferycznym. Zapewnia ona warunki do kontrolowanego wzrostu temperatury betonu oraz utrzymania stałej wilgotności otoczenia.

Typowy cykl naparzania niskoprężnego składa się z czterech etapów.



Rys.1. Schemat cyklu obróbki cieplnej [2]

I. *Faza opóźnienia.* Jest to czas mierzony od wykończenia powierzchni betonu do czasu kontrolowanego wzrostu temperatury. Ponieważ beton jest kompozytem złożonym z kilku materiałów posiadających różne współczynniki rozszerzalności cieplnej rozpoczęcie nagrzewania zbyt wcześnie może doprowadzić do gradientów temperatury i wilgotności w betonie. Celem tego etapu jest uzyskanie takiego poziomu wytrzymałości na rozciąganie matrycy cementowej aby mogła się przeciwstawić naprężeniom powstającym w porach betonu podczas wzrostu temperatury. Czas trwania tej fazy uzależniony jest od rodzaju cementu, jego czasu wiązania oraz szybkości i ilości wydzielanego ciepła. Wielu badaczy zauważyło, że wydłużenie okresu przed nagrzewaniem prowadzi do uzyskania wyższych wytrzymałości oraz lepszych parametrów trwałościowych. Na podstawie badań wyciągnięto wniosek, że długość okresu opóźnienia powinien być zbliżony do początku czasu wiązania. Często stosowana praktyka skracania czasu wstępnej pielęgnacji prowadzi do powstania bardziej porowatej i zdefektowanej mikrostruktury.

II. *Faza wzrostu temperatury.* Jest to czas potrzebny do podgrzania układu do temperatury docelowej. Tempo wzrostu temperatury zwykle mieści się w przedziale 11–44°C/h. Zależy głównie od konsystencji mieszanki betonowej, modułu powierzchniowego elementu, rodzaju cyklu oraz czasu wstępnego dojrzewania. W licznych badaniach wykazano, że wolniejszy wzrost temperatury pozwala na równomierne rozprowadzenie ciepła i zminimalizowanie uszkodzeń termicznych.

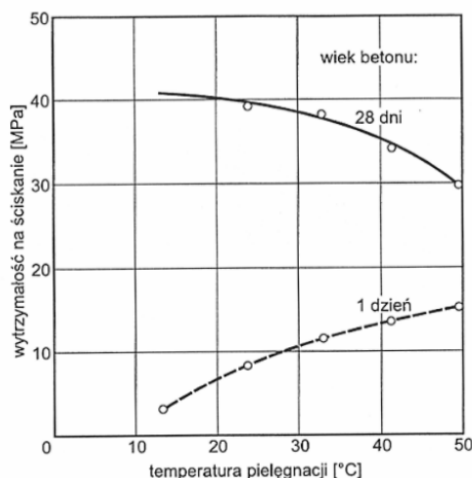
III. *Izotermiczny nagrzew.* Jest to etap pielęgnacji betonu z użyciem pary wodnej przy ustalonej maksymalnej temperaturze. Maksymalna temperatura naparzania mieści się zazwyczaj w przedziale 40°C–100°C. Zarówno temperatura jak i czas trwania tej fazy są zróżnicowane i zależą głównie od oczekiwanej wytrzymałości na ściskanie oraz wymaganych właściwości trwałościowych. Na podstawie badań [6,7] jako optymalny zakres temperaturowy wskazano 50–80°C. Wzrost temperatury naparzania przyspiesza reakcję cementu z wodą oraz intensyfikuje tworzenie się produktów hydratacji, co przekłada się na szybszy przyrost wczesnej wytrzymałości betonu, ale może jednocześnie prowadzić do obniżenia wytrzymałości w późniejszym okresie [5].

IV. *Okres spadku temperatury.* Jest to końcowa faza obróbki termicznej. Tak jak podczas procesu podgrzewania, zaleca się stopniowe i umiarkowane chłodzenie elementów, ponieważ zbyt szybki spadek temperatury może prowadzić do znacznych różnic temperaturowych między wnętrzem a powierzchnią próbki oraz przyspieszonej utraty wilgoci. W efekcie może dochodzić do powstawania spękań w warstwie powierzchniowej, zwłaszcza w przypadku elementów o dużych gabarytach [2]. Zjawisko to sprzyja zwiększeniu współczynnika adsorpcji. Rozformowanie elementu powinno nastąpić po ustaleniu gradientu temperatury, pomiędzy powierzchnią betonu a otoczeniem, nie większym niż 30-40°C [2].

Nie istnieje uniwersalny schemat obróbki termicznej, który byłby odpowiedni dla każdego rodzaju elementów prefabrykowanych. Dobór właściwego cyklu zależy od wielu zmiennych. Warunki, które wspierają szybkie osiągnięcie wysokiej wytrzymałości na wczesnym etapie, często okazują się niekorzystne dla trwałości i parametrów mechanicznych w późniejszym okresie dojrzewania betonu.

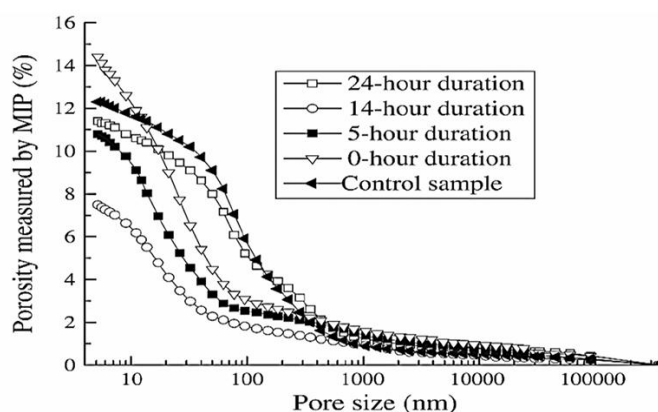
W przemyśle metody przyspieszania dojrzewania poprzez podgrzewanie klasyfikuje się zazwyczaj na podstawie czasu trwania oraz temperatury. Wyróżnia się tu trzy kategorie: krótkie (do 6 godzin), średnie (od 6 do 12 godzin) oraz długie (ponad 12 godzin).

Podniesienie temperatury w początkowej fazie dojrzewania betonu przyczynia się do szybszego wzrostu jego wytrzymałości, co jest rezultatem przyspieszonej reakcji fizyko-chemicznej podczas wiązania zaczynu [2,5,9]. Skutkiem tego zjawiska jest pożądany, znaczny przyrost wczesnej wytrzymałości na ściskanie, nawet do 70% wytrzymałości projektowanej, po 24 godzinach. Podwyższona temperatura sprzyja szybkiemu formowaniu się mikrostruktury młodego betonu. Związki powstające w wyniku hydratacji wytrącają się intensywnie, lecz nierównomiernie, prowadzi to do powstawania znacznej ilości porów w ich strukturze. Pory stanowią miejsca, w których mogą rozpoczynać się procesy prowadzące do powstania pęknięć, dlatego też w efekcie oddziaływania podwyższonej temperatury we wczesnej fazie dojrzewania, beton osiąga w dłuższym okresie niższą wytrzymałość niż beton, który pielęgnowany był w standardowych warunkach otoczenia.



Rys. 2. Wpływ temperatury pielęgnacji na wytrzymałość betonu [3]

Wykorzystanie pary wodnej jako źródła ciepła sprzyja wzrostowi całkowitej porowatości betonu oraz zwiększeniu udziału porów niekorzystnych co ma negatywny wpływ dla jego trwałości. Dynamiczny transport produktów hydratacji, w połączeniu z ciśnieniem kapilarnym wywołanym przemieszczaniem się pary, skutkuje tworzeniem się porów o rozmiarach większych niż 100nm. Na rys.3 przedstawiono wpływ czasu naparzania na rozkład wielkości porów. Okazuje się, że wydłużenie czasu naparzania z 5 do 14 godzin powoduje zmniejszenie ilości powstawania porów o większej średnicy, z drugiej strony dalsze przedłużenie działania pary wodnej w czasie do 24 godzin sprzyja zwiększeniu udziału porów o większych rozmiarach w strukturze betonu [7].

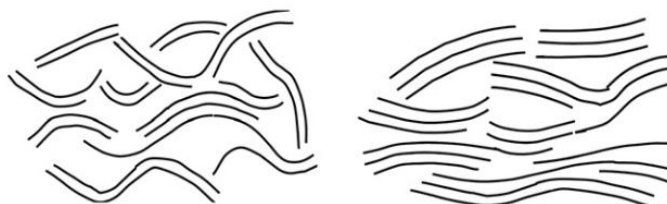


Rys. 3. Charakterystyka porów mierzona za pomocą MIP [7]

Podczas naparzania, powierzchnia betonu zostaje dodatkowo nawilżona, a różnice temperatur powodują dyfuzję wody z cieplejszych stref do chłodniejszych. Proces ten sprzyja przemieszczaniu się wilgoci w głąb betonu oraz jej przejściu w fazę gazową. Tworząca się wewnątrz betonu para wodna, charakteryzująca się znacznie większą objętością niż ciecz, generuje wzrost naprężeń rozciągających w porach kapilarnych, co prowadzi do zapoczątkowania mikropęknięć w matrycy cementowej [8]. Zapobiegać temu zjawisku można poprzez wydłużeniu czasu wstępnego dojrzewania.

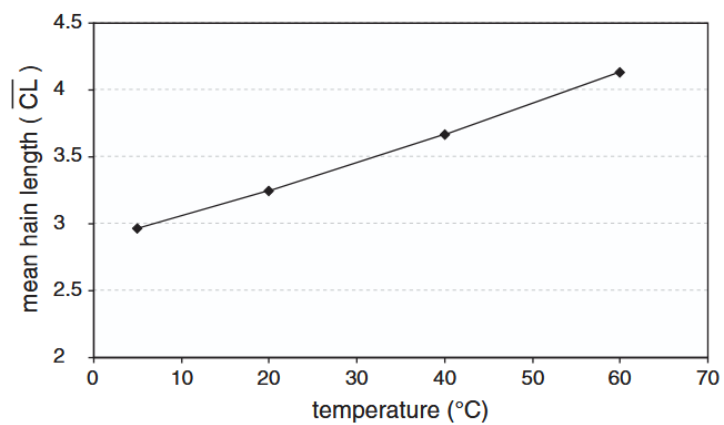
Zmianom ulega również strefa przejściowa na granicy faz kruszywo-zaczyn. W warunkach standardowej pielęgnacji mikrostruktura zaczynu cementowego w strefie przylegającej do kruszywa grubego różni się od tej w pozostałych partiach betonu. W tym obszarze stosunek wody do cementu (w/c) jest znacznie wyższy, co skutkuje mniejszym zagęszczeniem ziaren cementu. Zjawisko to jest zbliżone do tzw. efektu ściany, obecność kruszywa ogranicza koncentrację cementu oraz zdolność do wypełnienia pierwotnych porów produktami hydratacji [3,10]. W warunkach naturalnego dojrzewania ma ona grubość $50\mu\text{m}$. Podwyższenie temperatury podczas dojrzewania betonu przyczynia się do intensyfikacji wydzielania produktów hydratacji oraz szybszego rozwoju mikrostruktury również w tym obszarze. Przyspieszona hydratacja prowadzi do nierównomiernego rozmieszczenia produktów reakcji, co skutkuje lokalnym zagęszczeniem mikrostruktury w strefie kontaktowej (ITZ). Jednocześnie zwiększona zawartość wody w tym obszarze sprzyja powstawaniu wyższej porowatości oraz mikropęknięć, które osłabiają właściwości mechaniczne tej strefy. Obróbka termiczna parą wodną ma również wpływ na rozmiar strefy przejściowej – wraz ze wzrostem temperatury dochodzi do jej poszerzenia, które może osiągać nawet $120\mu\text{m}$ [11]. Strefa ta, będąca najsłabszym punktem matrycy betonu, w dużej mierze decyduje o jego końcowej wytrzymałości na ściskanie.

C-S-H (uwodniony krzemian wapnia) stanowi podstawowy produkt reakcji hydratacji cementu i w znacznym stopniu odpowiada za rozwój wytrzymałości betonu. Podczas dojrzewania w warunkach standardowych jego struktura przypomina zbiór upakowanych krótkich, cienkich włókien. Jednak w podwyższonej temperaturze morfologia C-S-H ulega istotnej zmianie, przyjmując formę przypominającą plaster miodu. Badania nad strukturą atomową tego żelu, przeprowadzone przez Galluciego [5], wykazały jego dużą wrażliwość na zmiany temperatury. Wraz ze wzrostem temperatury pielęgnacji zwiększa się jego gęstość pozorna, co oznacza, że zajmuje on mniejszą objętość w matrycy cementowej. W rezultacie prowadzi to do zwiększenia porowatości kapilarnej.

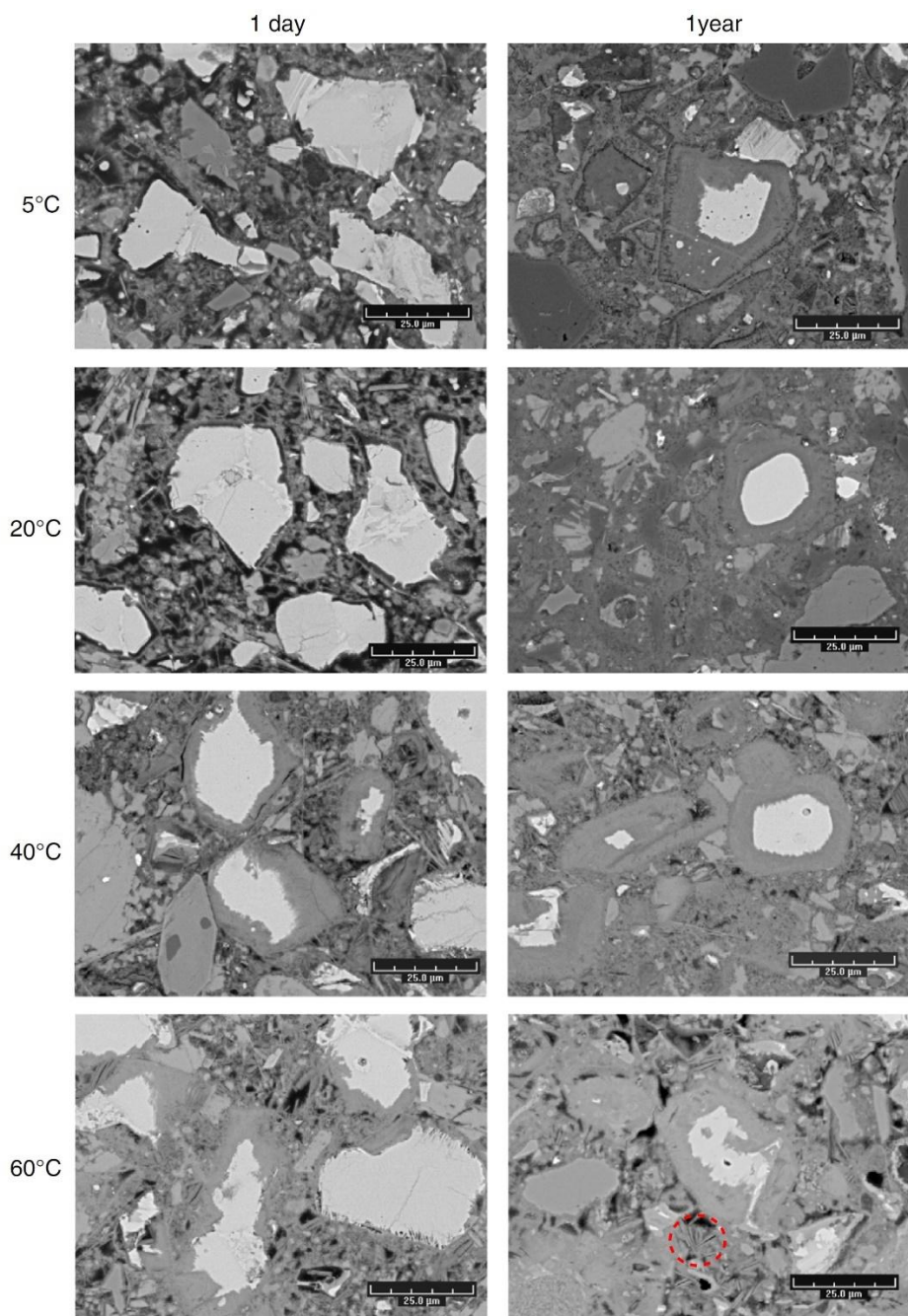


Rys. 4. Schemat przedstawiający C-S-H powstałe w niskiej temperaturze (z lewej) i w wyższej temperaturze (z prawej) [5]

Galluci zaobserwował również, że wyższa temperatura przyczynia się do wzrostu poziomu polimeryzacji struktur C-S-H co skutkuje wyższą wytrzymałością wczesną [5,6].



Rys. 5. Zmiana długości łańcucha C-S-H w funkcji temperatury



Rys. 6. Rozwój mikrostruktury pomiędzy 1 dniem i 1 rokiem w różnych warunkach temperatury 5, 20, 40 i 60°C [5]

W warunkach hydratacji cementu w temperaturze pokojowej, w ciągu pierwszych godzin od kontaktu z wodą, następuje formowanie się fazy AFt. Jej szybkie zarodkowanie oraz wzrost kryształów odgrywają kluczową rolę w zakończeniu reakcji pomiędzy C_3A (glinianem trójwapniowym) a gipsem.

W zaprawach naparzanych w temperaturze 85°C zaobserwowano rozkład etringittu powstałego we wcześniejszym etapie hydratacji. AFt rozpada się na produkty wtórne, takie jak AFm, jony siarczanowe SO_4^{2-} , wapniowe Ca^{2+} oraz $[Al(OH)_4]^-$. Analizy w skali mikro ujawniają, że w zaprawach poddanych działaniu wysokiej temperatury, zewnętrzna warstwa żelu C-S-H tworzy strukturę nanometrycznej mieszaniny

zawierającej fazę monosiarczanową [12]. Obecność AFm (zaznaczony czerwony okrąg na rys. 6) utworzonego w wyniku tej przemiany może prowadzić do powstania tzw. opóźnionego etringittu (DEF – Delayed Ettringite Formation) [7,13,14]. W konsekwencji tego zjawiska następuje jego ekspansja oraz powstawanie licznych mikropęknięć w strukturze betonu. Mikropęknięcia te są wynikiem niskiej wytrzymałości na rozciąganie matrycy cementowej i znacząco wpływają na trwałość elementów betonowych poddanych wysokiej temperaturze podczas dojrzewania.

W warunkach podwyższonej temperatury, przekraczającej 40°C, zachodzi również przemiana nietrwałych hydroglinianów o strukturze heksagonalnej w bardziej stabilną, w krystalizującą układzie regularnym fazę C₃AH₆. Transformacja jej prowadzi do wzrostu porowatości oraz zwiększenia przepuszczalności betonu, co ma bezpośredni wpływ na obniżenie jego trwałości [15].

Cały zespół odkształceń powodowanych gradientem temperatury nazywa się uszkodzeniami termicznymi. Można im zapobiegać lub minimalizować nie tylko poprzez kształtowanie procesu obróbki termicznej ale również wykorzystując dodatki mineralne. W podwyższonej temperaturze czas wiązania cementu ulega znacznemu skróceniu. Na powierzchni ziaren cementu reagującego z wodą szybko osadzają się znaczne ilości produktów hydratacji, co ogranicza przenikanie wody do głębszych warstw materiału i utrudnia dalszy jej przebieg. Dodatki pucolanowe takie jak popiół lotny, granulowany żużel wielkopiecowy czy pył krzemionkowy opóźniają wiązanie cementu w wyniku obniżenia jego ciepła hydratacji [13]. Utrzymywanie odpowiedniej wilgotności w podwyższonej temperaturze sprzyja przyspieszeniu powolnej reakcji pucolanowej z Ca(OH)₂ tworząc dodatkowa ilość żelu C-S-H. Przekłada się to na doszczelnienie mikrostruktury i znaczny wzrost wytrzymałości w początkowym etapie dojrzewania materiału [2].

W niniejszym artykule skupimy się na możliwościach optymalizacji procesu pielęgnacji parą w taki sposób aby obniżyć zapotrzebowanie na energię potrzebną do uzyskania odpowiedniej wczesnej wytrzymałości betonu, jednocześnie zachowując jak najlepsze parametry w dłuższym okresie. W praktyce oznacza to, że poprzez odpowiednie dostosowanie procesu obróbki cieplnej można osiągnąć wysoką wytrzymałość w krótkim czasie, co pozwala na maksymalne skrócenie cyklu produkcyjnego i zmniejszenie zużycia energii.

Celem referatu było zbadanie wpływu wybranych parametrów cieplnych (m.in. czasu rozpoczęcia nagrzewania i temperatury izotermicznego nagrzewania) na wczesne przyrosty wytrzymałości kompozytów cementowych, przy zachowaniu kontroli nad innymi zmiennymi. Wykorzystanie w badaniach zapraw normowych pozwala na łatwiejsze wyodrębnienie działania poszczególnych czynników bez wpływów wynikających z różnic geometrii czy zastosowanych technologii.

2. Program i metody badań

2.1. Etap I

Pierwszy etap badań dotyczy eksperymentalnych cykli naparzania zapraw normowych w temperaturach 50°C i 70°C. Zmiana schematu każdego kolejnego cyklu

polegała na systematycznym wydłużaniu czasu wstępnego dojrzewania, od 0 do 120 minut, przy zachowaniu stałego czasu izotermicznego nagrzewu. W dalszej części eksperymentu, po utrzymaniu dwugodzinnego wstępnego dojrzewania w temperaturze 20°C, skupiono się na wydłużeniu czasu trzeciej fazy procesu. Tempo wzrostu temperatury II fazy ustalono na stałe i wynosiło 25°C/h. Tego typu modyfikacje miały na celu wyznaczenie cyklu najbardziej efektywnego, w którym 28-dniowa wytrzymałość na ściskanie zapraw poddanych obróbce termicznej była zbliżona do wytrzymałości zaprawy referencyjnej (nazywana dalej wydajnością procesu), przy jednoczesnym ograniczeniu zużycia energii. Parametr służący jako miara zużycia energii dla poszczególnych cykli obróbki cieplnej jest indeks energetyczny. Został określony jako iloczyn czasu trwania danego cyklu naparzenia oraz różnicy temperatury względem temperatury otoczenia, przyjętej jako 20°C. W tabeli 1 przedstawiono eksperymentalne cykle naparzenia.

Tab. 1. Schematy cykli naparzenia

Numer cyklu	Czas wstępnego dojrzewania [h]	Temperatura izotermicznego nagrzewu [°C]	Czas izotermicznego nagrzewu [h]	Indeks energetyczny ·10 ⁴ [min·°C]
1	0	70	4	1,50
2	0,25	70	4	1,50
3	0,5	70	4	1,50
4	0,45	70	4	1,50
5	1	70	4	1,50
6	1,25	70	4	1,50
7	1,5	70	4	1,50
8	1,75	70	4	1,50
9	2	70	4	1,50
10	2	70	4,25	1,58
11	2	70	4,5	1,65
12	2	70	4,75	1,73
13	2	70	5	1,80
14	2	70	5,25	1,88
15	2	70	5,5	1,95
16	2	70	5,75	2,07
17	2	70	6	2,10
18	0	50	6	1,19
19	0,25	50	6	1,19
20	0,5	50	6	1,19
21	0,75	50	6	1,19
22	1	50	6	1,19
23	1,25	50	6	1,19
24	1,5	50	6	1,19
25	1,75	50	6	1,19
26	2	50	6	1,19
27	2	50	6,25	1,24
28	2	50	6,5	1,28
29	2	50	6,75	1,33
30	2	50	7	1,37
31	2	50	7,25	1,42
32	2	50	7,5	1,46
33	2	50	7,75	1,51
34	2	50	8	1,55

Numer cyklu	Czas wstępnego dojrzewania [h]	Temperatura izotermicznego nagrzewu [°C]	Czas izotermicznego nagrzewu [h]	Indeks energetyczny ·10 ⁴ [min·°C]
35	2	50	8,25	1,60
36	2	50	8,5	1,64
37	2	50	8,75	1,69
38	2	50	9	1,73

Do realizacji cykli naparzania wykorzystano specjalnie zaprojektowane i wykonane na terenie zakładu prefabrykacji urządzenie. Składa się ono z zaizolowanej komory, do której para wodna doprowadzana jest z zewnętrznego źródła za pomocą przewodu gumowego. Temperatura wewnątrz komory mierzona jest za pomocą termopary umieszczonej w jej górnej części. Rejestracja temperatury, wyrażonej w stopniach Celsjusza, odbywała się za pomocą elektronicznego rejestratora. Czas trwania poszczególnych faz cyklu naparzania ustalano przy użyciu oprogramowania F&F PCZ Konfigurator.

2.2. Etap II

W drugiej części pracy przeprowadzono obróbkę termiczną betonu w najbardziej efektywnych cyklach, które zostały wyznaczone w pierwszym etapie. Następnie dokonano porównania zmiany wytrzymałości, głębokości penetracji oraz współczynnika migracji chlorków betonu naparzanego z betonem referencyjnym.

3. Materiały

Do badań wykorzystano cement portlandzki z dodatkami CEM II/A-M(S-LL) 52,5R zgodny z normą PN-EN 197-1 [17]. Podstawowe właściwości przedstawiono w tabeli 2.

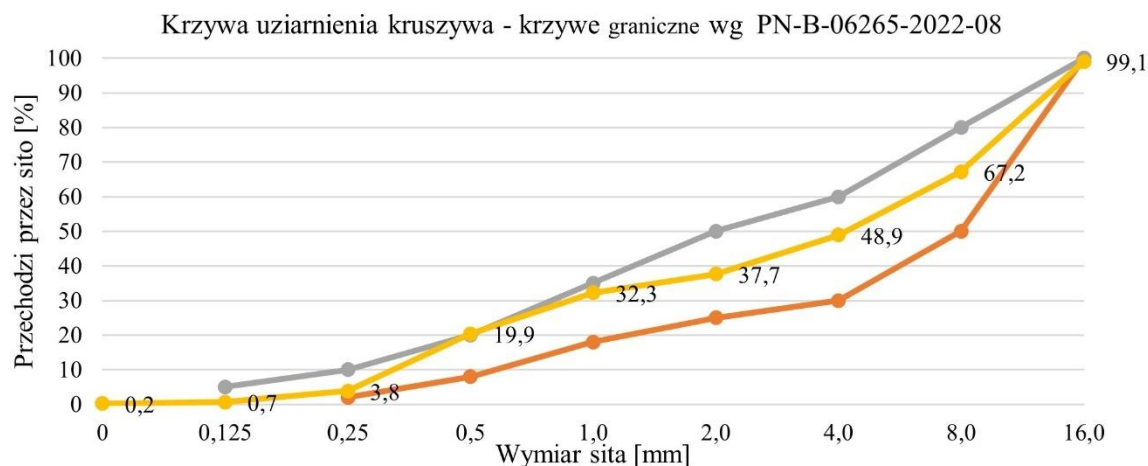
Tab. 2. Właściwości cementu

Parametr		
Wytrzymałość na ściskanie [MPa]	24 h	21,1
	7 dni	47,7
	28 dni	55,8
	90 dni	66,9
Początek czasu wiązania [min]		195
Koniec czasu wiązania [min]		210
Powierzchnia właściwa wg Blaine'a* [cm ² /g]		5314
*w/g producenta		

W pierwszym etapie dla każdego z cykli przygotowano zaprawy według wytycznych normy PN-EN 196-1[18]. Następnie zaformowano cztery serie próbek w formie beleczek o wymiarach 40×40×160 mm, przeznaczonych do badań wytrzymałości na ściskanie po 24 godzinach, 7, 28 oraz 90 dniach. Uformowane próbki

umieszczono w komorze naparzania, gdzie poddano je wcześniej ustalonym cyklom. Następnie beleczki wyjmowano z komory na 20 minut przed upływem 24 godzin od momentu formowania. Na jednym z zestawów wykonano pomiar wytrzymałości na ściskanie po 24 godzinach, natomiast pozostałe próbki przeniesiono na ruszty zanurzone w pojemniku z wodą, gdzie były przechowywane do czasu przeprowadzenia kolejnych badań.

W drugim etapie badań zaprojektowano i przygotowano mieszankę betonową [19], którą następnie poddano wybranym cyklom naparzania. Do jej wykonania zastosowano kruszywa [20] w postaci naturalnego piasku płukanego o uziarnieniu 0–2 mm, pochodzący z lokalnej kopalni. Kruszywo grube stanowiła mieszanina grys dolomitowego o frakcjach 2 – 8 mm oraz 8 – 16 mm, aktualnie wykorzystywana w produkcji elementów prefabrykowanych. Gęstość objętościowa zastosowanego kruszywa wynosiła odpowiednio 2,65 Mg/m³ dla kruszywa drobnego i 2,78 Mg/m³ dla grubego. Na rysunku 7 przedstawiono krzywą uziarnienia całkowitej mieszanki kruszywa zastosowanej w betonie referencyjnym.



Rys. 7. Krzywa uziarnienia mieszaniny kruszywa drobnego i grubego dla mieszanki referencyjnej [21]

Do sporządzenia mieszanki betonowej wykorzystano superplastyfikator o właściwościach upłynniających i znacząco ograniczających zapotrzebowanie na wodę zarobową, a także domieszkę napowietrzającą na bazie anionowych surfaktantów. Obie domieszki spełniają wymagania normy PN-EN 934-2 [22]. W tabeli nr 3 przedstawiono skład receptury betonu referencyjnego.

Tab. 3. Skład betonu referencyjnego

Składnik	[kg]
CEM II/A-M (S-LL) 52,5R	395
Piasek 0-2 mm	681
Grys 2-8 mm	496
Grys 8-16 mm	640
woda	156
Supelplastyfikator 0,65%mc	2,57
Napowietrzacz 0,17%mc	0,67

Proces przygotowania mieszanki betonowej prowadzono w mieszalniku laboratoryjnym, z zachowaniem ścisłego dozowania wagowego wszystkich składników. Każdorazowo stosowano tę samą kolejność dozowania i mieszania, co gwarantowało powtarzalność i porównywalność uzyskiwanych rezultatów.

Z przygotowanych zarobów zaformowano szereg próbek przeznaczonych do badań. Następnie poddano je odpowiednio dobranemu cyklowi obróbki cieplnej. Po upływie 24 godzin dla części próbek wykonano pomiar wytrzymałości na ściskanie. Pozostałe przeniesiono do komory klimatycznej o wilgotności względnej przekraczającej 95% i utrzymywano w temperaturze $20^{\circ}\text{C}\pm 2$, aż do momentu przeprowadzenia kolejnych badań. Następnie przeprowadzono zaplanowane badania, obejmujące wytrzymałość na ściskanie, przepuszczalność wody przez beton, wyznaczenie współczynnika migracji jonów chlorkowych oraz mrozoodporności F150, w celu porównania ich wyników z właściwościami betonu referencyjnego. W tabeli nr 4 przedstawiono właściwości referencyjnej świeżej mieszanki oraz betonu.

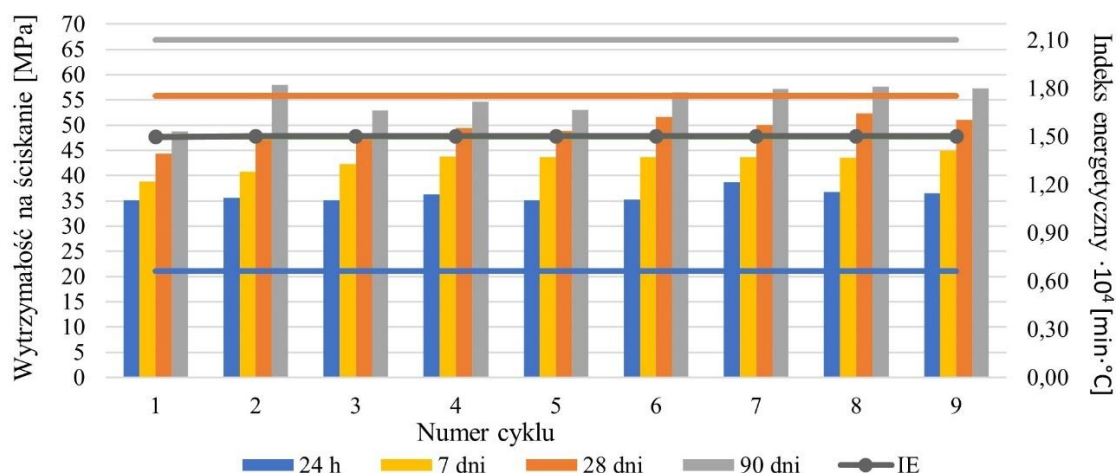
Tab.4. Właściwości referencyjnej mieszanki betonowej [23-26]

Świeża mieszanka	Beton		
Gęstość objętościowa [kg/m ³]	2373	Wytrzymałość na ściskanie	24h 26,3
Opad stożka [mm]	190		7 dni 45,5
Zawartość powietrza [%]	5,8		28 dni 54,8

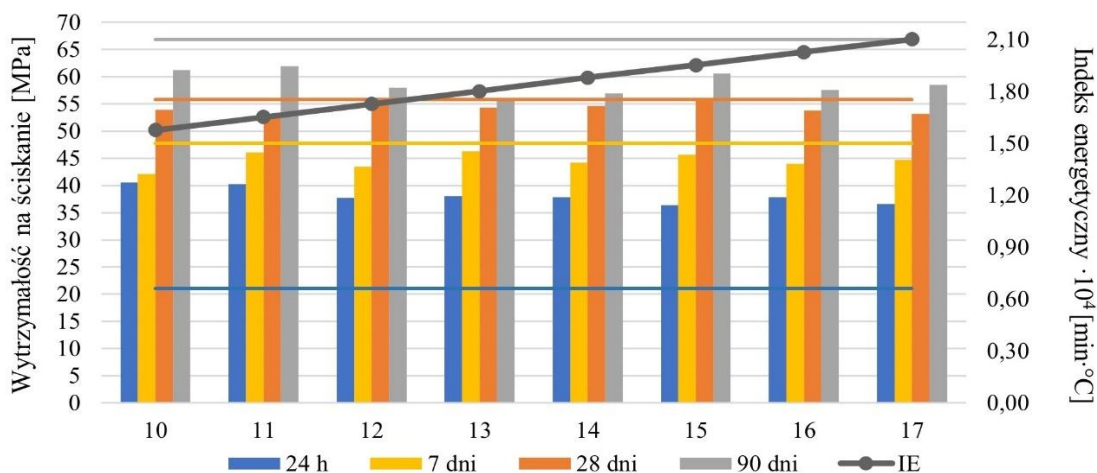
4. Wyniki i dyskusja

4.1. Etap I

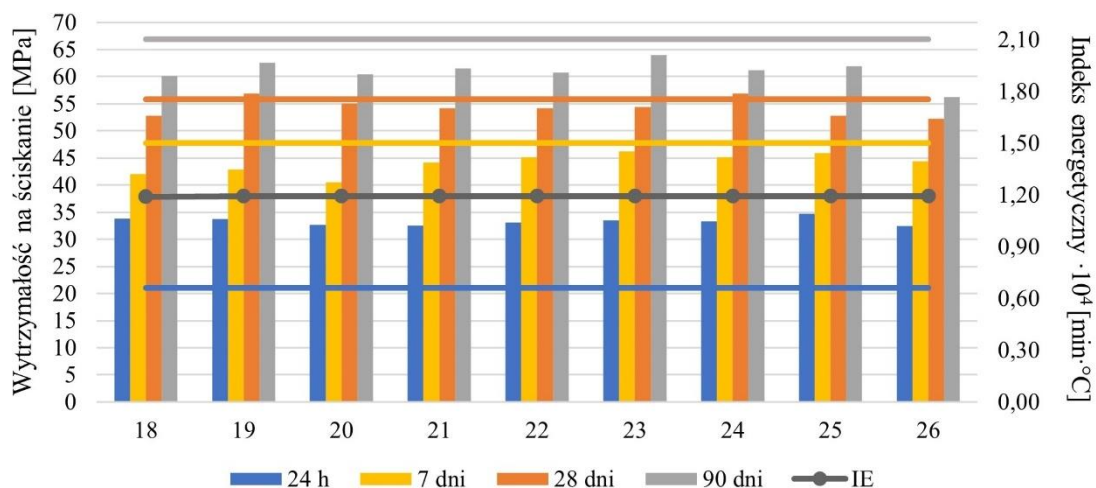
Badania wytrzymałości na ściskanie zapraw przeprowadzono na próbkach w formie beleczek o wymiarach 40×40×160 mm. Pomiar realizowano po każdym zakończonym cyklu naparzania w czterech terminach: po 24 godzinach od momentu zarobienia z wodą, a następnie po 7, 28 oraz 90 dniach dojrzewania. Wyniki przedstawiono na rysunkach 8-11.



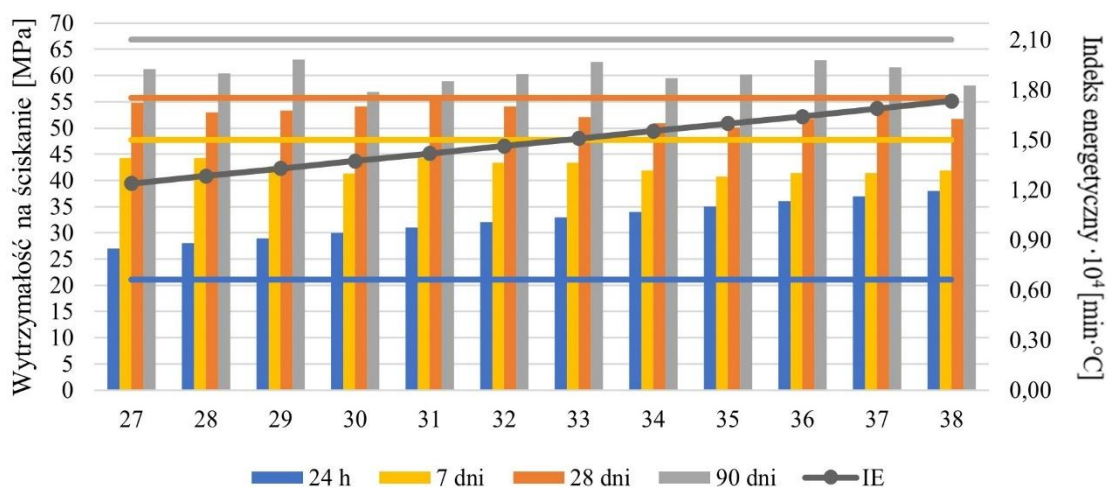
Rys. 8. Przyrost wytrzymałości w czasie dla cykli 1-9



Rys. 9. Przyrost wytrzymałości w czasie dla cykli 10-17



Rys. 10. Przyrost wytrzymałości w czasie dla cykli 18-26



Rys. 11. Przyrost wytrzymałości w czasie dla cykli 27-38

Kryterium doboru cykli naparzania przeznaczonych do drugiego etapu badań opierało się na wyborze takiego schematu obróbki cieplnej, który zapewniał, że wytrzymałość zaprawy normowej po 24 godzinach stanowiła co najmniej 50% wytrzymałości zaprawy referencyjnej po 28 dniach dojrzewania. Dodatkowo brano pod uwagę możliwość maksymalnego skrócenia czasu trwania cyklu, przy jednoczesnym utrzymaniu jego efektywności (wydajności) — określanej stosunkiem R_{ix}/R_{28} możliwie bliskim jedności — oraz przy jak najniższym wskaźniku energetycznym.

Wyniki badań wykazały, że wytrzymałość zapraw mierzona po 24 godzinach była zdecydowanie wyższa dla cykli z izotermiczną temperaturą nagrzewu wynoszącą 70°C, w porównaniu do tych prowadzonych przy 50°C. Jednak w miarę upływu czasu dojrzewania tendencja ta ulegała odwróceniu — w dłuższej perspektywie korzystniejsze okazywały się cykle o niższej temperaturze.

Istotnym czynnikiem wpływającym zarówno na wczesną, jak i późniejszą wytrzymałość okazało się również stopniowe wydłużenie fazy wstępnej pielęgnacji przed rozpoczęciem właściwego naparzania. Wydłużenie tego etapu sprzyjało stabilniejszemu rozwojowi mikrostruktury, co skutkowało wyższą wytrzymałością młodego betonu.

Zaobserwowane zmiany w rozwoju wytrzymałości były bezpośrednio związane ze wzrostem tempa hydratacji. Szybki przebieg reakcji hydratacyjnych powodował intensywne odkładanie się produktów hydratacji, co przekładało się na wysokie wartości wytrzymałości wczesnej. Z drugiej strony, tak dynamiczny i nierównomierny rozwój mikrostruktury prowadził do powstawania porów o większej średnicy, które negatywnie wpływały na gęstość i szczelność struktury zaczynu cementowego, osłabiając tym samym jego wytrzymałość w późniejszym okresie.

Na podstawie analizy wyników przeprowadzonych badań wybrano cykl nr 15 dla izotermicznego nagrzewu o temperaturze 70°C (Z70-15) o wskaźniku energetycznym $1,95 \cdot 10^4$ [min·°C] oraz cykl nr 19 (Z50-19) dla temperatury 50°C. Dodatkowo, do przeprowadzenia podstawowych badań, uwzględniono cykl nr 24 (Z50-24), w którym wydłużono pierwszą fazę w porównaniu do cyklu nr 19, przy jednoczesnym zachowaniu tej samej temperatury izotermicznego nagrzewu oraz identycznego wskaźnika energetycznego na poziomie $1,19 \cdot 10^4$ [min·°C].

Dla wybranych cykli naparzania zaobserwowano, że wytrzymałość zapraw po 24 godzinach osiągnęła znaczący udział w stosunku do wartości uzyskanej po 28 dniach. W przypadku cyklu nr 19 oraz cyklu nr 24 wytrzymałość 24-godzinna stanowiła 59% wytrzymałości 28-dniowej, natomiast dla cyklu nr 15 osiągnięto najwyższy wynik — 67% wartości referencyjnej po 28 dniach dojrzewania.

4.2. Etap II

4.2.1. Wytrzymałość na ściskanie

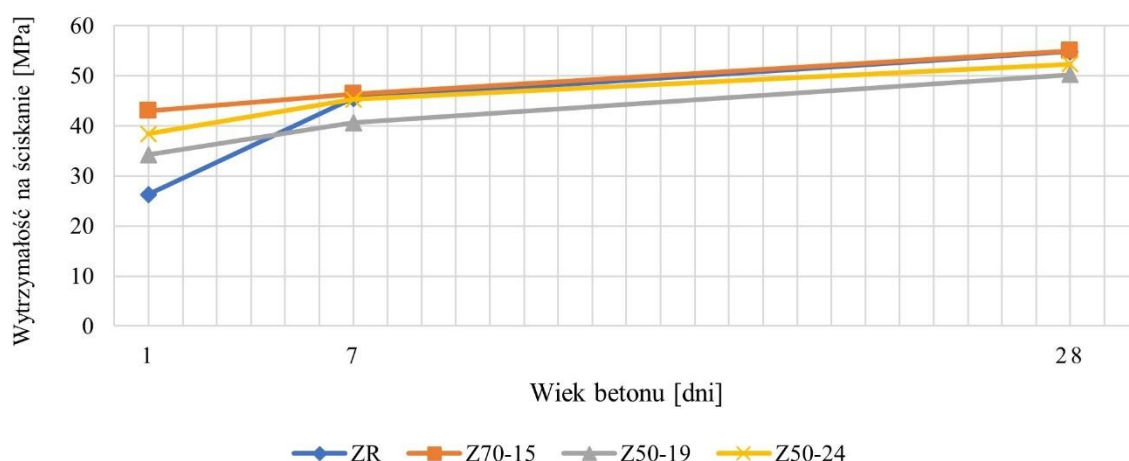
W laboratorium przygotowano cztery zestawy próbek sześciennych 100x100mm do badań wytrzymałości na ściskanie. Pierwszy zestaw pielęgnowano w standardowych warunkach laboratoryjnych, natomiast drugi, trzeci i czwarty zestaw poddano wstępnej pielęgnacji przez pierwsze 24 godziny w komorze naparzalniczej, zgodnie z wymaganiami cykli nr 15, 19 oraz 24. Po rozformowaniu próbek dokonano

pomiarów wytrzymałości na ściskanie zgodnie z normą PN-EN 12390-3:2019-07 [26]. Próbkę przeznaczoną do badań w dalszych terminach pielęgnowano w komorze klimatycznej o wilgotności powyżej 95% oraz temperaturze laboratoryjnej. Badania wytrzymałości wykonywano po upływie 24 godzin, 7 oraz 28 dni od daty wykonania próbek. Wyniki badania wytrzymałości na ściskanie betonów w funkcji czasu przedstawiono w tabeli nr 5 i rys. 12.

Tab.5. Wytrzymałość na ściskanie betonów w analizowanych cyklach obróbki termicznej

	Wiek betonu	ZR	Z70-15	Z50-19	Z50-26
Wytrzymałość na ściskanie [MPa]	24 h	26,3	44,0	34,2	38,4
	7 dni	45,5	46,4	40,6	45,3
	28 dni	54,8	55,0	50,2	51,3

Zmiany wytrzymałości betonów w czasie wykazują podobne tendencje jak w przypadku zapraw poddanych naparzeniu w analogicznych cyklach. Wraz ze wzrostem temperatury izotermicznego nagrzewu obserwuje się wyraźny wzrost wytrzymałości wczesnej betonu. Dla próbek pielęgnowanych zgodnie z cyklem Z70-15 uzyskano wyższą wytrzymałość po 24 godzinach w porównaniu do próbek betonów dojrzewających według cykli Z50-19 oraz Z50-24. W przypadku betonów naparzanych w temperaturze 50°C zauważono, że wydłużenie okresu opóźnienia przed rozpoczęciem fazy wzrostu temperatury, korzystnie wpływa na rozwój wytrzymałości w czasie. Beton poddany cyklowi Z50-24 osiągnął wyższe wartości wytrzymałości w wieku 1, 7 oraz 28 dni odpowiednio o 12%, 12% i 4% w porównaniu do betonu pielęgnowanego według cyklu Z50-19. Beton poddany obróbce cieplnej według cyklu Z50-19 wykazywał zauważalny spadek wytrzymałości we wszystkich analizowanych terminach dojrzewania.



Rys. 12. Zmiana wytrzymałości na ściskanie w funkcji czasu

4.2.2. Głębokość penetracji wody pod ciśnieniem

Pomiar głębokości penetracji wody pod ciśnieniem przeprowadzono po 28 dniach dojrzewania próbek. Zgodnie z normą PN-EN 12390-8:2019-08, metoda ta służy do oceny przepuszczalności wody przez beton. Procedura polega na oddziaływaniu na próbkę ciśnienia wody wynoszącego 0,5 MPa przez okres 72 godzin. Po zakończeniu ekspozycji beton rozłupuje się w celu zmierzenia głębokości, na jaką ciecz przeniknęła do wnętrza materiału. Otrzymana wartość stanowi wskaźnik zdolności betonu do przeciwdziałania przenikaniu wody pod ciśnieniem i jest istotnym parametrem oceny jego trwałości. Wynik pomiarów przedstawiono w tabeli nr 6.

Na podstawie analizy głębokości penetracji wody pod ciśnieniem można zauważyć, że beton referencyjny (ZR) charakteryzował się najniższą wartością GP (13 mm), co świadczy o jego wysokiej szczelności. W przypadku betonów poddanych obróbce cieplnej zaobserwowano nieco wyższe wartości: dla Z70-15 – 16 mm, Z50-24 – 16,1 mm, a najwyższą dla Z50-19 – 17,33 mm. Wzrost głębokości wnikania wody jest skutkiem działania wysokiej temperatury, która wpływa na rozwój mikrostruktury betonu, zwiększając udział porów kapilarnych.

Pomimo pewnego pogorszenia parametrów w porównaniu z betonem referencyjnym, wszystkie analizowane mieszanki spełniają wymagania normowe głębokości penetracji wody, także dla najbardziej rygorystycznych klas ekspozycji, takich jak XA3, XD3 czy XS4 [16]. Oznacza to, że przy właściwie dobranym cyklu naparzania możliwe jest uzyskanie betonu o dobrej trwałości, nawet w warunkach przyspieszonego dojrzewania.

4.2.3. Odporność na migrację jonów chlorkowych

W ramach oceny trwałości betonów przeprowadzono również test niestacjonarnej migracji jonów chlorkowych zgodnie z PN-EN 12390-18:2021 [28]. Do badań wykorzystano trzy zestawy składające się z trzech próbek sześciennych o boku 150x150x150mm: jeden dla betonu referencyjnego oraz dwa pozostałe odpowiadające betonom dojrzewającym zgodnie z cyklami obróbki termicznej Z70-15 i Z50-19. Badanie współczynnika migracji jonów chlorkowych przeprowadzono po zakończeniu 28-dniowego okresu dojrzewania próbek. Test prowadzono w stałych warunkach – przy napięciu 30 V i czasie trwania 24 godzin. Po zakończeniu próby wyznaczano średni współczynnik migracji chlorków, biorąc pod uwagę takie parametry jak: głębokość wnikania jonów, średnia temperatura obu roztworów testowych, wysokość próbki, napięcie oraz czas trwania badania. Uzyskane wyniki badania współczynnika migracji jonów chlorkowych zestawiono w tabeli nr 6.

Tab. 6. Zestawienie wyników głębokości penetracji i współczynnika migracji chlorków w betonach

	ZR	Z70-15	Z50-19	Z50-24
Głębokość penetracji GP [mm]	13,7	16,0	17,33	16,1
Współczynnik migracji chlorków D [mm ² /s]	$3,94 \cdot 10^{-12}$	$11,2 \cdot 10^{-12}$	$8 \cdot 10^{-12}$	-
Klasa odporności betonu na migrację chlorków	Wysoka	Niska	Średnia	-

Na podstawie wyników stwierdzono, że obróbka termiczna w początkowym etapie dojrzewania betonu miała niekorzystny wpływ na jego odporność na przenikanie chlorków. Beton referencyjny (ZR), dojrzewający w warunkach laboratoryjnych, charakteryzował się najniższym współczynnikiem migracji jonów chlorkowych, osiągając wartość $3,94 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$. W przypadku betonów poddanych naparzeniu w pierwszych 24 godzinach od zarobienia, odnotowano znaczny wzrost wartości współczynnika od $8,00 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$ dla cyklu Z50-19 do $11,20 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$ dla cyklu Z70-15. Zauważono, że w wyższych temperaturach powstaje mikrostruktura charakteryzująca się zwiększoną przepuszczalnością dla jonów chlorkowych. Dla cyklu przeprowadzonego w temperaturze 50°C obserwuje się dwukrotny wzrost przepuszczalności jonów chlorkowych, natomiast w przypadku cyklu prowadzonego w temperaturze 70°C — trzykrotny wzrost, w porównaniu do betonu dojrzewającego w standardowych warunkach laboratoryjnych. Zjawisko to można wytłumaczyć szybszym procesem hydratacji cementu, który zachodzi w podwyższonych temperaturach. Na powierzchni ziaren hydratyzującego cementu dochodzi do intensywnego wytrącania się żelu C-S-H oraz prowadzi do nierównomiernego rozmieszczenia tego żelu, co skutkuje lokalnym zagęszczeniem mikrostruktury. Żel uwodnionych krzemianów wapnia wykazuje dużą podatność na zmiany temperatury. Wraz ze wzrostem temperatury pielęgnacji zwiększa się gęstość pozorna żelu C-S-H. W efekcie prowadzi to do wzrostu porowatości kapilarnej. Dodatkowo, proces naparzenia sprzyja przemieszczaniu się wilgoci w głąb betonu oraz jej przemianę fazową. Tworząca się para wodna, generuje wzrost naprężeń rozciągających w porach kapilarnych, co prowadzi do inicjacji mikropęknięć w matrycy cementowej. Zjawiska te zwiększają migrację jonów chlorkowych, co negatywnie wpływa na odporność betonu na korozję wywołaną przez chlorki.

Zaplanowano również przeprowadzenie kolejnych badań dotyczących mrozoodporności (oznaczonych jako F150) [21]. Ze względu na długi czas trwania tych badań, ich wyniki nie zostaną przedstawione w niniejszym referacie.

5. Wnioski

Głównym celem referatu było wykazanie, że poprzez modelowanie warunków termicznych możliwe jest osiągnięcie zadowalającą wytrzymałość betonu w krótkim czasie oraz możliwie zbliżone parametry wytrzymałościowe i trwałościowe, w stosunku do betonu referencyjnego, w późniejszym terminie. Dążono do maksymalnego skrócenia cyklu produkcyjnego oraz istotnej redukcji zużycia energii. Na podstawie przeprowadzonych badań sformułowano następujące wnioski:

1. Zwiększenie temperatury obróbki termicznej betonu znacząco przyspiesza rozwój jego wytrzymałości w początkowym okresie dojrzewania — już po jednej dobie może osiągnąć nawet 68% wytrzymałości projektowanej oraz zachować taką samą wytrzymałość po 28 dniach pielęgnacji dla cyklu Z70-15 w porównaniu do betonu referencyjnego. Należy jednak zauważyć, że mimo szybkiego przyrostu wczesnej wytrzymałości dla cykli Z50-19 i Z50-24, w dłuższej perspektywie obserwuje się jej obniżenie w porównaniu do betonów referencyjnych.
2. Wzrost temperatury pielęgnacji miał jedynie nieznaczny wpływ na głębokość penetracji wody w porównaniu do betonu referencyjnego. Dla cykli prowadzonych z zachowaniem okresu wstępnej pielęgnacji wynoszącego 1,5 oraz 2 godziny (odpowiednio cykle Z50-24 i Z70-15), zaobserwowano zwiększenie głębokości penetracji wody o 2,33 mm i 2,43 mm. Natomiast w przypadku cyklu Z50-19, w którym okres wstępnej pielęgnacji ograniczono do 15 minut, wzrost głębokości penetracji był bardziej wyraźny i wyniósł 3,66 mm w stosunku do wartości GP uzyskanych dla betonu referencyjnego.
3. Największe różnice w stosunku do betonu referencyjnego zaobserwowano w wartościach współczynnika migracji jonów chlorkowych. Wraz ze wzrostem temperatury obróbki termicznej następował wyraźny spadek odporności betonu na penetrację chlorków. Współczynnik migracji dla betonu referencyjnego wynosił $3,94 \text{ mm}^2/\text{s}$. W przypadku cyklu Z50-19, prowadzonego w temperaturze 50°C , wzrósł on o 103% w stosunku do wartości referencyjnej, natomiast dla temperatury 70°C odnotowano wzrost 184%.
4. Cykl Z50-19 oraz Z50-24, charakteryzujące się identycznym indeksem energetycznym wynoszącym $1,19 \times 10^4 \text{ }^\circ\text{C}\cdot\text{min}$, wykazały umiarkowany poziom wytrzymałości betonu w czasie. Z kolei cykl Z70-15, przy wyższym indeksie energetycznym równym $1,95 \times 10^4 \text{ }^\circ\text{C}\cdot\text{min}$, cechował się lepszą wydajnością w zakresie uzyskiwanej wytrzymałości, jednak jego trwałość oceniono jako umiarkowaną.

Podwyższony indeks energetyczny cyklu Z70-15, wyższy o 64% względem cykli Z50-9 i Z50-24, świadczy o mniej korzystnym stosunku efektywności energetycznej do trwałości uzyskanego materiału.

5. Na podstawie przeprowadzonych badań stwierdzono, że cykle Z50-19 i Z50-24 wykazują duży potencjał do dalszej optymalizacji w kierunku zwiększenia wydajności procesu. Charakteryzują się one obiecującymi wynikami w zakresie trwałości betonu, co czyni je dobrym punktem wyjścia do dalszych modyfikacji technologicznych. Przewiduje się, że ewentualne zmiany będą przede

wszystkim polegały na wydłużeniu czasu trwania cyklu, co może pozwolić na uzyskanie lepszego kompromisu pomiędzy wczesną wytrzymałością a długoterminową trwałością materiału przy zachowaniu względnie niskiego indeksu energetycznego.

6. Literatura

- [1] <https://www.architecture2030.org/why-the-built-environment/>
- [2] ACI Comitette 517 „Accelerattted curing of concrete at atmosferic pressure (ACI 517.2R- revised 1992), Framingam Hills, USA
- [3] A. Nevill, „Właściwości betonu”, Polski Cement, Kraków 2000r.
- [4] A. Rubin, „Obróbka termiczno-wilgotnościowa metodą vaporyzacji”, BrukBiz nr 5, 2012r.
- [5] Galluci E. et all „Effect of temperaturę on the microstructure calcium silicate hydrate (C-S-H)”, Cement and Concrete Reserch 53 (2013)
- [6] Wang L. et all „Effect of curing regime on the mechanical properties and durability of steam curing concrete”, Buildings 2023, 13, 1697r.
- [7] Abdullah M. Zayad et all „Review on effect of steam curing on behavior of concrete”, Cleaner Materials 3 (2022) 100042
- [8] Deja J. i inni „Beton. Technologie i metody badań”, Polski Cement, Kraków 2020r.
- [9] Flaga K. „Funkcja temperatury tężącego betonu i jej zastosowanie do analizy procesu dojrzewania betonu w warunkach podwyższonych temperatur”, Rozprawa doktorska, PK, 1967r.
- [10] Ramezaniapour A.A. et all „Effect os steam curing cycles on strenght and durability of SCC: A case study in precast concrete”, Constructuons and Buildings Materials 49 (2013)
- [11] Wang J. „Influence of rapid curing methods on concreto microstructure and properties: A review”. Case Studies in Construction Materials 17 (2022)
- [12] Kurdowski W. „Opóźniony ettringit-wyzwanie badawcze”, Beton na progu nowego millenium, Dni Betonu, Wisła
- [13] Kurdowski W. „Chemia cementu i betonu”, Polski Cement, Wydawnictwo PWN Kraków, Warszawa 2010r.
- [14] Owsiak Zdzisława „Wewnętrzna korozja siarczanowa Betonu”, Monografie, Studia, Rozprawy M6, Wydawnictwo Politechniki Świętokrzyskiej, Kielce 2008r.
- [15] Niziurska M. „Wpływ węglanu litu na proces hydratacji cementu glinowego i właściwości zapraw kompozytowych”, Rozprawa doktorska, AGH, Kraków 2019r.
- [16] Wzorcowe Warunki Wykonania i Odbioru Robót Budowlanych (WWiORB) Generalnej Dyrekcji Dróg Krajowych i Autostrad M-13.01.00 v05 „Beton konstrukcyjny w drogowych obiektach inżynierskich”, Warszawa, styczeń 2025r.

- [17] PN-EN 197-1:2012 „Cement – Część 1: Skład, wymagania i kryteria zgodności dotyczące cementów powszechnego użytku”
- [18] PN-EN 196-1:2016-07 „Metody badania cementu. Część 1. Oznaczanie wytrzymałości”
- [19] PN-EN 206+A2:2021-08 „Beton – Wymagania, właściwości użytkowe, produkcja i zgodność”
- [20] PN-EN 12620:2013 „Kruszywa do betonu”
- [21] PN-B-06265:2022-08 „Beton – Wymagania, właściwości użytkowe, produkcja i zgodność - Krajowe uzupełnienie PN-EN 206+A2:2021-08”
- [22] PN-EN 934-2:2019-08 „Domieszki do betonu, zaprawy i zaczynu – Część 2: Domieszki do betonu – Definicje, wymagania, zgodność, oznakowanie i etykietowanie”
- [23] PN-EN 12350-6:2019-08 „Badania mieszanki betonowej – Część 6: Oznaczanie gęstości”
- [24] PN-EN 12350-2:2019-07– „Badania mieszanki betonowej – Część 2: Badanie konsystencji metodą opadu stożka”
- [25] PN-EN 12350-7:2019-08 „Badania mieszanki betonowej – Część 7: Zawartość powietrza - Metody ciśnieniowe”
- [26] PN-EN 12390-3:2019-0707 „Badania betonu – Część 3: Wytrzymałość na ściskanie próbek do badań”
- [27] PN-EN 12390-8:2019-08 „Badania betonu – Część 8: Głębokość penetracji wody pod ciśnieniem”
- [28] PN-EN 12390-18:2021-08 „Badania betonu – Część 18: Oznaczenie współczynnika migracji chlorków”

mgr inż. Kamil Pawłowski
CERTBUD Sp. z o.o.

Nowe Rozporządzenie CPR 2024/3110 i jego wpływ na prefabrykowane wyroby betonowe

The New CPR Regulation 2024/3110 and Its Impact on Prefabricated Concrete Products

Streszczenie

Nowe Rozporządzenie Parlamentu Europejskiego i Rady (UE) 2024/3110 stanowi kluczową reformę w zakresie wprowadzania do obrotu wyrobów budowlanych w Unii Europejskiej. W szczególności zmienia podejście do oceny środowiskowej oraz cyfrowego zarządzania dokumentacją techniczną. Referat przedstawia najważniejsze założenia rozporządzenia, jego wpływ na prefabrykowane wyroby betonowe oraz mechanizmy wdrażania systemu AVCP 3+, który wprowadza obowiązek walidacji danych środowiskowych przez jednostki notyfikowane. Omówiono również rolę norm zharmonizowanych – w tym projektowanej normy prEN 18190 – oraz aktów delegowanych jako alternatywnego instrumentu legislacyjnego umożliwiającego szybsze wdrożenie nowych wymagań. Zwrócono uwagę na wyzwania organizacyjne i techniczne stojące przed producentami prefabrykatów, w tym konieczność wdrożenia analizy cyklu życia (LCA) oraz zapewnienia kompletności danych środowiskowych. W referacie podkreślono również znaczenie ścisłego monitorowania procesu normalizacyjnego i aktywnego dostosowywania procedur zakładowych do zmieniających się ram regulacyjnych.

Abstract

The new Regulation (EU) 2024/3110 of the European Parliament and the Council marks a major reform in the marketing of construction products within the European Union. It redefines the regulatory framework concerning environmental assessment and the digital management of technical documentation. This paper outlines the regulation's main assumptions and its implications for precast concrete products, with a particular focus on the implementation of AVCP 3+, a new conformity assessment system requiring third-party validation of environmental data. The evolving role of harmonised standards—including the forthcoming prEN 18190—and the use of delegated acts as an alternative legislative tool to facilitate regulatory implementation are examined. Organisational and technical challenges for manufacturers are discussed, including the need to implement life cycle assessment (LCA) and ensure the completeness of environmental data. The paper also highlights the importance of

closely monitoring standardisation progress and proactively aligning internal procedures with the forthcoming regulatory framework.

1. Wstęp

Dotychczasowe ramy prawne dotyczące wyrobów budowlanych zostały określone w Rozporządzeniu (UE) nr 305/2011 (tzw. CPR), obowiązującym od 1 lipca 2013 roku. Jego celem było zapewnienie swobodnego przepływu wyrobów budowlanych na terenie Unii Europejskiej poprzez ustanowienie wspólnych zasad ich wprowadzania do obrotu oraz jednolitego systemu oznakowania CE. Rozporządzenie to zastąpiło wcześniejszą Dyrektywę 89/106/EWG, której stosowanie było utrudnione z powodu rozbieżnych interpretacji w różnych państwach członkowskich.

W odniesieniu do prefabrykowanych wyrobów betonowych, Rozporządzenie (UE) nr 305/2011 doprecyzowało oraz podtrzymało możliwość ich formalnego oznakowania znakiem CE na podstawie norm zharmonizowanych (hEN), które zaczęto publikować sukcesywnie od połowy pierwszej dekady XXI wieku. Przykładowo, norma EN 14992:2007 dotycząca prefabrykowanych elementów ściennych zaczęła obowiązywać po zakończeniu okresu współistnienia 1 lipca 2013 r., EN 13225:2004 odnosząca się do prętowych elementów konstrukcyjnych – od 1 stycznia 2006 r., natomiast EN 15258:2008 dotycząca prefabrykowanych ścian oporowych – od 1 stycznia 2011 r.

Po ponad dziesięciu latach funkcjonowania CPR 305/2011 stało się jasne, że mimo licznych osiągnięć – takich jak upowszechnienie oznakowania CE – system ten nie zdołał w pełni sprostać potrzebom rynku. Wskazywano między innymi na trudności w opracowywaniu norm, rozbieżności interpretacyjne oraz niewystarczający nadzór rynku. Te problemy skłoniły Komisję Europejską do podjęcia inicjatywy mającej na celu reformę obowiązujących przepisów.

Jednym z nierozwiązanych zagadnień pozostaje konieczność projektowania prefabrykatów betonowych jako elementów budynków. Normy projektowe oraz krajowe aneksy do Eurokodów różnią się między państwami członkowskimi, co w praktyce oznacza, że prefabrykaty muszą być projektowane zgodnie z krajowymi przepisami technicznymi, przez osoby posiadające uprawnienia nadane zgodnie z lokalnym prawem. W efekcie, nawet jeśli wyrób został oznakowany znakiem CE i legalnie wprowadzony do obrotu, nie zawsze może zostać wbudowany w konkretny obiekt budowlany – jeżeli nie spełnia wymagań technicznych określonych w krajowych przepisach budowlanych.

Formalne prace nad nowym rozporządzeniem rozpoczęto w marcu 2022 roku, kiedy Komisja Europejska opublikowała wniosek legislacyjny 2022/0094 (COD). Proces ten obejmował szerokie konsultacje publiczne oraz dialog z interesariuszami – w tym z organizacjami branżowymi, państwami członkowskimi, Parlamentem Europejskim, jednostkami notyfikowanymi, organizacjami konsumenckimi i instytucjami zajmującymi się ochroną środowiska. Łącznie odbyło się ponad 20 oficjalnych posiedzeń oraz liczne spotkania bilateralne z przedstawicielami sektora i administracji.

Projekt nowego aktu został również przeanalizowany przez Europejski Komitet Ekonomiczno-Społeczny i poddany procedurze legislacyjnej w Parlamencie Europejskim. Ostateczna wersja rozporządzenia została przyjęta przez Radę UE 5 listopada 2024 r., zatwierdzona przez Parlament 10 kwietnia 2024 r., a następnie podpisana jako Rozporządzenie (UE) 2024/3110 w dniu 27 listopada 2024 r. Akt został opublikowany 18 grudnia 2024 r., a wszedł w życie 7 stycznia 2025 r. Przewidziano jednocześnie stopniowe wdrażanie przepisów, które całkowicie zastąpią dotychczasowe rozporządzenie CPR 305/2011 do 2040 roku.

2. Powody zmiany rozporządzenia CPR

Ocena funkcjonowania Rozporządzenia CPR 305/2011, przeprowadzona przez Komisję Europejską w 2019 roku, ujawniła szereg istotnych problemów, które utrudniały realizację jego podstawowych celów. W szczególności zwrócono uwagę na:

- długotrwały i nieskuteczny proces opracowywania norm zharmonizowanych (często przekraczający 5–6 lat),
- trudności w egzekwowaniu przepisów oraz rozbieżności w praktykach nadzoru rynku w różnych państwach,
- brak spójności i przejrzystości przepisów w odniesieniu do innych aktów prawnych Unii Europejskiej,
- niewystarczające narzędzia wspierające cyfryzację oraz realizację celów zrównoważonego rozwoju.

Wnioski te znalazły odzwierciedlenie w dokumentach strategicznych Komisji Europejskiej, takich jak „Nowa strategia przemysłowa dla Europy” (2020), „Plan działań UE dla gospodarki o obiegu zamkniętym” (2020) oraz „Strategia UE w zakresie normalizacji” (2022).

W odpowiedzi na te sygnały Komisja Europejska w 2022 roku zidentyfikowała cztery główne problemy systemowe wymagające interwencji legislacyjnej:

1. **Brak rzeczywistego jednolitego rynku** – rozbieżności w przepisach krajowych i zróżnicowane praktyki oceny zgodności nadal ograniczały swobodny przepływ wyrobów budowlanych.
2. **Złożoność i brak uproszczeń proceduralnych** – szczególnie dotkliwe dla mikro-, małych i średnich przedsiębiorstw.
3. **Nieefektywny nadzór rynku** – brak jasnych procedur i odpowiedzialności na poziomie Unii Europejskiej.
4. **Niedostosowanie do celów polityki UE** – w tym brak mechanizmów umożliwiających realizację priorytetów w zakresie klimatu, cyfryzacji i gospodarki cyrkularnej.

W preambule nowego Rozporządzenia CPR 2024/3110 wskazano pięć głównych kierunków reformy:

- Wzmocnienie harmonizacji – poprzez jednoznaczne określenie zakresu regulacji zharmonizowanej oraz ograniczenie kompetencji krajowych do przepisów dotyczących obiektów budowlanych.
- Zwiększenie przejrzystości i uproszczeń – m.in. dzięki wprowadzeniu cyfrowego paszportu wyrobu, ujednoliceniu zasad deklarowania właściwości użytkowych oraz możliwości łączenia deklaracji zgodności z deklaracją właściwości użytkowych.
- Zrównoważony rozwój – poprzez obowiązkową ocenę środowiskową wyrobu, obliczanie śladu węglowego oraz wprowadzenie systemu klasyfikacji środowiskowej.
- Spójność regulacyjna – umożliwiająca uznawanie zgodności z CPR na podstawie spełnienia wymagań równoległych regulacji sektorowych.
- Nowe grupy adresatów przepisów – obejmujące m.in. platformy cyfrowe, dostawców danych, właścicieli systemów etykietywania oraz operatorów usług realizacji zamówień.

Nowe rozporządzenie wprowadza także mechanizmy umożliwiające Komisji Europejskiej podejmowanie szybkich działań legislacyjnych w sytuacji, gdy proces normalizacyjny prowadzony przez CEN okazuje się nieskuteczny. Przewidziano również aktywny udział państw członkowskich oraz Parlamentu Europejskiego w planowaniu działań normalizacyjnych.

Z punktu widzenia sektora prefabrykowanych wyrobów betonowych szczególne znaczenie mają nowe obowiązki w zakresie środowiskowej oceny wyrobu, cyfrowego zarządzania dokumentacją oraz uproszczenia wymagań dla produkcji jednostkowej. Rozporządzenie CPR 2024/3110 stanowi instrument umożliwiający powiązanie celów Europejskiego Zielonego Ładu z praktyką przemysłu budowlanego – oferując nowe narzędzia regulacyjne, ale jednocześnie nakładając dodatkowe obowiązki na uczestników rynku.

3. Równoległe ramy prawne i wprowadzenie systemu AVCP 3+

Nowe ramy legislacyjne dotyczące wyrobów budowlanych, ustanowione Rozporządzeniem (UE) 2024/3110, nie zastępują natychmiast obowiązującego Rozporządzenia 305/2011, lecz przewidują jego stopniowe wygaszanie do 2040 roku. Równoległe, w celu przyspieszenia wdrażania wybranych elementów reformy, Komisja Europejska przyjęła akt delegowany (UE) 2024/2769, który rozszerza stosowanie obecnego CPR 305/2011 o nowy system oceny zgodności – AVCP 3+ – dedykowany wyłącznie cechom środowiskowym wyrobów.

W efekcie, przez okres przejściowy na rynku funkcjonować będą równoległe trzy ścieżki wprowadzania wyrobów budowlanych do obrotu:

1. **Wariant I – „CPR 305/2011”**: wprowadzanie wyrobów na podstawie Rozporządzenia 305/2011, bez obowiązku deklarowania właściwości środowiskowych.
2. **Wariant II – „CPR 305/2011 + Aneks”**: stosowanie Rozporządzenia 305/2011 w połączeniu z nowymi zharmonizowanymi specyfikacjami technicznymi uwzględniającymi cechy środowiskowe z przypisaniem systemu AVCP 3+.

3. **Wariant III – „Nowy CPR”:** stosowanie Rozporządzenia 2024/3110, obejmujące obowiązkową ocenę środowiskową, cyfrowy paszport produktu oraz nowy system klasyfikacji wyrobów.

Taka struktura, choć zaprojektowana w celu zapewnienia ciągłości prawnej, może prowadzić do niepewności na rynku. Dla odbiorców wyrobów niejednokrotnie niejasne będzie, na podstawie którego rozporządzenia dany wyrób został oceniony i oznakowany, jaki system AVCP ma zastosowanie oraz jakie dokumenty – deklaracje właściwości użytkowych, zgodności czy sprawozdania z weryfikacji – należy przedstawić. Wymaga to od producentów nie tylko właściwej interpretacji przepisów, ale także umiejętnego komunikowania tych informacji projektantom, klientom oraz organom nadzoru.

System AVCP 3+ – nowa forma oceny środowiskowej

Najważniejszą zmianą wprowadzoną przez akt delegowany Komisji (UE) 2024/2769 jest ustanowienie systemu AVCP 3+, stanowiącego odrębną procedurę oceny i weryfikacji stałości właściwości użytkowych, dedykowaną wyłącznie charakterystykom środowiskowym wyrobu. System ten ma na celu przyspieszenie wdrażania założeń Europejskiego Zielonego Ładu, jeszcze przed wejściem w życie pełnych przepisów nowego CPR.

Główne założenia systemu AVCP 3+ obejmują:

- wykonanie przez producenta środowiskowej oceny cyklu życia (LCA) wyrobu, z uwzględnieniem kluczowych wskaźników – w tym potencjału tworzenia efektu cieplarnianego (GWP),
- weryfikację LCA przez notyfikowaną jednostkę walidującą, która:
 - ocenia kompletność danych źródłowych i przyjęte założenia,
 - analizuje zastosowane oprogramowanie oraz metodologię,
 - przeprowadza inspekcję zakładu produkcyjnego,
- sporządzenie sprawozdania z weryfikacji przez jednostkę notyfikowaną.

W systemie AVCP 3+ rola jednostki notyfikowanej ogranicza się do walidacji deklaracji środowiskowej LCA na podstawie dostarczonych przez producenta danych. Weryfikowana jest poprawność zastosowanej metodologii, kompletność danych wejściowych oraz zgodność z dokumentami odniesienia. Obowiązkowym elementem walidacji jest inspekcja zakładu, mająca na celu potwierdzenie rzetelności danych oraz zgodności procesu z deklarowaną metodyką LCA.

5. Rola norm zharmonizowanych i aktów delegowanych

Aby wymagania nowego rozporządzenia CPR 2024/3110, jak również równolegle wprowadzonego do nadal obowiązującego CPR 305/2011 aktu delegowanego Komisji (UE) 2024/2769, mogły zostać wdrożone w praktyce, konieczne jest opublikowanie odpowiednich norm zharmonizowanych (hEN) lub aktów delegowanych. Bez istnienia jednego z tych dokumentów nie jest możliwe rozpoczęcie procesu oceny i weryfikacji zgodności wyrobów budowlanych ani prawidłowe wdrożenie przepisów. Do czasu ich publikacji nowe regulacje – niezależnie od tego, czy wynikają z CPR 2024/3110, czy z

aktu delegowanego 2024/2769 – nie mają zastosowania wobec producentów i nie mogą stanowić podstawy do stosowania oznakowania CE.

Normy zharmonizowane pełniły dotychczas kluczową rolę jako narzędzie wdrażania rozporządzenia CPR 305/2011. Opracowywane przez Europejski Komitet Normalizacyjny (CEN) na podstawie formalnych mandatów Komisji Europejskiej, zawierają szczegółowe procedury dotyczące oceny i deklarowania właściwości użytkowych wyrobów budowlanych. Ich publikacja w Dzienniku Urzędowym Unii Europejskiej uruchamia obowiązek stosowania oznakowania CE oraz określa właściwy system oceny i weryfikacji stałości właściwości użytkowych (AVCP). W przypadku prefabrykowanych wyrobów betonowych funkcję tę pełniły m.in. następujące normy:

- EN 13225:2013 – Prefabrykaty z betonu – Prętowe elementy konstrukcyjne
- EN 13747:2005+A2:2010 – Prefabrykaty z betonu – Płyty stropowe do zespolonych systemów stropowych
- EN 14843:2007 – Prefabrykaty z betonu – Schody
- EN 14991:2007 – Prefabrykaty z betonu – Elementy fundamentów
- EN 14992:2007+A1:2012 – Prefabrykaty z betonu – Elementy ścian

Nowe rozporządzenie CPR 2024/3110 utrzymuje normy zharmonizowane jako podstawowe narzędzie wdrażania wymagań prawnych. Jednocześnie jednak wprowadza nową formę regulacji – akty delegowane, które nie były przewidziane w dotychczasowym CPR. Ich rola polega na zapewnieniu alternatywnej drogi implementacji przepisów w sytuacjach, gdy proces opracowywania norm w ramach CEN napotyka trudności lub nie prowadzi do osiągnięcia konsensusu w rozsądnym terminie. Dzięki aktom delegowanym Komisja Europejska może skutecznie wdrażać wymagania prawne bez konieczności oczekiwania na zakończenie długotrwałych procesów normalizacyjnych.

Akty delegowane są dokumentami o charakterze wykonawczym, przyjmowanymi przez Komisję Europejską zgodnie z procedurami przewidzianymi w Traktacie o funkcjonowaniu Unii Europejskiej. Mogą one zastępować normy zharmonizowane, jeżeli:

- nie udało się uzgodnić treści normy w ramach CEN w ustalonym terminie,
- uzgodniona norma nie spełnia wymagań Komisji Europejskiej w zakresie zgodności z rozporządzeniem,
- istnieje pilna potrzeba wdrożenia określonych wymagań, np. ze względu na cele środowiskowe.

Wprowadzenie aktów delegowanych jako nowego instrumentu prawnego umożliwia Komisji Europejskiej szybsze i bardziej elastyczne reagowanie na potrzeby rynku i priorytety polityki unijnej – takie jak zrównoważony rozwój, cyfryzacja czy eliminacja substancji niebezpiecznych. Działanie to jest szczególnie istotne w kontekście braku odpowiednich norm zharmonizowanych, których opracowanie może być czasochłonne i niepewne.

Relacja pomiędzy normami zharmonizowanymi a aktami delegowanymi w ramach CPR 2024/3110 ma charakter komplementarny:

- normy zharmonizowane pozostają podstawowym narzędziem wdrażania przepisów technicznych na poziomie unijnym,
- akty delegowane pełnią funkcję uzupełniającą lub zastępczą w sytuacjach, gdy proces normalizacyjny nie zapewnia skutecznego wdrożenia regulacji.

Taki model działania umożliwia stopniowe i elastyczne wprowadzanie nowych wymagań technicznych, niezależnie od bieżącego stanu prac w CEN. Warto przy tym podkreślić, że do momentu publikacji odpowiedniego dokumentu – czy to normy zharmonizowanej, czy aktu delegowanego – producenci nie są zobowiązani do wdrażania nowych przepisów, a obowiązek oznakowania CE nadal opiera się na dotychczas obowiązujących regulacjach.

W praktyce oznacza to, że już teraz warto rozpocząć przygotowania do przyszłych wymagań wynikających z aktów delegowanych – nawet jeśli dla danego wyrobu nie została jeszcze opublikowana nowa norma zharmonizowana. Kluczowe staje się systematyczne monitorowanie postępów w opracowywaniu zarówno hEN, jak i aktów delegowanych, ponieważ to właśnie ich publikacja w Dzienniku Urzędowym Unii Europejskiej wyznacza moment wejścia w życie nowych obowiązków regulacyjnych. Bieżąca analiza harmonogramów legislacyjnych i normalizacyjnych pozwala przedsiębiorstwom odpowiednio wcześniej przygotować się do nadchodzących zmian.

6. Harmonogram opracowania nowych norm zharmonizowanych

Skuteczne wdrożenie rozporządzenia CPR 2024/3110, jak również aktu delegowanego Komisji (UE) 2024/2769, przyjętego na podstawie nadal obowiązującego CPR 305/2011, wymaga opracowania i publikacji nowych norm zharmonizowanych (hEN), które stanowić będą techniczne i proceduralne odniesienie dla producentów wyrobów budowlanych. Choć samo rozporządzenie wyznacza ramy legislacyjne, dopiero norma zharmonizowana umożliwia formalne deklarowanie właściwości użytkowych oraz zastosowanie oznakowania CE na wyrobie. Czas opracowania jednej normy – od przyjęcia zlecenia normalizacyjnego do publikacji w Dzienniku Urzędowym Unii Europejskiej – wynosi zazwyczaj od dwóch do czterech lat. W przypadku braku konsensusu w ramach struktur CEN proces ten może jednak ulec znacznemu wydłużeniu.

Komisja Europejska, uwzględniając strategiczne cele Unii Europejskiej oraz tempo wdrażania przepisów klimatycznych, wskazała priorytety normalizacyjne w dokumencie roboczym *Working Plan*. Określono w nim kolejność opracowywania norm, dzieląc wyroby budowlane na trzy zasadnicze grupy:

- produkty objęte trybem „fast track” – o wysokiej gotowości rynkowej lub pod presją ze strony przemysłu,
- produkty wymagające pilnej rewizji obowiązujących norm,
- produkty ujęte w ścieżce średnio- i długoterminowej, których opracowanie zaplanowano po roku 2027.

Zgodnie z opublikowanym planem normalizacji, wysoki priorytet w opracowywaniu nowych norm mają poniższe grupy wyrobów budowlanych:

- Prefabrykowane wyroby betonowe (mandat M/100) pozostają tymczasowo w zakresie rozporządzenia CPR 305/2011 i objęte zostały formalnym mandatem

normalizacyjnym C(2025)2125, zatwierdzonym przez Komisję Europejską w kwietniu 2025 r.

- Drzwi, okna i bramy (mandat M/101) zostały objęte procedurą szybkiego opracowania norm zharmonizowanych w ramach nowego rozporządzenia CPR 2024/3110.
- Wyroby stalowe i metalowe (mandat M/120) nadal funkcjonują w oparciu o dotychczasowe normy, jednak trwają prace nad przygotowaniem wniosku o normalizację.

Cały Plan prac normalizacyjnych został przedstawiony na Schemacie 1.

1. Wyroby prefabrykowane z betonu zwykłego /lekkiego/autoklawizowanego napowietrzonego 1	10. Stałe urządzenia gaśnicze 11	22. Pokrycia dachowe, świetliki, okna dachowe, wyroby pomocnicze, zestawy dachowe 21	28. Rury, zbiorniki i wyroby pomocnicze niestykające się z wodą pitną 31
2. Drzwi, okna, okiennice, bramy i powiązane z nimi okucia budowlane 2	23. Wyroby do budowy dróg 12	12. Urządzenia bezpieczeństwa ruchu drogowego: wyposażenie dróg 22	31. Kable zasilania, sterujące i komunikacyjne 32
20. Konstrukcyjne wyroby metalowe i wyroby pomocnicze 3	19. Wyroby podłogowe i posadzkowe 13	18. Wyroby do usuwania i oczyszczania ścieków 23	6. Komin, przewody kominowe i wyroby specjalne 33
16. Stal zbrojeniowa i sprzężająca do betonu (i wyroby pomocnicze), zestawy zakotwień i cięgien 4	4. Materiały termoizolacyjne – złożone zestawy/systemy izolacyjne 14	25. Kleje budowlane 24	32. Wyroby do uszczelniania złączy 34
15. Cementy, wapna budowlane i inne spoiwa hydrauliczne 5	9. Ściany osłonowe/okładziny ścian zewnętrznych/oszklenie ze spoiwem konstrukcyjnym 15	7. Wyroby gipsowe 25	35. Wyroby do zatrzymywania ognia, uszczelniające i ochrony ogniochronnej 35
4. Materiały termoizolacyjne – złożone zestawy/systemy izolacyjne 6	14. Płyty i elementy drewnopochodne 16	33. Mocowania/łącza 26	29. Wyroby budowlane stykające się z wodą przeznaczoną do spożycia 36
13. Konstrukcyjne wyroby/elementy drewniane i wyroby pomocnicze 7	5. Łożyska konstrukcyjne, trzpienie do złączy konstrukcyjnych 17	3. Membrany, w tym stosowane w postaci płynnej i zestawy 27	36. Drabiny mocowane na stałe 38
26. Wyroby związane z betonem, zaprawą i zaczynem 8	34. Zestawy budowlane, komponenty budowlane, prefabrykaty 18	30. Wyroby ze szkła płaskiego, profilowanego i bloków szklanych 28	
17. Wyroby murarskie i wyroby pokrewne: elementy murowe, zaprawy i wyroby pomocnicze 9	21. Wykończenia ścian wewnętrznych, zewnętrznych i sufitów. Zestawy ścian działowych 19	8. Geowłókniny, geomembrany i wyroby związane 29	
24. Kruszywa 10	27. Urządzenia do ogrzewania pomieszczeń 20	11. Urządzenia sanitarne 30	

· zlenienie normalizacyjne w ramach dotychczasowego CPR

· produkty objęte ścieżką „Fast Track”

· zlenienie normalizacyjne w ramach nowego CPR 2024/3110 - w trakcie opracowywania

· inne rodziny wyrobów

1

· Priorytet (oznaczenie np. „1”)

Schemat 1. Harmonogram prac normalizacyjnych

Proces opracowania norm zharmonizowanych podlega formalnemu podziałowi na cztery zasadnicze etapy:

- **Etap 1 – CPR Acquis:** identyfikacja potrzeb legislacyjnych i luk w obecnym systemie normatywnym przez ekspertów Komisji Europejskiej, działających w ramach grupy roboczej CPR Acquis Expert Group,
- **Etap 2 – Wniosek o normalizację:** przygotowanie zlenienia normalizacyjnego (SR) i przekazanie go do CEN oraz przyjęcie przez właściwy Komitet Techniczny (np. CEN/TC 229 w przypadku prefabrykatów betonowych),
- **Etap 3 – Opracowanie projektu normy:** sporządzenie roboczego projektu normy (draft hEN), zgodnego z wymaganiami CPR oraz poddanie go konsultacjom z interesariuszami – np. producentami czy jednostkami notyfikowanymi
- **Etap 4 – Ocena i publikacja:** po zatwierdzeniu przez CEN, dokument trafia do Komisji Europejskiej celem oceny zgodności z CPR i publikacji w Dzienniku Urzędowym UE jako obowiązująca norma zharmonizowana.

Z uwagi na konieczność ujednolicenia podejścia do oceny środowiskowej, prefabrykowane wyroby betonowe w pierwszej kolejności zostaną objęte ścieżką tymczasową, opartą na obowiązującym nadal CPR 305/2011 oraz akcie delegowanym 2024/2769, który wprowadza system AVCP 3+ dla cech środowiskowych. Zanim opublikowana zostanie pełna norma zharmonizowana w ramach CPR 2024/3110, opracowana zostanie nowa norma środowiskowa działająca jeszcze w oparciu o starsze ramy prawne. Dokument ten będzie zawierał wytyczne dotyczące oceny środowiskowej i bazował na normach odniesienia, takich jak EN 15804, określająca zasady opracowywania deklaracji środowiskowych typu III (EPD) dla wyrobów budowlanych, oraz normach typu c-PCR definiujących szczegółowe reguły kategorii wyrobu.

Tymczasowy model wdrażania – oparty na połączeniu dotychczasowego CPR i dodatkowego aktu delegowanego – umożliwi wcześniejsze uruchomienie obowiązków w zakresie oceny środowiskowej, przy jednoczesnym zachowaniu spójności z obecnymi przepisami oraz systemem AVCP. Ma to szczególne znaczenie w kontekście wdrażania założeń Europejskiego Zielonego Ładu, który wymaga możliwie szybkiego ograniczenia wpływu sektora budownictwa na środowisko. Należy jednocześnie zaznaczyć, że proces opracowania właściwej normy środowiskowej dla prefabrykatów w ramach CEN będzie kontynuowany, a pełne przejście na nowe regulacje, wynikające z CPR 2024/3110, nastąpi dopiero w kolejnych latach. W praktyce prefabrykaty betonowe przez dłuższy czas będą funkcjonować w oparciu o rozwiązania przejściowe, wynikające z CPR 305/2011.

Z perspektywy producentów prefabrykatów oraz innych uczestników rynku szczególne znaczenie ma uważne śledzenie postępu prac nad projektowanymi normami zharmonizowanymi. Choć na obecnym etapie trudno jednoznacznie przewidzieć ich ostateczne brzmienie, wiele kluczowych założeń zawarto już w zleceniu

normalizacyjnym C(2025)2125, przyjętym przez Komisję Europejską dla prefabrykowanych wyrobów betonowych. Dokument ten określa m.in. planowany zakres przyszłej normy, cele środowiskowe, które ma ona realizować, a także odniesienia do aktualnie obowiązujących dokumentów metodologicznych, takich jak EN 15804 oraz norm c-PCR. Systematyczna obserwacja przebiegu prac normalizacyjnych oraz analiza zawartych w zleceniu wytycznych pozwalają producentom z odpowiednim wyprzedzeniem przygotować się do nowych obowiązków i dostosować praktyki zakładowe do przyszłych wymagań regulacyjnych.

7. Nowa norma dla prefabrykatów betonowych – projekt nowej normy EN 18190 i system AVCP 3+

Prefabrykowane wyroby betonowe (M100) stanowią pierwszy segment wyrobów budowlanych, dla którego formalnie rozpoczęto opracowywanie nowej normy zharmonizowanej, skoncentrowanej wyłącznie na systemie oceny zgodności AVCP 3+ w odniesieniu do charakterystyk środowiskowych. Zgodnie z zleceniem normalizacyjnym C(2025)2125, przyjętym przez Komisję Europejską na początku 2025 r., planowane jest opracowanie jednej, ogólnej normy zharmonizowanej (hEN), obejmującej całą grupę prefabrykatów betonowych – od ścian i słupów, przez płyty i belki, aż po elementy mostowe.

Głównym celem opracowywanej normy prEN 18190 jest zintegrowanie wszystkich typów prefabrykowanych wyrobów betonowych w jednym wspólnym dokumencie zharmonizowanym, który umożliwi stosowanie jednolitego podejścia zarówno do oceny właściwości użytkowych wyrobu, jak i środowiskowych. Zakres przyjętego wniosku normalizacyjnego - Mandat M/609 - został przedstawiony w Tabeli 1, obejmującej wykaz nowych norm zharmonizowanych do opracowania oraz terminy ich przyjęcia, dotyczących prefabrykowanych wyrobów betonowych.

Tabela 1: Zakres przyjętego wniosku normalizacyjnego – Mandat M/609 – dla prefabrykowanych wyrobów betonowych oraz terminy ich przyjęcia

Informacje referencyjne	Termin przyjęcia przez CEN
Nowe normy do opracowania:	
1. Europejska norma: „<i>Prefabrykowane wyroby betonowe – ocena właściwości użytkowych i deklaracja</i>” Obejmuje m.in. płyty pełne, elementy przewodów wentylacyjnych HVAC, puszki rozgałęźne oraz wyroby objęte zakresem norm: EN 15037-1 „Belkowo-pustakowe systemy stropowe -- Część 1: Belki”, EN 15037-2 „Belkowo-pustakowe systemy stropowe -- Część 2: Pustaki betonowe”, EN 15037-3 „Belkowo-pustakowe systemy stropowe -- Część 3: Pustaki ceramiczne”, EN 15037-4 „Belkowo-pustakowe systemy stropowe -- Część 4: Pustaki styropianowe”, EN 15037-5 „Belkowo-pustakowe systemy stropowe -- Część 5: Lekkie pustaki szalunkowe”, EN 14844 „Przepusty skrzynkowe”, EN 15050 „Elementy mostów”, EN 14992 „Elementy ścian”, EN 12839 „Elementy ogrodzeń”, EN 13747 „Płyty stropowe dla systemów stropowych”, PL 12737 „Prefabrykowane podłogi dla budynków inwentarskich”, EN 12794 „Pale fundamentowe”, EN 13978 „Prefabrykowane garaże betonowe -- Część 1: Wymagania dla żelbetowych garaży monolitycznych lub składających się z pojedynczych sekcji o rozpiętości pomieszczenia”, EN 1168 „Płyty kanałowe”, EN 13225 „Prętowe elementy konstrukcyjne”, EN 12843 „Maszty i słupy”, EN 15258 „Elementy ścian oporowych”, EN 13224 „Żebrowe elementy stropowe”, EN 13693 „Specjalne elementy dachowe”, EN 15435 „Pustaki szalunkowe z betonu zwykłego i lekkiego -- Cechy wyrobu i właściwości użytkowe”, EN 15498 „Szalunki z wiórobetonu -- Cechy wyrobu i właściwości użytkowe”, EN 14843 „Schody”.	15.11.2025
2. Europejska norma: „<i>Zrównoważone obiekty budowlane – Deklaracje środowiskowe wyrobu – Reguły kategorii wyrobu (PCR) dla prefabrykowanego betonu lekkiego o strukturze otwartej i prefabrykowanego betonu komórkowego autoklawizowanego</i>”	15.11.2025
Istniejące normy do przeglądu i aktualizacji	
3. EN 1520:2011 – <i>Prefabrykowane wyroby z betonu lekkiego o strukturze otwartej</i>	15.11.2025
4. EN 12602:2016 – <i>Prefabrykowane wyroby z betonu komórkowego autoklawizowanego</i>	15.11.2025
5. EN 16757:2022 – <i>Zrównoważone obiekty budowlane – Deklaracje środowiskowe wyrobu – Reguły kategorii wyrobu (PCR) dla betonu i elementów betonowych</i>	15.11.2025

Chociaż projekt normy prEN 18190 „Prefabrykowane wyroby betonowe – ocena właściwości użytkowych i deklaracja” nie został jeszcze opublikowany, możliwe jest przewidywanie jej ogólnej struktury i zawartości na podstawie obowiązujących wytycznych normalizacyjnych. Zgodnie z dokumentem CEN-CENELEC Guide 36:2024, który określa zasady opracowywania kandydatów na normy zharmonizowane w kontekście CPR, każda norma odnosząca się do charakterystyk środowiskowych powinna zawierać dedykowany rozdział zatytułowany „Charakterystyki środowiskowe oparte na analizie cyklu życia (LCA)”.

Sekcja ta powinna być oparta na:

- normie EN 15804+A2:2019 – Zrównoważone wyroby budowlane – Deklaracje środowiskowe typu III – Zasady podstawowe dotyczące kategorii wyrobów budowlanych), oraz
- sektorowym dokumencie uzupełniającym (c-PCR) - dla prefabrykowanych wyrobów betonowych norma EN 16757:2022.

Normy PCR (Product Category Rules), w tym ich sektorowe uzupełnienia c-PCR (complementary Product Category Rules), stanowią dokumenty techniczne definiujące zasady opracowywania deklaracji środowiskowych typu III (EPD – Environmental Product Declarations). Określają m.in. jednostki funkcjonalne, zakresy cyklu życia, metody alokacji danych oraz minimalne wymagania dotyczące analiz środowiskowych. Dla prefabrykatów betonowych dokumentem odniesienia w tym zakresie jest norma EN 16757:2022, która zawiera m.in.:

- Klasyfikację prefabrykatów na grupy funkcjonalne (np. ściany, słupy, belki, płyty stropowe, elementy mostowe, schody),
- Jednostki funkcjonalne stosowane w analizie cyklu życia, takie jak:
 - 1 m² powierzchni użytkowej o określonej trwałości i nośności,
 - 1 m³ objętości wyrobu,
 - 1 sztuka standardowego elementu,
 - czas życia referencyjnego (RSL – Reference Service Life), z reguły przyjmowany jako 50 lat,
- Zakresy graniczne systemu LCA – obejmują moduły A1–A3 (faza produkcji: pozyskanie surowców, transport i proces wytwarzania), A4–A5 (faza budowy: transport na plac budowy i montaż), B1–B7 (faza użytkowania: eksploatacja, konserwacja, naprawy, modernizacje, wymiany, zużycie energii i wody), C1–C4 (faza końca życia: demontaż, transport, przetwarzanie i unieszkodliwianie) oraz moduł D (obciążenia i korzyści poza systemem).
- Zasady alokacji danych dotyczących surowców, energii, transportu oraz recyklingu – w tym podział wpływów środowiskowych pomiędzy współprodukty i odpady,
- Definicje i wymagania dotyczące wskaźników środowiskowych, takich jak: GWP-total, zużycie energii, potencjał zakwaszenia, eutrofizacji, ODP i inne,
- Wymogi dotyczące przejrzystości oraz kompletności danych wejściowych stosowanych w modelu LCA,
- Format i sposób raportowania wyników w deklaracji – w tym struktura tabel, zasady zaokrągleń i wymagane informacje techniczne.

Norma prEN 18190 będzie oparta na powyższych dokumentach, tworząc swoją strukturę według zasady: norma hEN + EN 15804 + c-PCR (EN 16757). Zgodnie z założeniami, odniesienie do normy PCR zostanie zawarte w załączniku ZA, który jednocześnie określi przypisanie systemu AVCP 3+, umożliwiając tym samym deklarowanie środowiskowych cech zasadniczych. Rozwiązanie to pozwoli na ich formalne ujęcie w deklaracji właściwości użytkowych (DoP) – obok klasycznych właściwości użytkowych.

W projekcie wspólnej normy zharmonizowanej dla prefabrykowanych wyrobów betonowych (opracowywanej zgodnie z wnioskiem normalizacyjnym C(2025)2125) przewidziano możliwość deklarowania 36 cech środowiskowych w ramach kategorii „sustainability” (zrównoważony rozwój), obejmujących m.in.:

- całkowity potencjał globalnego ocieplenia (GWP),
- emisje gazów cieplarnianych pochodzenia kopalnego i biogenicznego,
- zużycie zasobów pierwotnych (odnawialnych i nieodnawialnych),
- zużycie wody,
- ilość wytwarzanych odpadów,
- możliwość ponownego użycia, recyklingu i odzysku,
- zawartość węgla biogenicznego (jeśli dotyczy),
- wskaźniki wpływu na środowisko, takie jak: zakwaszenie, eutrofizacja, zubożenie warstwy ozonowej, tworzenie ozonu fotochemicznego, toksyczność (rakotwórcza i nierakotwórcza), ekotoksyczność, emisja pyłów, promieniowanie jonizujące oraz zmiany w użytkowaniu gruntów.

Przewiduje się, że prace nad normą prEN 18190 zakończą się do końca 2026 roku, natomiast jej publikacja w Dzienniku Urzędowym Unii Europejskiej nastąpi najwcześniej w 2027 roku – po pełnym zatwierdzeniu przez CEN i ocenie przez Komisję Europejską. Oznacza to, że w najbliższych 2–3 latach dokument ten pozostanie na etapie projektu i konsultacji.

Warto podkreślić, że prEN 18190 powstaje jako dokument przejściowy, odnoszący się do rozporządzenia CPR 305/2011 oraz aktu delegowanego 2024/2769. Nie będzie on jeszcze implementował wymagań nowego rozporządzenia CPR 2024/3110. Jego podstawową rolą jest umożliwienie wcześniejszego wdrożenia systemowej oceny środowiskowej w przemyśle – przed wejściem w życie nowych przepisów. Dokument ten pełnić będzie zatem funkcję pomostu legislacyjnego, wspierającego realizację celów Europejskiego Zielonego Ładu.

Docelowo norma prEN 18190 ma stanowić podstawę do oznakowania CE. Istniejące obecnie normy zharmonizowane, po zakończeniu okresu przejściowego, zostaną wycofane, a producenci zobowiązani będą do uzyskania nowych certyfikatów zgodności zakładowej kontroli produkcji, przygotowania nowych etykiet oraz opracowania nowych deklaracji właściwości użytkowych. Teoretycznie norma ta ma docelowo zastąpić wszystkie dotychczasowe normy zharmonizowane – jednak z uwagi na ich znaczną objętość, scenariusz ten wydaje się mało realny. Bardziej prawdopodobny wydaje się model, w którym norma prEN 18190 będzie ograniczona jedynie do załącznika ZA oraz sekcji dotyczących cech środowiskowych, natomiast w

zakresie właściwości technicznych będzie odwoływała się do poszczególnych norm zharmonizowanych, które jednak nie będą już pełniły funkcji norm zharmonizowanych.

Konsekwencje i wyzwania dla producentów prefabrykatów.

Wprowadzenie systemu AVCP 3+ dla prefabrykowanych wyrobów betonowych wiąże się z koniecznością opracowania oceny cyklu życia (LCA) zgodnie z wymaganiami norm EN 15804 oraz EN 16757. Dane środowiskowe będą podlegać obowiązkowej weryfikacji przez jednostkę notyfikowaną, co oznacza, że muszą być kompletne, spójne oraz oparte na transparentnych i możliwych do zweryfikowania źródłach. Wymaga to od producentów wdrożenia nowych rozwiązań organizacyjnych i technicznych, w tym m.in. rozbudowy systemu zakładowej kontroli produkcji o komponent środowiskowy, opracowania i wdrożenia procedur zbierania danych oraz przeszkolenia personelu w zakresie metodyki LCA i obsługi odpowiednich narzędzi informatycznych.

Realizacja tych obowiązków będzie wiązała się z koniecznością zakupu specjalistycznego oprogramowania, zdefiniowania standardowych cykli życia produktów oraz stworzenia mechanizmów gromadzenia danych materiałowych, energetycznych i transportowych.

Wyzwania wdrożeniowe związane z prEN 18190 wynikają nie tylko ze złożoności samego systemu AVCP 3+, lecz także z niedostatecznego przygotowania rynku do realizacji obowiązkowej oceny środowiskowej w sposób spójny i porównywalny. Kluczową barierą pozostaje brak ujednoliconego zaplecza danych i narzędzi obliczeniowych. Obecnie nie istnieje wspólna, obowiązkowa baza danych, która mogłaby być stosowana zarówno przez producentów, jak i jednostki przygotowujące analizy LCA. Jedyna oficjalna baza wskazana przez Komisję Europejską – European Platform on LCA (EPLCA) – ma ograniczony zakres i niewystarczający poziom szczegółowości, przez co nie znajduje szerokiego zastosowania w praktyce przemysłowej.

W efekcie podmioty realizujące obliczenia środowiskowe wykorzystują własne, komercyjne lub eksperckie bazy danych, oparte na różnorodnych założeniach i poziomach agregacji informacji. Brak jednolitego źródła danych oraz brak referencyjnego oprogramowania skutkuje tym, że nawet przy zachowaniu zgodnej metodologii LCA, wyniki analiz mogą znacząco się różnić w zależności od zastosowanego modelu. W obecnych warunkach trudno zatem mówić o wspólnym podejściu do oceny środowiskowej prefabrykatów betonowych w skali europejskiej.

Należy zauważyć, że deklaracja środowiskowa staje się obecnie integralnym elementem dokumentacji wyrobu – nie tylko w związku z wprowadzeniem systemu AVCP 3+, lecz przede wszystkim w odpowiedzi na rosnące wymagania rynku. Zagadnienie to nabiera szczególnego znaczenia w kontekście przewidywanego wzrostu liczby zamówień publicznych uwzględniających kryteria środowiskowe oraz nadchodzącego obowiązku obliczania śladu węglowego budynków, przewidzianego w nowelizowanej dyrektywie w sprawie charakterystyki energetycznej budynków (EPBD – Energy Performance of Buildings Directive). Nowe wymagania tej dyrektywy,

uzgodnione na poziomie Unii Europejskiej, obejmują m.in. konieczność raportowania całkowitego śladu węglowego w całym cyklu życia budynku.

8. Kluczowe zmiany wprowadzone przez CPR 2024/3110

Choć prefabrykowane wyroby betonowe przez najbliższe lata pozostaną nadal objęte przepisami rozporządzenia CPR 305/2011 – a ich ocena środowiskowa będzie realizowana na podstawie aktu delegowanego 2024/2769 – już dziś zasadne jest szczegółowe przeanalizowanie zmian wprowadzanych przez nowe rozporządzenie CPR 2024/3110. Dokument ten określa kierunek przyszłego rozwoju unijnego systemu oceny zgodności i zapowiada obowiązki, które w kolejnych etapach obejmą również sektor prefabrykacji.

Rozporządzenie CPR 2024/3110, przyjęte 27 listopada 2024 r. i obowiązujące od 7 stycznia 2025 r., stanowi najdalej idącą reformę ram prawnych dla wyrobów budowlanych od ponad dekady. Jego pełne wdrożenie zaplanowano do roku 2040, a zasadniczym celem jest stworzenie nowoczesnego, cyfrowego i zrównoważonego systemu oceny zgodności obowiązującego na całym terytorium Unii Europejskiej.

Do kluczowych zmian wprowadzonych przez CPR 2024/3110 należą:

- rozszerzenie zakresu wymagań zasadniczych o charakterystyki środowiskowe wyrobu,
- poszerzenie kręgu podmiotów objętych przepisami – oprócz producentów nowe obowiązki będą dotyczyć również importerów, dystrybutorów, właścicieli danych technicznych, dostawców oprogramowania oraz operatorów platform internetowych,
- uznanie systemu AVCP 3+ jako obowiązkowego dla środowiskowych właściwości zasadniczych – dane takie jak całkowity ślad węglowy (GWP), zużycie zasobów czy emisje biogeniczne będą wymagały walidacji przez jednostkę notyfikowaną, zgodnie z rozporządzeniem i normą PN-EN ISO/IEC 17029,
- wprowadzenie cyfrowego paszportu wyrobu jako podstawowej formy dokumentacji technicznej – interpretacyjnego z systemami unijnymi,
- możliwość stosowania aktów delegowanych i wykonawczych – w sytuacji opóźnień w procesie normalizacyjnym Komisja Europejska będzie mogła przyjmować własne regulacje techniczne, równoważne normom zharmonizowanym (hEN).

Choć sektor prefabrykowanych wyrobów betonowych zostanie formalnie objęty nowymi przepisami CPR dopiero po opublikowaniu właściwej normy zharmonizowanej, zmiany wprowadzone przez CPR 2024/3110 już teraz wyznaczają kierunek dalszych działań:

- deklarowanie cech środowiskowych stanie się obowiązkowe dla wszystkich zakładów, niezależnie od skali działalności,
- wymagana będzie pełna cyfryzacja dokumentacji technicznej, obejmująca dane środowiskowe oraz informacje dotyczące całego cyklu życia wyrobu,
- system AVCP 3+ zostanie na stałe przypisany do środowiskowych właściwości zasadniczych, co oznacza konieczność współpracy z jednostką notyfikowaną.

Rozporządzenie CPR 2024/3110 zapowiada tym samym nie tylko zmianę treści przepisów, lecz także transformację podejścia do oceny wyrobów budowlanych – od modelu skoncentrowanego wyłącznie na parametrach technicznych, do systemu uwzględniającego również aspekty środowiskowe i cyfrowe. Transparentność informacji oraz jakość danych środowiskowych będą miały coraz większe znaczenie dla możliwości wprowadzenia wyrobu do obrotu oraz jego konkurencyjności na rynku europejskim.

9. Podsumowanie

Rozporządzenie CPR 2024/3110 stanowi najistotniejszą reformę unijnego systemu regulacyjnego dla wyrobów budowlanych od czasu wejścia w życie CPR 305/2011. Wprowadza ono zasadnicze zmiany w podejściu do oceny zgodności, dokumentowania właściwości wyrobu oraz zasad jego funkcjonowania na rynku, z wyraźnym akcentem na aspekty środowiskowe i cyfryzację procesów.

Choć prefabrykowane wyroby betonowe pozostaną jeszcze przez kilka lat objęte dotychczasowymi przepisami CPR 305/2011 – przy równoległym stosowaniu systemu AVCP 3+ w oparciu o akt delegowany 2024/2769 – już na obecnym etapie konieczne jest przygotowanie się do nadchodzących obowiązków wynikających z CPR 2024/3110. Nowe ramy prawne wprowadzają m.in. obowiązek deklarowania cech środowiskowych, stosowania cyfrowego paszportu wyrobu, interoperacyjnej dokumentacji technicznej oraz rozszerzoną odpowiedzialność producentów i pozostałych uczestników rynku.

Kluczowym narzędziem wdrażania tych wymagań będzie projektowana norma zharmonizowana prEN 18190, dedykowana prefabrykatom betonowym. Jej struktura zakłada połączenie właściwości użytkowych wyrobu z oceną środowiskową (AVCP 3+), prowadzoną zgodnie z metodologią LCA opartą na normach EN 15804 oraz EN 16757. Publikacja tej normy w Dzienniku Urzędowym Unii Europejskiej wyznaczy moment rozpoczęcia obowiązkowego stosowania nowych zasad dla całego sektora prefabrykacji.

W okresie przejściowym producenci powinni aktywnie śledzić rozwój przepisów prawnych i procesów normalizacyjnych – w szczególności treść aktów delegowanych oraz zlecenia normalizacyjne opracowywane przez Komisję Europejską – i rozpocząć dostosowywanie systemów produkcyjnych, procedur oceny zgodności oraz dokumentacji technicznej do przyszłych wymagań. Choć nadchodzące regulacje są złożone i wymagające, stwarzają jednocześnie szansę na znaczące podniesienie poziomu jakości środowiskowej oraz transparentności informacji technicznej o wyrobach budowlanych w całej Unii Europejskiej.

Literatura:

- [1] Parlament Europejski i Rada UE. Rozporządzenie (UE) 2024/3110 z 27 listopada 2024 r. ustanawiające zharmonizowane zasady wprowadzania do obrotu wyrobów budowlanych i uchylające rozporządzenie (UE) nr 305/2011. EUR-Lex

- [2] Komisja Europejska. Rozporządzenie Delegowane (UE) 2024/2769 z 30 maja 2024 r. uzupełniające CPR 305/2011 w zakresie systemów AVCP dla charakterystyk środowiskowych. EUR-Lex
- [3] Parlament Europejski i Rada UE. Rozporządzenie (UE) nr 305/2011 z 9 marca 2011 r. ustanawiające warunki wprowadzania do obrotu wyrobów budowlanych (CPR). EUR-Lex
- [4] Komisja Europejska. Wniosek legislacyjny COM(2022) 144 final – 2022/0094(COD) (projekt nowego CPR). EUR-Lex
- [5] SWD(2019) 1770 – Ocena funkcjonowania rozporządzenia (UE) nr 305/2011.
- [6] KE. „Nowa strategia przemysłowa dla Europy” (COM(2020) 102 final).
- [7] KE. Plan działania UE dla gospodarki o obiegu zamkniętym (CEAP, COM(2020) 98 final).
- [8] KE. EU Standardisation Strategy (COM(2022) 31 final).
- [9] CEN-CENELEC Guide 36:2024 – Guidance on the rules for drafting candidate harmonised standards do CPR. CEN-CENELEC
- [10] CEN/CENELEC Instructions for the fast-track route, 23 VI 2023. CEN-CENELEC
- [11] EN 15804:2012 + A2:2019 – Sustainability of construction works – Environmental Product Declarations – Core rules.
- [12] EN 16757:2022 – Sustainability of construction works – Environmental Product Declarations – Product Category Rules for concrete and concrete elements
- [13] ISO/IEC 17029:2019 – Conformity assessment — General principles and requirements for validation and verification bodies.
- [14] Komisja Europejska. CPR Acquis Expert Group – Rejestr grup ekspertów, ID 3776. European Commission
- [15] ClimateEarth. „Key Takeaways from the EU’s Updated Construction Products Regulation Conference”, 6 XI 2024. climateearth.com

mgr inż. Magdalena Bardan
Instytut Techniki Budowlanej
prof. dr hab. inż. Czarnecki Lech
Sekretarz naukowy, Instytut Techniki Budowlanej

Ocena stopnia zrównoważenia hybrydowego betonu z recyklingu Assessment of the Sustainability Index of Hybrid Recycled Concrete

Streszczenie

Zrównoważone materiały budowlane są definiowane jako te wpisujące się w założenia gospodarki obiegu zamkniętego (CE). Kluczowe pytanie badawcze dotyczy identyfikacji materiałów wystarczająco zrównoważonych dla sektora budownictwa, ze szczególnym uwzględnieniem kruszyw z recyklingu (RA, z ang. Recycled Aggregate). Kolejne zagadnienie badawcze: w jakim stopniu beton zawierający RA (RAC, z ang. Recycled Aggregate Concrete) zbliża się do koncepcji idealnego betonu zrównoważonego? Z przeprowadzono wielokryterialną analizę betonu z dodatkiem RA, uwzględniając pięć aspektów: środowiskowy, ekonomiczny, społeczny oraz techniczne właściwości RA i RAC. Dane pozyskano autorską metodą ekstrakcji z wykorzystaniem narzędzi opartych na sztucznej inteligencji (AI). Holistyczna perspektywa, uwzględniająca synergię kluczowych czynników w sposób zintegrowany, pozwala na określenie poziomu idealnego betonu-RAC. W wyniku oceny nie znaleziono wyrobu posiadającego wszystkie pożądane cechy, określane w tym artykule jako „idealne właściwości kruszyw do betonu”. Beton z kruszywem naturalnym (NAC, z ang. Natural Agregate Concrete) charakteryzuje się niższym stopniem zrównoważenia niż RAC; osiąga on ok. 55 % maksymalnej wartości w skali ideału, jednak tylko wówczas, gdy jest stosowany zgodnie z określonym reżimem technologicznym. Wielokryterialna analiza stanowi zaawansowane narzędzie wspierające podejmowanie decyzji przez producentów, umożliwiając wskazanie rozwiązań proekologicznych o istotnym wpływie na środowisko. Kolejne badania pilotażowe pozwolą zweryfikować praktyczną użyteczność i skuteczność w identyfikacji zrównoważonych rozwiązań technologicznych w budownictwie.

Abstract

Sustainable building materials are defined as those aligned with the principles of the circular economy (CE). The key research question concerns the identification of materials that can be considered sufficiently sustainable for application in the construction sector, with particular emphasis on recycled aggregates (RA). A further research issue is the extent to which concrete containing RA—referred to as Recycled Aggregate Concrete (RAC)—approaches the concept of an ideal sustainable concrete. To address these questions, a multi-criteria analysis of RAC was conducted, incorporating five key aspects: environmental, economic, and social dimensions, as well as the technical properties of both RA and RAC. Data were obtained using a proprietary data extraction method based on artificial intelligence (AI) tools. A holistic perspective, integrating the synergy of these critical factors, enabled the assessment of the degree to which RAC approaches an ideal state. The evaluation revealed that no product exhibited all the desirable characteristics referred to in this paper as “ideal aggregate properties for concrete.” Concrete with natural aggregates (NAC) demonstrated a lower sustainability index compared to RAC—reaching approximately 55% of the maximum value on the ideal scale—but only under specific technological conditions. The applied multi-criteria framework serves as an advanced decision-support tool for manufacturers, enabling the identification of environmentally friendly solutions with significant environmental and economic impact. Future pilot studies will aim to verify the practical applicability and effectiveness of this approach in identifying sustainable technological solutions for the construction industry.

1. Wprowadzenie

Kruszywa z recyklingu, uzyskiwane poprzez rozdrobnienie gruzu pochodzącego z rozbioru budynków – w tym również obiektów zniszczonych na skutek klęsk żywiołowych, takich jak powodzie czy silne wiatry – stanowią obiecującą alternatywę dla kruszyw naturalnych w produkcji betonu [1–5]. Z technicznego punktu widzenia, RA to kruszywa naturalne pokryte pozostałościami pierwotnej zaprawy cementowej [6]. Wykorzystanie RA jest szczególnie istotne w kontekście ograniczania eksploatacji surowców naturalnych oraz redukcji ilości odpadów budowlanych (CDW) trafiających na wysypiska [7–9]. Pomimo licznych doniesień naukowych potwierdzających zalety zastosowania RA, ich wykorzystanie w produkcji betonu konstrukcyjnego na skalę przemysłową nadal pozostaje marginalne [10]. Na tym tle rodzi się zasadnicze pytanie: czy beton z dodatkiem kruszyw z recyklingu wpisuje się w założenia gospodarki cyrkularnej? Z perspektywy narzędzi opartych na sztucznej inteligencji odpowiedź brzmi jednoznacznie – TAK [11]. Jednak przy bardziej krytycznym podejściu należy zauważyć, że istnieją bariery ograniczające ten proces. Wymagają one dalszej analizy, aby wyznaczyć nowe kierunki rozwoju zrównoważonych rozwiązań betonowych opartych na wykorzystaniu RA [12].

Niniejszy artykuł stanowi opracowanie przeglądowe, którego głównym celem jest ocena możliwości zastosowania betonu RAC jako zamiennika dla tradycyjnego betonu opartego na kruszywie naturalnym (NAC). W badaniu zastosowano oryginalną metodologię wielokryterialnej oceny, która w sposób zintegrowany uwzględniała czynniki

środowiskowe, ekonomiczne, społeczne oraz techniczne, ze szczególnym naciskiem na jakość RA oraz ich oddziaływanie na właściwości eksploatacyjne i trwałość betonu RAC, co pozwoliło na identyfikację potencjalnych barier oraz możliwości wdrożenia tych materiałów w budownictwie zrównoważonym. Opracowano oryginalną metodę ekstrakcji danych literaturowych z wykorzystaniem narzędzi sztucznej inteligencji (AI), która stanowiła podstawę przeprowadzonych analiz. Do oceny wyników zastosowano oryginalną metodę punktową opartą na skali „idealnych właściwości kruszyw do betonu” dla każdego z analizowanych aspektów, co umożliwiło przejrzystą prezentację wyników i ich interpretację.

2. Materiały i metody

2.1. Metody

Celem przeprowadzonych analiz było określenie, w jakim stopniu RAC spełnia kryteria zrównoważonego rozwoju w porównaniu do NAC. Opracowano autorską, czteroetapową metodykę, integrującą przegląd literatury z wykorzystaniem narzędzi sztucznej inteligencji (AI), ocenę wskaźnikową oraz analizę porównawczą kluczowych cech środowiskowych, ekonomicznych, społecznych i technicznych. Podejście to umożliwiło kompleksową ocenę potencjału zastosowania kruszyw z recyklingu w budownictwie zrównoważonym.

W etapie I – opracowano zestaw kluczowych aspektów i wskaźników zrównoważenia w oparciu o pożądane cechy produktu – na podstawie przeglądu literatury [13-24] zidentyfikowano pięć aspektów zrównoważenia: środowiskowy, ekonomiczny, społeczny, jakość kruszywa oraz właściwości betonu. Dla każdego aspektu dobrano trzy kluczowe wskaźniki, które umożliwiały identyfikację zalet i wad materiałów z uwzględnieniem analizy cyklu życia. W kontekście środowiskowym skupiono się na: emisji CO₂ w trakcie produkcji, zużyciu zasobów naturalnych oraz składowaniu odpadów. W ujęciu ekonomicznym analizowano: koszty produkcji, transportu oraz utylizacji odpadów. W obszarze społecznym uwzględniono: poziom akceptacji społecznej, przejrzystość przepisów oraz wpływ na projektowanie receptur betonowych. Dla jakości kruszyw analizowano: zawartość zanieczyszczeń, nasiąkliwość, odporność na rozkruszanie oraz jednorodność partii. W aspekcie właściwości betonu analizowano wpływ na trwałość, reologię mieszanki i wytrzymałość betonu.

W etapie II – dokonano klasyfikacji wyników względem pożądanych cech produktu zrównoważonego - dokonano ekstrakcji danych - wykorzystano narzędzie AI (consensus.app) do pozyskania 100 publikacji z ponad 500 baz danych. Przeprowadzono selekcję treści na podstawie pytań analitycznych dotyczących RA, NA. Odpowiedzi sklasyfikowano jako: pozytywny wpływ, możliwy wpływ, negatywny wpływ.

W etap III – dokonano wielowymiarowej oceny cech zrównoważonego produktu – opracowano skalę oceny - kruszyw i betonów z ich udziałem, na podstawie udziału procentowego odpowiedzi. Przyjęto pięciostopniową skalę (1–5), od „nieakceptowalne” do „bardzo korzystne”.

W etapie IV - zidentyfikowano kluczowe wskaźniki zrównoważenia wpływających na efektywne zastosowanie RA- wpływające na skuteczność zastosowania RA. Wyniki przedstawiono graficznie, co umożliwiło wskazanie kierunków optymalizacji oraz ocenę potencjału materiałów w kontekście zrównoważonego budownictwa.

2.2. Materiały

Przedmiotem analizy były dwa rodzaje kruszyw stosowanych w produkcji betonu: kruszywa naturalne (NA) oraz kruszywa z recyklingu (RA), a także betony z ich udziałem. Dane pozyskano na podstawie przeglądu literatury naukowej oraz obowiązujących norm [24–26]. Na rysunku 1 zaprezentowano zdjęcia przedstawiające różnorodną budowę ziaren kruszywa tych kruszyw.



(a) NA, z ang Natural Aggregate



(b) RA, z ang Recycled Aggregate

Rys.1. Struktura ziaren kruszywa grubego (a) naturalnego oraz (b) z recyklingu

Kruszywa naturalne (NA) pozyskiwane są w wyniku mechanicznej obróbki skał i cechują się niską porowatością, korzystną gęstością oraz stabilnymi właściwościami fizykochemicznymi. Kruszywa z recyklingu (RA) powstają z rozdrobnienia materiałów rozbiórkowych, takich jak beton czy cegły, i charakteryzują się wyższą porowatością, niejednorodnością oraz zmiennymi parametrami technicznymi, wynikającymi z obecności pierwotnej zaprawy cementowej na powierzchni ziaren. Wymagają one zwiększonego nadzoru i częstszej kontroli jakości w celu zapewnienia powtarzalności partii. Według danych z 2022 roku, w Europie wyprodukowano około 2,5 mld ton kruszyw naturalnych oraz 295 mln ton RA, z czego najwięcej wytworzono w Niemczech (80 mln ton), Francji (65,9 mln ton) i Niderlandach (23,5 mln ton) [27]. Zgodnie z normą [24], dopuszcza się stosowanie RA w betonie, pod warunkiem spełnienia odpowiednich klas ekspozycji oraz ograniczeń procentowego udziału w mieszance. Norma rozróżnia dwa typy RA (A i B) i określa metody badań, uwzględniające takie parametry jak kształt ziaren, odporność na rozkruszanie czy zawartość zanieczyszczeń. Chociaż wiele właściwości RA można ocenić podobnie jak NA, ze względu na ich zmienność materiałową konieczne jest rozwinięcie bardziej szczegółowych kryteriów jakości, które pozwoliłyby lepiej określić ich potencjalne zastosowania w budownictwie zrównoważonym.

3. Wyniki

Na podstawie sformułowanych pytań badawczych do pięciu aspektów środowiskowych, ekonomicznych, społecznej percepcji oraz jakości kruszyw i właściwości betonu, przeanalizowano po 50 publikacji dla każdego rodzaju kruszywa: RA oraz NA (łącznie 100 źródeł), w odniesieniu do każdego z wymienionych aspektów. W treści artykułów zidentyfikowano po trzy wskaźniki dla każdego aspektu. Na podstawie zebranych danych, wpływ został sklasyfikowany do jednej z trzech kategorii oceny: wpływ pozytywny, potencjalnie pozytywny oraz wpływ negatywny. Uzyskane wyniki zostały zregulowane i poddane analizie statystycznej, co umożliwiło określenie procentowego udziału każdej kategorii wpływu. Szczegółowe wyniki oceny oraz pełna bibliografia znajdują się w artykule „Green Recycled Aggregate in Concrete: Feasibility Study” [28]. Zestawienie wyników przedstawiono w tabeli 1.

Tab. 1. Podsumowanie punktów i ocen w odniesieniu do „idealnych cech kruszyw”

Aspekt	Kruszywa naturalne (NA)	Kruszywa z recyklingu (RA)	Modelowe kruszywo – ideał zrównoważenia
Środkowy	2	10	10
Ekonomiczny	4	6	10
Społeczny	1	5	10
Techniczny – jakość kruszyw	6	1	10
Techniczny – trwałość betonu	6	5	10
Suma punktów	17	27	10

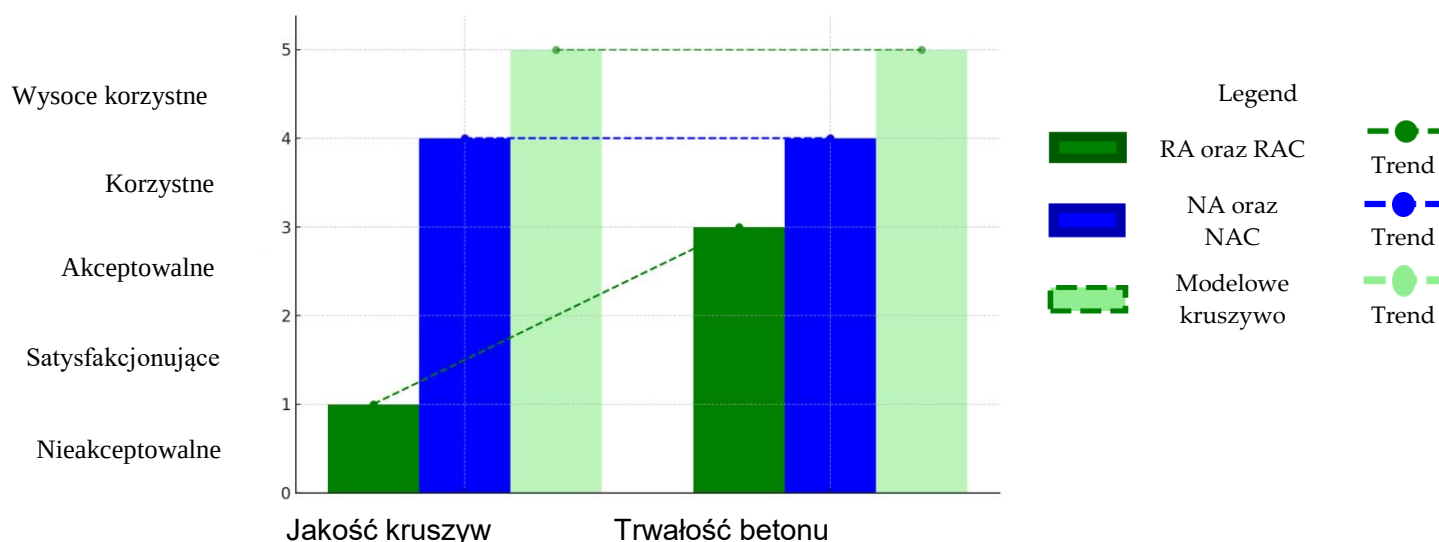
Na podstawie zsumowanych wyników punktowych przedstawionych w powyższej tabeli dokonano oceny poszczególnych aspektów. Ocena została przeprowadzona na podstawie przyjętej skali „idealnych właściwości kruszyw”, odnosząc się do wyników uzyskanych dla poszczególnych rodzajów kruszyw w pięciu kluczowych aspektach. Podsumowanie dotyczy odpowiedzi na pytania sformułowane w etapie II, których celem było określenie wpływu danego kruszywa na dany aspekt zrównoważenia. Zgodnie z autorską metodą punktową, końcowe oceny przedstawiają się następująco: Kruszywo z recyklingu (RA) uzyskało 16 punktów, co świadczy o jego wysokim potencjale w aspektach środowiskowym i ekonomicznym, przy jednoczesnym wskazaniu konieczności poprawy jakości technicznej. Kruszywo naturalne (NA) osiągnęło 13 punktów – potwierdzając bardzo dobrą jakość techniczną i korzystny wpływ na właściwości betonu, jednak jego wynik obniżyły czynniki środowiskowe i wysokie koszty produkcji. Maksymalna możliwa liczba punktów – 25 – symbolizuje pełne spełnienie kryteriów zrównoważonego rozwoju. Żadne z badanych kruszyw nie osiągnęło tej wartości. Ostateczne wyniki wskazują, że mimo istotnych zalet, każde z analizowanych kruszyw wymaga dalszych działań optymalizacyjnych, aby mogło w pełni odpowiadać wymaganiom nowoczesnego budownictwa zrównoważonego. Zestawienie wyników zawarto w tabeli 2.

Tab. 2. Podsumowanie punktów i ocen w odniesieniu do „idealnych cech kruszyw”

Aspekt	Kruszywa naturalne (NA)	Kruszywa z recyklingu (RA)	Modelowe kruszywo – ideał zrównoważenia
Środkowy	2 – zadawalające	5 – wysoce korzystne	5
Ekonomiczny	2 – zadawalające	4 - korzystne	5
Społeczny	1 - nieakceptowalne	3 - akceptowalne	5
Techniczny – jakość kruszyw	4 - korzystne	1 - nieakceptowalne	5
Techniczny – trwałość betonu	4 - korzystne	3 - akceptowane	5
Suma punktów	13	16	25

Rozważając aspekty jakości kruszyw oraz ich wpływ na jakość betonu, kruszywo naturalne (NA) uzyskało w obu kategoriach ocenę 4, co potwierdza jego wysoką jakość oraz pozytywny wpływ na właściwości betonu. W porównaniu z NA, kruszywo z recyklingu (RA) wypadło słabiej, uzyskując najniższą ocenę – 1 „nieakceptowalne”. Warto jednak zaznaczyć, że po zastosowaniu RA w mieszance betonowej, jego końcowa ocena wzrosła o dwa punkty, co wskazuje na możliwość zneutralizowania negatywnego wpływu jakości RA poprzez zastosowanie odpowiedniego reżimu technologicznego, szczególnie przy optymalnym udziale 25–30%, przy którym właściwości betonu pozostają na akceptowalnym poziomie. Wyniki ocen przedstawiono na rysunku 2.

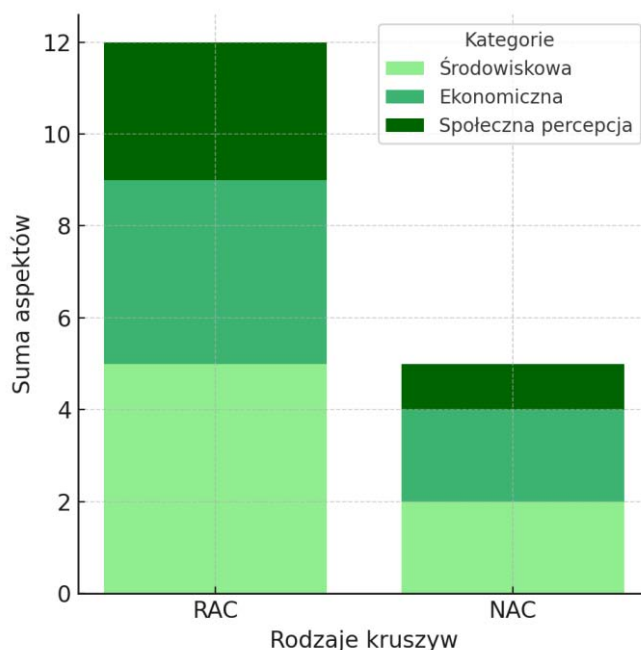
Ocena zrównoważenia kruszyw RA, NA oraz betonów RAC, NAC



Rys. 2. Wyniki oceny kruszyw RA, NA oraz betonów je zawierających w odniesieniu do pożądaných cech produktu zrównoważonego, na podstawie autorskiego systemu punktacji w zakresie tytułu wukresukresie jakości kruszywa i właściwości betonu.

Zastosowana skala punktowa odzwierciedla stopień spełnienia pożądanych cech materiału zrównoważonego, natomiast linie trendu ilustrują ogólne tendencje w analizowanych aspektach. W aspekcie środowiskowym, wszystkie 10 opinii (100%) dotyczących betonu z RA potwierdziły jego pozytywny wpływ ekologiczny. W przyjętej skali ocen sklasyfikowano ten wynik jako 5 – „bardzo korzystny”, co oznacza, że RA spełnia kryteria materiału zrównoważonego. Zastosowanie RA w betonie pozwala znacząco ograniczyć eksploatację kruszyw naturalnych, przyczyniając się do ochrony zasobów środowiskowych. Dla porównania, NA otrzymało niższą ocenę – 2 „zadowalającą”, co wynika głównie z wysokiej emisji CO₂ oraz wpływu na degradację środowiska naturalnego. W zakresie ekonomicznym, RA uzyskało najwyższą ocenę – 4 „korzystną”, wskazując na istotne możliwości redukcji kosztów produkcji i transportu. NA wypadło słabiej, uzyskując ocenę 2 „zadowalającą”, co związane jest z wyższymi kosztami pozyskiwania i dostarczania surowca. W aspekcie percepcji społecznej, RA uzyskało ocenę 3 „akceptowalną”, natomiast NA – 1 „nieakceptowalną”. Pozytywne opinie w przypadku RA odnosiły się głównie do doświadczenia producentów betonu w projektowaniu receptur z wykorzystaniem materiałów pochodzących z recyklingu. W przypadku NA niska ocena może wynikać z rosnącej świadomości środowiskowej oraz preferencji dla rozwiązań bardziej ekologicznych.

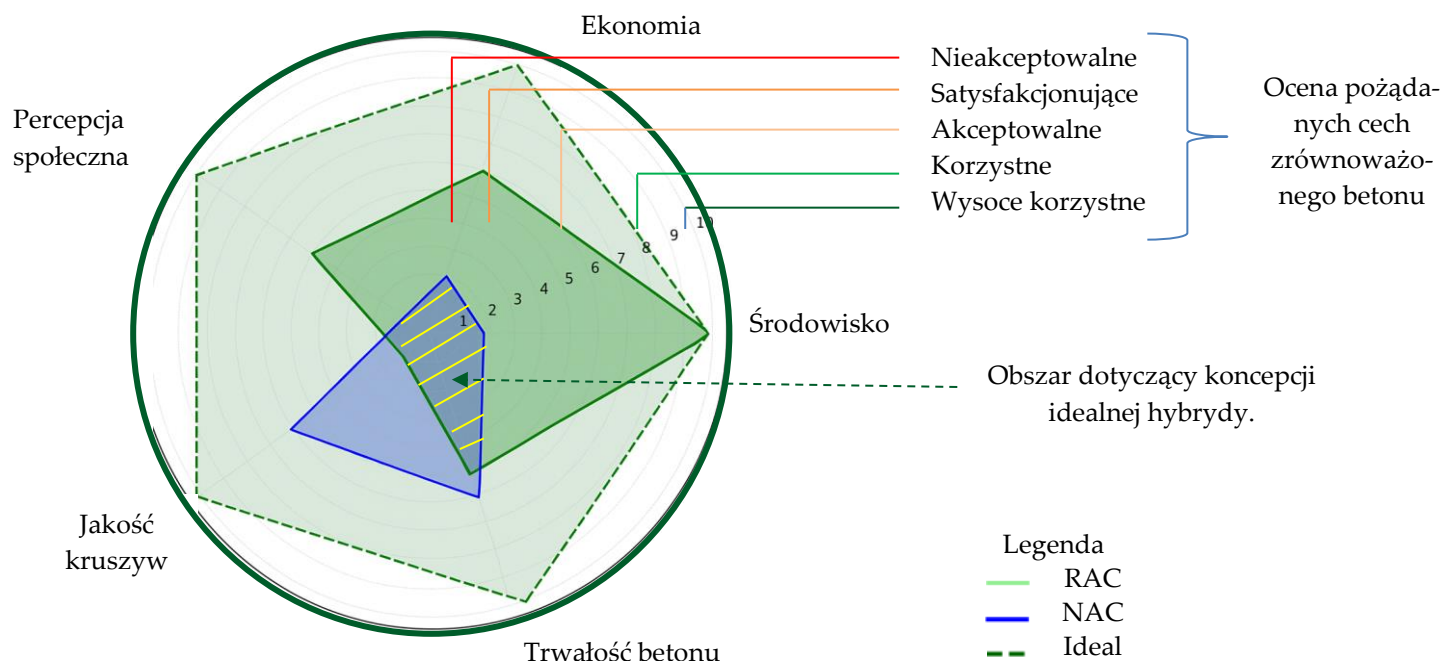
Żadne z badanych kruszyw nie spełnia w pełni wszystkich kryteriów zrównoważonego rozwoju. RA osiąga najlepsze wyniki w aspektach środowiskowym i ekonomicznym, co potwierdza jego duży potencjał w kontekście zrównoważonego budownictwa. Z kolei NA pozostaje najbardziej korzystne pod względem parametrów technicznych oraz wpływu na właściwości mieszanki betonowej. Zestawienie wyników punktowych zaprezentowano na rysunku 3.



Rys. 3. Wyniki oceny kruszyw RA, NA oraz betonów z ich udziałem w odniesieniu do pożądanych cech produktu zrównoważonego, na podstawie autorskiego systemu punktowego dla trzech aspektów: środowiskowego, ekonomicznego i społecznego

Dane zamieszczone na wykresie wskazują, że RAC jest najbardziej zrównoważonym rozwiązaniem spośród analizowanych materiałów, szczególnie w aspektach środowiskowym i ekonomicznym, co podkreśla jego potencjał jako materiału wspierającego zrównoważony rozwój. Dla porównania, NAC uzyskuje najniższe wyniki w „zielonych” kategoriach, co można przypisać jego negatywnemu wpływowi na środowisko oraz ograniczonej akceptacji społecznej – co stanowi wyzwanie dla jego postrzegania jako rozwiązania zgodnego z zasadami budownictwa zrównoważonego.

Przeprowadzona kompleksowa analiza pozwoliła na wskazanie kluczowych wskaźników mających istotny wpływ na ocenę zrównoważenia materiałów budowlanych. Wyniki zaprezentowano w formie punktowej i graficznej, co umożliwiło ocenę zalet i ograniczeń każdego z analizowanych rozwiązań. Takie podejście pozwoliło zidentyfikować obszary wymagające optymalizacji oraz cechy szczególnie sprzyjające rozwojowi zrównoważonemu. Porównując zrównoważony charakter RAC i NAC można wyróżnić dwie kluczowe kwestie. Po pierwsze, w ogólnej punktacji RAC uzyskało lepszy wynik — 27 punktów w porównaniu do 17 punktów zdobytych przez NAC. Po drugie, analizując punktację podzieloną na dwie grupy aspektów — pierwsza obejmuje kwestie środowiskowe, ekonomiczne oraz percepcję społeczną, natomiast druga — jakość kruszyw i ich wpływ na właściwości betonu — można zauważyć wyraźne różnice między tymi materiałami. RAC odgrywa kluczową rolę w pierwszej grupie, wyróżniając się jako zrównoważony produkt budowlany. Pozytywne aspekty z tej grupy stanowią aż 78% jego całkowitej oceny. Z kolei NAC dominuje w drugiej grupie dzięki wysokiej jakości kruszywa, co korzystnie wpływa na parametry betonu. W przypadku NAC, aspekty z pierwszej grupy stanowią jedynie 29% całkowitej oceny, co wskazuje na jego ograniczony wkład w zrównoważony rozwój w ujęciu środowiskowym i ekonomicznym. Beton z kruszywem z recyklingu osiągnął 54% wartości idealnej. Dla betonu z kruszywem naturalnym wartość ta wyniosła 34%. W kontekście środowiskowym beton z RAC uzyskał maksymalną liczbę punktów, a zatem wynik idealny.



Rys. Wizualizacja wskazuje kluczowy, wspólny obszar dla oceny zrównoważenia kruszyw.

Rys.4 przedstawia wyniki wielokryterialnej analizy, która ujawnia obszar wspólnych ograniczeń dotyczących wszystkich analizowanych typów kruszyw. Wskazany obszar skupia cechy uznane za nieakceptowalne zarówno dla samych kruszyw, jak i betonów, w których zostały one zastosowane. Zidentyfikowane problemy stanowią istotne bariery dla wdrażania zasad zrównoważonego rozwoju w budownictwie. Dla kruszyw naturalnych największe wyzwania wynikają z ich negatywnego wpływu na środowisko, w szczególności z emisji CO₂ oraz skutków procesu wydobywania. Z kolei RA charakteryzują się niższymi parametrami jakościowymi, co wpływa na ograniczenia techniczne stosowanych mieszanek. W tym kontekście coraz większe znaczenie zyskuje koncepcja betonu hybrydowego, która może stanowić kompromis między jakością a zrównoważeniem środowiskowym. RA (kruszony gruz betonowy) uzyskało najwyższy wynik w podsumowaniu wszystkich analizowanych aspektów.

4. Podsumowanie

Na podstawie Rysunków 2–4 naukowcy zidentyfikowali wspólne obszary, w których NA może być zastąpione kruszywem RA bez istotnego pogorszenia parametrów betonu, przy jednoczesnym zachowaniu korzyści wynikających ze zrównoważonego rozwoju. Na tej podstawie ponownie podkreślono istotną rolę betonu hybrydowego jako rozwiązania łączącego zalety obu rodzajów kruszyw. Inne istotne aspekty:

1. Optymalizacja ilości RA jako częściowego substytutu dla NA. Praktykowany poziom substytucji, przynoszący pozytywne efekty pod względem właściwości mechanicznych betonu RAC wynosi 25–30% [29]. Podobną analogię obserwuje się w mieszankach mineralno-asfaltowych, co podkreśla znaczenie precyzyjnego dostosowania proporcji RA w celu uzyskania optymalnych parametrów w obu materiałach [30]. Optymalne dozowanie RA skutecznie łagodzi problem jego heterogeniczności.
2. Ocena jakości RA jest kluczowa. Normy [24-26] dopuszczają stosowanie grubego kruszywa z recyklingu w betonie, jednak wymagania dotyczące jego jakości pozostają liberalne. Aby skuteczniej promować potencjał tego kruszywa w betonie, warto byłoby opracować i uzupełnić powszechnie obowiązujące dokumenty techniczne o precyzyjne kryteria oceny [31].
3. Analiza kosztów cyklu życia (LCA). Produkcja cementu ma największy wpływ na ograniczenie ilości równoważnika CO₂. Cement portlandzki odpowiada za 74–81% całkowitej emisji CO₂ związanej z betonem. Redukcja emisji CO₂ dzięki zastosowaniu RA wynosi ok 8%. Być może uwaga producentów cementu skupia się na rozwiązywaniu problemów związanych z wysoką emisją, przez co potencjał RA jest niedostatecznie dostrzegany. LCA to zatem narzędzie wspierające podejmowanie świadomych decyzji w zakresie wyboru zrównoważonych rozwiązań [32].
4. Promocja dobrych praktyk. Zamiast traktować odpady budowlane i rozbiórkowe (CDW) jako problem, należy je postrzegać jako wtórny surowiec o potencjale do generowania wartości ekonomicznej, np. poprzez recykling i produkcję nowych materiałów budowlanych. Taka zmiana podejścia wspiera gospodarkę o obiegu zamkniętym, zmniejszając marnotrawstwo zasobów i wpływ na środowisko [16-17]. Innym przykładem może być rozwój symbiozy przemysłowej, polegającej na efektywnej wymianie informacji, zasobów i technologii między

firmami i organizacjami [33]. Przykład udanego zastosowania grubego kruszywa z recyklingu na Sardynii również podkreśla znaczenie synergii między podmiotami [34].

5. Dodatki wspomagające rozwiązania hybrydowe. Wspierającym rozwiązaniem dla połączenia kruszyw naturalnych i z recyklingu mogą być zaawansowane domieszki, takie jak nanomateriały – szczególnie nano-krzemionka (NS), której zastosowanie wykazuje pozytywny wpływ na trwałość, mikrostrukturę i właściwości mechaniczne betonu z RA [35]. Inne badania wskazują, że włókna hybrydowe mogą wspierać zastosowanie RA w inżynierii budowlanej, dodatkowo zwiększając jego odporność na obciążenia dynamiczne [36-37]. Takie dodatki mogą również pochodzić z recyklingu, np. włókna z opon samochodowych [38].

5. Wnioski

Oparta na studium wykonalności analiza wielokryterialna pozwala na wszechstronną ocenę wzajemnych powiązań pomiędzy najważniejszymi aspektami wpływającymi na zrównoważony charakter produktów. Jest to zaawansowane narzędzie wspomagające podejmowanie decyzji, szczególnie przy prognozowaniu rzeczywistych korzyści finansowych i energetycznych. Warto jednak zaznaczyć, że efektywne zastosowanie tego podejścia wymaga elastycznego dostosowania do konkretnych uwarunkowań i potrzeb danego projektu. Holistyczna perspektywa, uwzględniająca wszystkie kluczowe cechy w sposób zintegrowany, a nie izolowany, pozwala na bardziej rzetelną i wiarygodną ocenę ich przydatności oraz potencjalnego wpływu:

1. Beton z kruszywem z recyklingu, który uzyskał najwyższą ocenę w analizie zrównoważonego rozwoju przeprowadzonej w ramach kompleksowego studium wykonalności, został uznany za najbardziej korzystne rozwiązanie spośród analizowanych, otrzymując oznaczenie „zielony”.
2. Obecnie nie zidentyfikowano żadnego produktu na świecie, który spełniałby wszystkie pożądane cechy zrównoważonego materiału, określone w niniejszym opracowaniu jako „cechy idealne kruszyw do betonu”. RAC osiągnął 54% w odniesieniu do wartości idealnej. Dla NAC wskaźnik ten wyniósł 38%.
3. Wizualizacja wyników zaawansowanej analizy pozwoliła na zidentyfikowanie wspólnego obszaru dla wszystkich typów kruszyw, który można uznać za kluczowy w ocenie ich zrównoważonego charakteru. Obszar ten obejmuje cechy nieakceptowalne, wspólne dla wszystkich rodzajów kruszyw i betonów, w których zostały one zastosowane, co wskazuje na istotne wyzwania wymagające rozwiązania. Z tej perspektywy koncepcja betonu hybrydowego wyłania się jako potencjalny model mogący równoważyć te ograniczenia.

Aby wyjaśnić, dlaczego kruszywo z recyklingu (RA) nie jest powszechnie stosowane na skalę przemysłową, proponujemy rewizję dominującego paradygmatu, w którym beton z kruszywem naturalnym (NA) uznawany jest za najbardziej zrównoważone rozwiązanie. Przeprowadzona analiza wykazała, że mimo swoich zalet, beton z NA istotnie odbiega od ideału materiału zrównoważonego, co podważa jego pełną zgodność z wymaganiami współczesnego zrównoważonego rozwoju.

Kolejne badania pilotażowe będą koncentrować się na walidacji narzędzia analizy wielokryterialnej w rzeczywistych projektach budowlanych, w celu oceny jego praktycznej przydatności i skuteczności w identyfikacji zrównoważonych rozwiązań na podstawie porównania różnych wariantów RAC.

8. Literatura

- [1] Czarnecki, L. , D. J. Sustainable construction: In search of a Promethean transformation. *Engineering and Construction* 2021.
- [2] Czarnecki, L. Sustainable construction products – a beautiful idea, a civilizational necessity, or a thermodynamic imperative? *Construction Materials* 2022.
- [3] Czarnecki L.; Justnes H. Sustainable & durable concrete. *Cement Lime Concrete* 2012.
- [4] Ren, P.; Ling, T. C.; Mo, K. H. Recent advances in artificial aggregate production. *J Clean Prod* 2021, 291.
- [5] Kim, J. Influence of quality of recycled aggregates on the mechanical properties of recycled aggregate concretes: An overview. *Constr Build Mater* 2022, 328.
- [6] Chen, J.; Dan, H.; Ding, Y.; Gao, Y.; Guo, M.; Guo, S.; Han, B.; Hong, B.; Hou, Y.; Hu, C.; et al. New innovations in pavement materials and engineering: A review on pavement engineering research 2021. *Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition)* 2021, 8, 815–999.
- [7] Delvoie, S.; Courard, L.; Hubert, J.; Zhao, Z.; Michel, F. *Construction and Demolition Wastes: specific conditions for recycling in North West Europe*; 2020.
- [9] Villoria Sáez, P.; Osmani, M. A diagnosis of construction and demolition waste generation and recovery practice in the European Union. *J Clean Prod* 2019, 241.
- [10] Kaptan, B. K.; Aguiar, J. L. B. Approaching Green Building Concept by Eco-Efficient Construction and Demolition Waste (CDW) in Portugal. *Springer Nature Switzerland*. 2023.
- [11] Consensus. Available online: <https://consensus.app/search/> (accessed on 11 December 2024).
- [12] Jorge de Brito, C. S. P. and B. Z. New Trends in Recycled Aggregate Concrete. 2019.
- [13] Jorge de Brito, C. S. P. and B. Z. New Trends in Recycled Aggregate Concrete. **2019**.
- [14] Hao, D. L. C.; Razak, R. A.; Kheimi, M.; Yahya, Z.; Abdullah, M. M. A. B.; Nergis, D. D. B.; Fansuri, H.; Ediat, R.; Mohamed, R.; Abdullah, A. Artificial Lightweight Aggregates Made from Pozzolanic Material: A Review on the Method, Physical and Mechanical Properties, Thermal and Microstructure. *Materials* 2022, 15.
- [15] Czarnecki, L. Sustainable construction materials: A beautiful idea, a civilizational necessity, or a thermodynamic imperative? *Construction Materials* **2022**.
- [16] Czarnecki L.; Justnes H. Sustainable & durable concrete. *Cement Lime Concrete* **2012**.
- [17] Kim, J. Influence of quality of recycled aggregates on the mechanical properties of recycled aggregate concretes: An overview. *Constr Build Mater* 2022, 328.
- [18] Czarnecki, L.; Woyciechowski, P. Prediction of the reinforced concrete structure durability under the risk of carbonation and chloride aggression. *Bulletin of the Polish Academy of Sciences: Technical Sciences* **2013**, 61, 173–181.
- [19] Kim, J.; Sadowski, Ł. The equivalent mortar volume method in the manufacturing of recycled aggregate concrete. *Czasopismo Techniczne* **2019**, 123–140.
- [20] Kim, J.; Grabiec, A. M.; Ubysz, A.; Yang, S.; Kim, N. Influence of Mix Design on Physical, Mechanical and Durability Properties of Multi-Recycled Aggregate Concrete. *Materials* **2023**, 16.

- [21] Ren, P.; Ling, T. C.; Mo, K. H. Recent advances in artificial aggregate production. *J Clean Prod* 2021, 291.
- [22] Kępnia, M. The influence of the recycled aggregate preparing method on selected technical characteristics of concrete. *Concrete Days Conference Tradition and Modernity. Cement Manufacturers Association*. 2023.
- [23] Kępnia, M.; Chyliński, F.; Łukowski, P.; Woyciechowski, P. Recycled Aggregate Integration for Enhanced Performance of Polymer Concrete. *Materials* 2024, 17.
- [24] European Committee for Standardization CEN EN 206:2013+A2:2021 Concrete -- Specification, performance, production and conformity.
- [25] European Committee for Standardization EN 12620:2002+A1:2008 Aggregates for concrete.
- [26] Polish Committee for Standardization PN-B-06265:2022-08 Concrete -- Specification, performance, production and conformity -- National Annex to PN-EN 206+A2:2021-08.
- [27] <https://www.aggregates-europe.eu/publications/>.
- [28] BARDAN, Magdalena; CZARNECKI, Lech. Green Recycled Aggregate in Concrete: Feasibility Study. *Materials*, 2025, 18.3: 488.
- [29] Sabău, M.; Bompă, D. V.; Silva, L. F. O. Comparative carbon emission assessments of recycled and natural aggregate concrete: Environmental influence of cement content. *Geoscience Frontiers* 2021, 12.
- [30] Visintin, P.; Xie, T.; Bennett, B. A large-scale life-cycle assessment of recycled aggregate concrete: The influence of functional unit, emissions allocation and carbon dioxide uptake. *J Clean Prod* 2020, 248.
- [31] Tošić, N. ; Marinković, S. ; Dašić, T. ; Stanić, M. Multicriteria optimization of natural and recycled aggregate concrete for structural use. *Journal of cleaner production*, 87, 766-776. 2015.
- [32] Sabău, M.; Bompă, D. V.; Silva, L. F. O. Comparative carbon emission assessments of recycled and natural aggregate concrete: Environmental influence of cement content. *Geoscience Frontiers* 2021, 12.
- [33] Yu, Y.; Yazan, D. M.; Bhochhibhoya, S.; Volker, L. Towards Circular Economy through Industrial Symbiosis in the Dutch construction industry: A case of recycled concrete aggregates. *J Clean Prod* 2021, 293.
- [34] Pani, L.; Rombi, J.; Francesconi, L.; Mereu, A. *Environmental Engineering and Management*; 2020; Vol. 19.
- [35] Zhang, X. , W. C. , W. J. , L. X. , H. Y. , W. L. , & D. Y. Experimental study on the compressive fatigue performance of nano-silica modified recycled aggregate concrete. *Construction and Building Materials*, 447, 138161. 2024.
- [36] Zhang, X.; Zhu, Y.; Wang, J.; Zhou, G.; Huang, Y. Analysis of Impact Crushing Characteristics of Steel Fiber Reinforced Recycled Aggregate Concrete Based on Fractal Theory. *Fractal and Fractional* 2024, 8, 505.
- [37] Zhang, X. , S. Y. , F. Y. , & G. X. Experimental study on the triaxial compression mechanical performance of basalt fiber-reinforced recycled aggregate concrete after exposure to high temperature. *Case Studies in Construction Materials*, 20, e03026. 2024.
- [38] Michalik, A.; Chyliński, F.; Bobrowicz, J.; Pichór, W. Effectiveness of Concrete Reinforcement with Recycled Tyre Steel Fibres. *Materials* 2022, 15.

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.

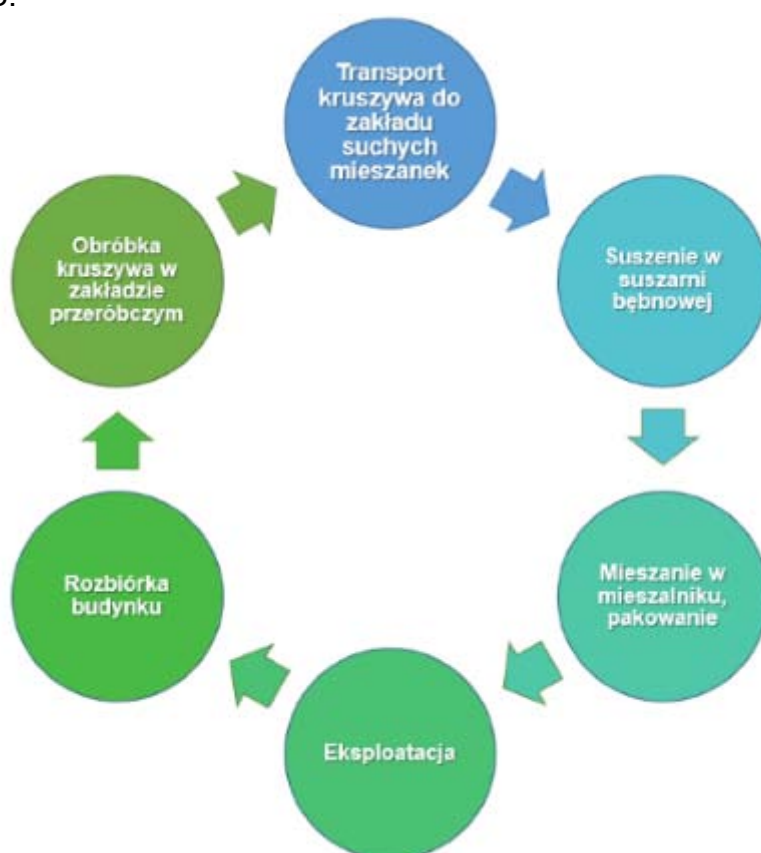
1. Wprowadzenie

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:

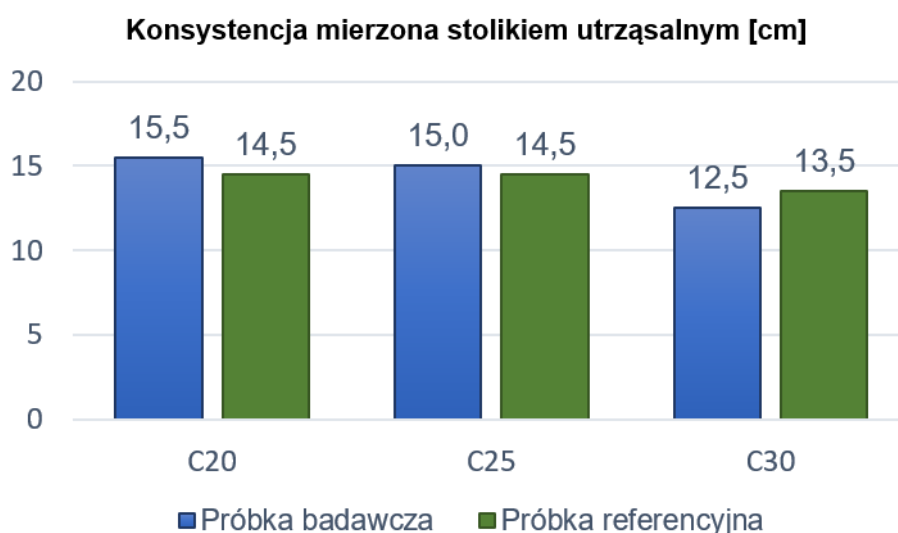
- 1,5 minuty mieszania,
- 1 minuta przerwy na zebranie materiału ze ścianek misy,
- 1 minuta mieszania.

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].

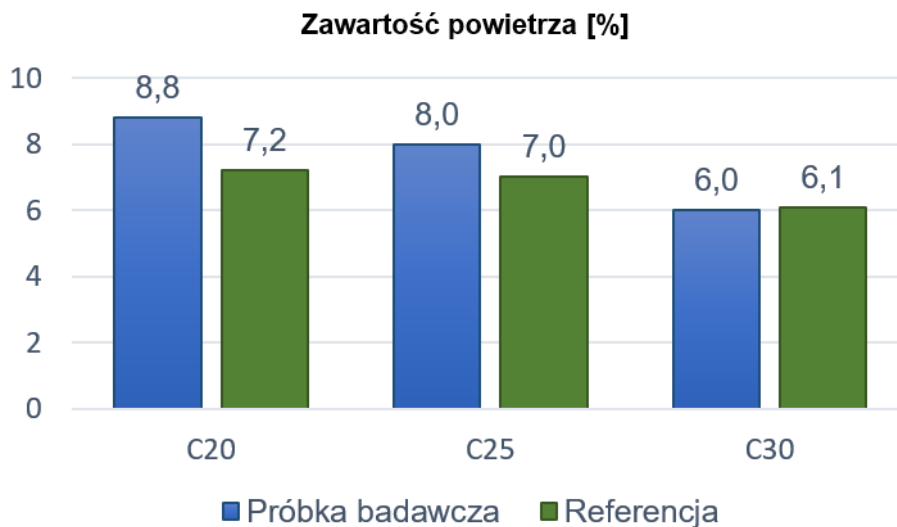
4. Wyniki

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

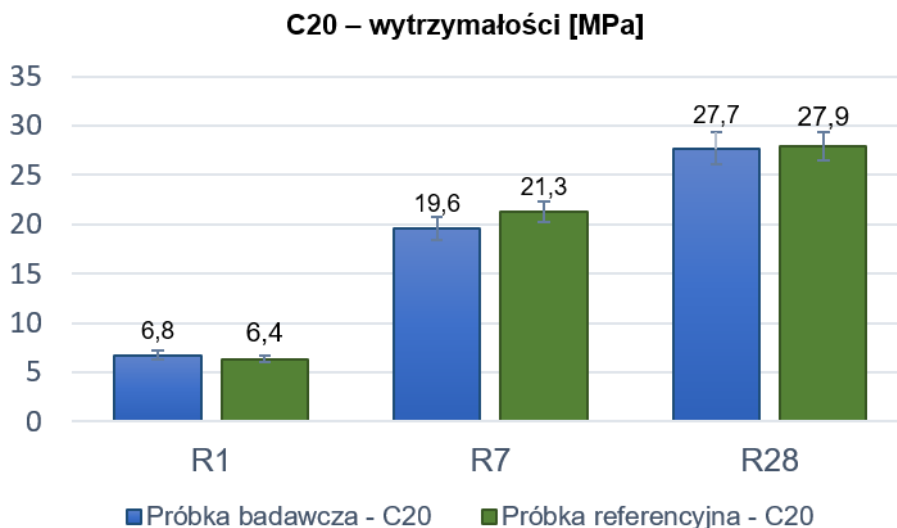
Próbki referencyjne i badawcze dla danej klasy przygotowano na tej samej ilości wody oraz cementu. Dla mieszanek o celowanej niższej klasie wytrzymałości, próbki badawcze cechowały się nieznacznie lepszą urabialnością. Wraz z rosnącym udziałem cementu, różnice zanikają, a próbka referencyjna C30 wykazuje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



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

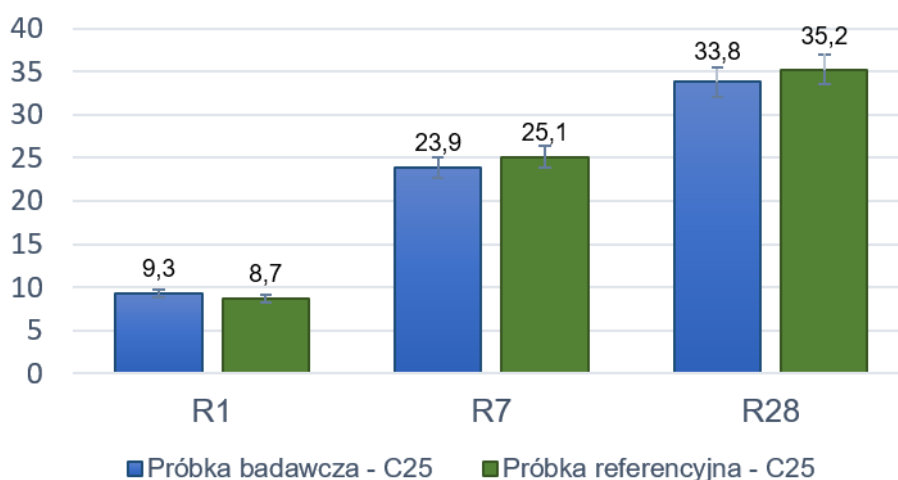
Różnice w napowietrzeniu zauważalne są wyłącznie dla próbek oznaczonych C20. Dla próbek referencyjnych i badawczych C25 oraz C30 różnica zawartości powietrza wynosiła $\leq 1\%$, co mieści się w granicy dokładności pomiarowej.

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

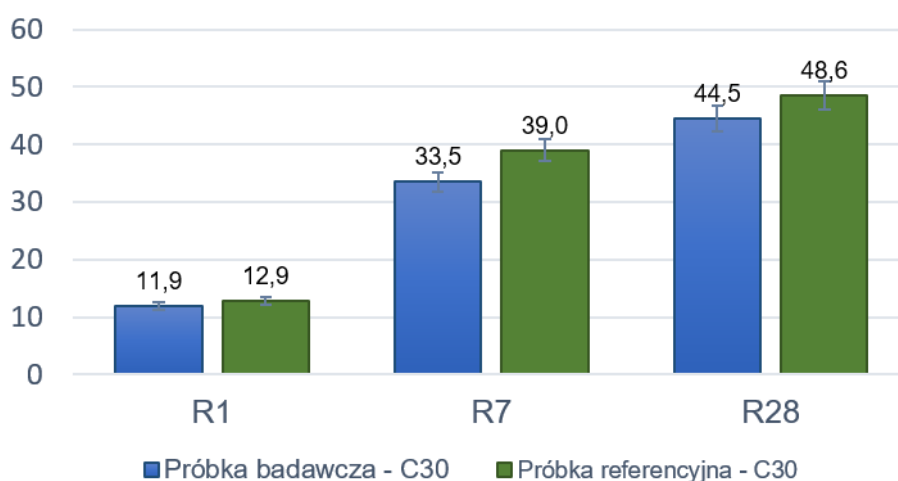
C25 – wytrzymałości na ściskanie [MPa]



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

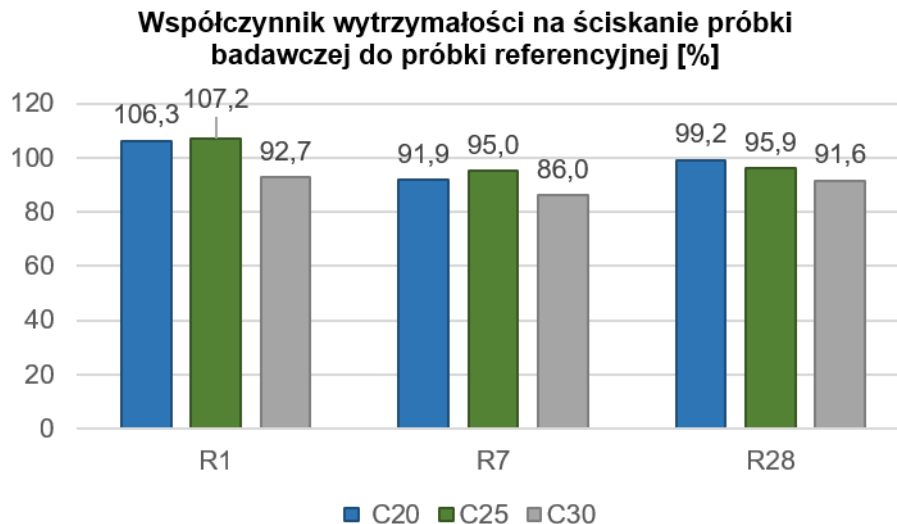
Analizując wyniki próbek C20 i C25, wyniki jednodniowe dla próbek referencyjnych okazały się o 6-6,5% niższe niż wyniki próbek badawczych, mimo nieznacznie wyższej zawartości powietrza w próbkach z kruszywem recyklingowym. Tendencja odwraca się w przypadku wyników wytrzymałości po 7 i 28 dniach - próbka 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%.

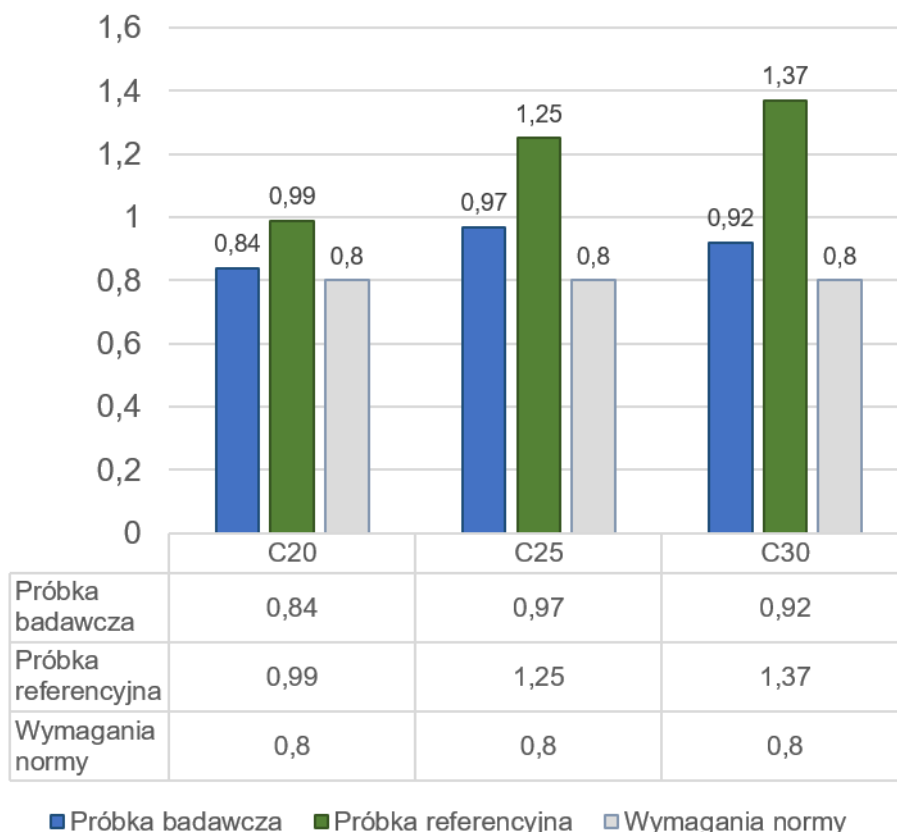


Rys. 14 - Stosunek wytrzymałości na ściskanie próbek z kruszywem recyklingowym względem próbek z kruszywem naturalnym

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

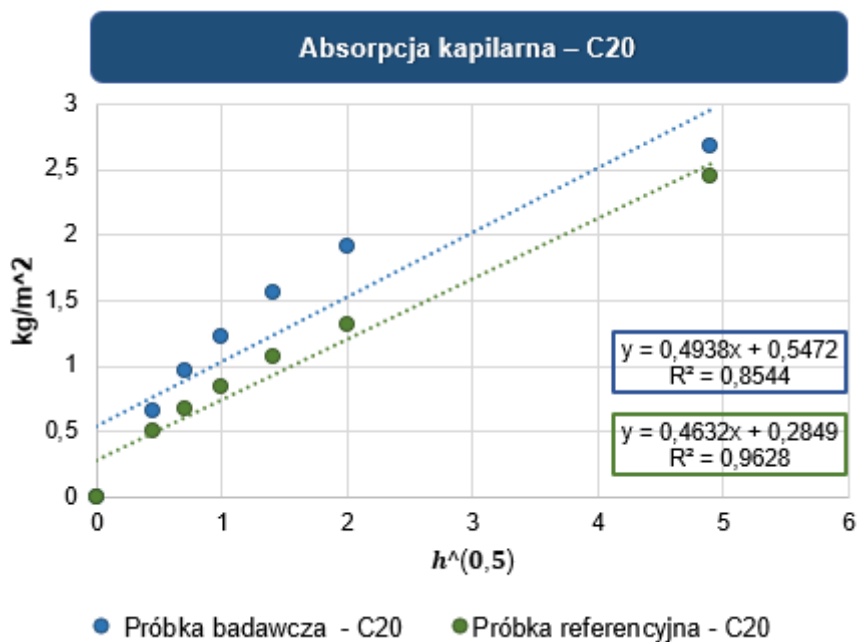
Wyniki przyczepności po cyklach zamrażania-rozmrażania [MPa]



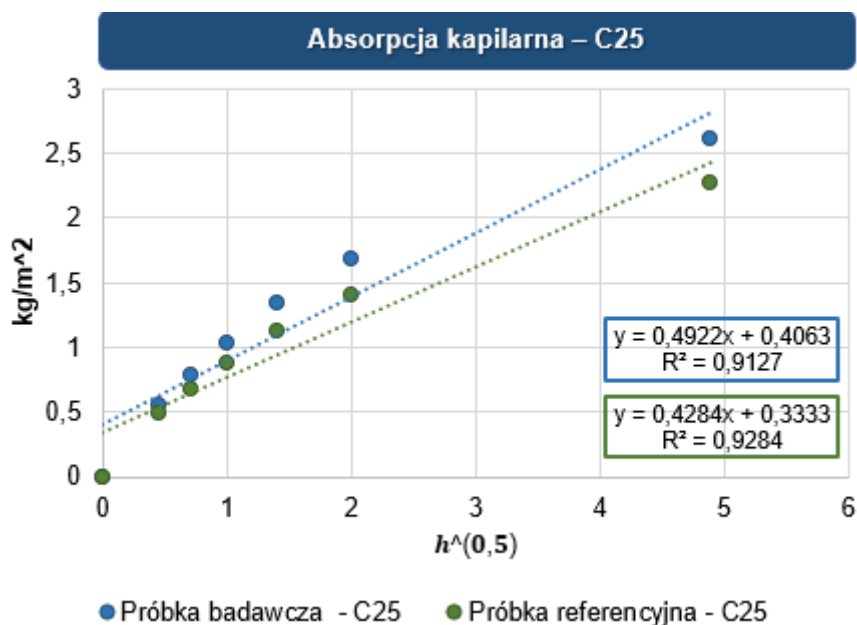
Rys. 15 - Wyniki przyczepności po cyklach zamrażania-rozmrażania przy zanurzeniu w roztworze soli odladzającej

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.

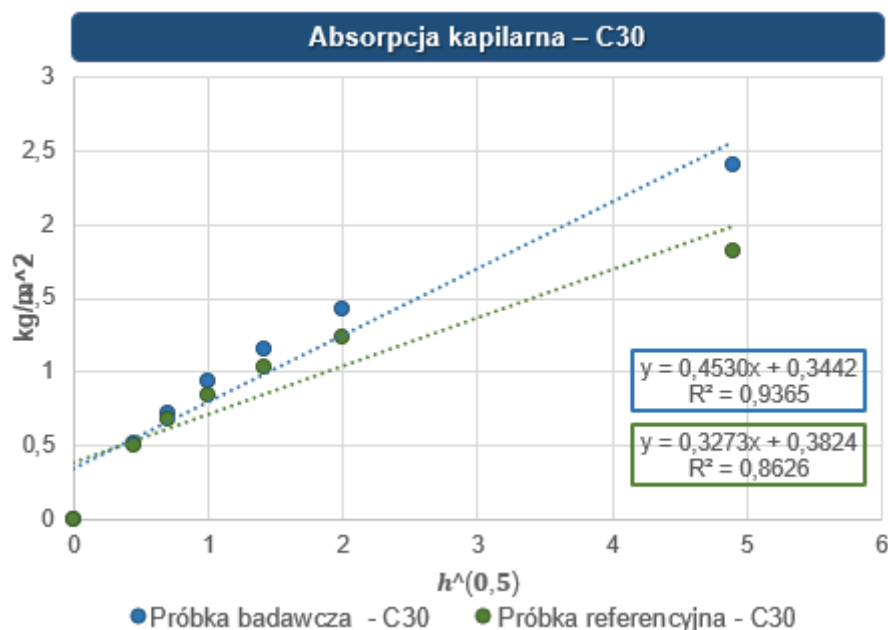
4.4. Oznaczenie odporności na absorpcję kapilarną zgodnie z normą PN-EN 13057:2002



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

mgr. inż. Damian Zawół¹⁾
mgr. inż. Łukasz Osuch¹⁾
mgr. inż. Paweł Mofina²⁾
dr inż. Piotr Górak²⁾
mgr inż. Konrad Grzesiak³⁾

¹⁾ PBI Beton Sp. z o.o.

²⁾ Cemex Polska Sp. z o.o.

³⁾ MC-Bauchemie Sp. z o.o.

Obwodnica Opatowa w ciągu drogi S74 na zrównoważonych rozwiązaniach materiałowych

Opatów bypass along the S74 road using sustainable material solutions

Streszczenie

Wpływ środowiskowy realizowanych inwestycji infrastrukturalnych w przyszłości będzie stawał się jednym z kluczowych aspektów oceny projektów w ramach programu zielonych zamówień publicznych. Dlatego niezmiernie ważne wydaje się, aby dobre praktyki z kontraktów infrastrukturalnych prowadzonych z uwzględnieniem zrównoważonych rozwiązań materiałowych wyznaczały nowe standardy dla przyszłych inwestycji drogowych realizowanych ze środków KPO.

W niniejszym artykule zostały przedstawione doświadczenia praktyczne z realizacji dużego kontraktu infrastrukturalnego jakim była budowa obwodnicy Opatowa w ciągu drogi S74 w aspekcie doboru zrównoważonych materiałów w zakresie wykorzystania lokalnych źródeł kruszyw łamanych, cementów o obniżonej emisyjności oraz specjalnie dobranych domieszek chemicznych umożliwiających produkcję i dostawy mieszanki betonowej w różnych warunkach temperaturowych przy zachowaniu stałych właściwości reologicznych. Zastosowanie nowych rozwiązań recepturowych dla betonów konstrukcyjnych w drogowych obiektach inżynierskich wymaga przede wszystkim sprawdzenia materiałów i ich kompatybilności w całym układzie kompozycji receptur, a także weryfikacji poprawności przyjętych założeń w trakcie realizacji dostaw betonów przy wykorzystaniu pełnej palety metod badawczych. Badania wstępne prowadzone dla weryfikacji słuszności założeń materiałowych okazały się być kluczowe dla potwierdzenia wysokiego poziomu odporności na zagrożenie reakcją ASR dla kompozycji receptur betonowych oraz pomogły w odpowiednim doborze układu cement-zestaw domieszek pod kątem nie tylko reologii mieszanki, ale przede wszystkim pod kątem zapewnienia odpowiedniej trwałości mrozowej i oczekiwanego tempa rozwoju wytrzymałości betonu. Statystyka ilości wykonanych badań wraz z analizą zależności niektórych parametrów to ujęcie badawcze, natomiast obliczenia realnych oszczędności emisji dwutlenku węgla dzięki zastosowaniu kruszyw lokalnych oraz cementów o obniżonej emisyjności to ujęcie inwestycji w aspektach wpływu na środowisko.

Abstract

The environmental impact of infrastructure investments in the future will become one of the key aspects of project assessment under the green public procurement program. Therefore, it seems extremely important that good practices in infrastructure contracts carried out taking into account sustainable material solutions set new standards for future road investments implemented with KPO funds.

This article presents practical experience from the implementation of a large infrastructure contract, which was the construction of the Opatów bypass along the S74 road, in terms of the selection of sustainable materials in terms of the use of local sources of crushed aggregates, cements with reduced emission and specially selected chemical admixtures enabling the production and delivery of concrete mix in various temperature conditions while maintaining constant rheological properties. The use of new recipe solutions for structural concrete in road engineering facilities requires, first of all, checking the materials and their compatibility in the entire recipe composition system, as well as verifying the correctness of the assumptions made during the delivery of concrete using a full range of research methods. Preliminary tests conducted to verify the validity of the material assumptions turned out to be crucial in confirming the high level of resistance to the risk of ASR reaction for the concrete formulation compositions and helped in the appropriate selection of the cement-admixture set system in terms of not only the rheology of the mixture, but primarily in terms of ensuring appropriate frost durability and the expected rate of development of concrete strength. Statistics on the number of tests performed together with an analysis of the relationship between certain parameters is a research approach, while calculations of real savings in carbon dioxide emissions thanks to the use of local aggregates and low-emission cements are a presentation of the investment in terms of environmental impact.

1. Wprowadzenie

Obwodnica Opatowa, realizowana w ciągu drogi ekspresowej S74 oraz drogi krajowej nr 9, stanowi istotną inwestycję infrastrukturalną, która znacząco wpłynie na poprawę jakości życia mieszkańców Opatowa i okolic. Dzięki wyprowadzeniu ruchu tranzytowego poza centrum miasta, zmniejszy się natężenie hałasu, emisji spalin oraz poprawi bezpieczeństwo na lokalnych drogach.

Przedsięwzięcie polegało na budowie obwodnicy, o łącznej długości 13,8 km w ramach dwóch kontraktów: Budowa obwodnicy Opatowa w ciągu drogi S74 i DK9 o dł. 10,8 km oraz łącznika północnego obwodnicy Opatowa w ciągu DK74 o dł. 3 km. W ramach tej budowy wybudowano kilkanaście obiektów inżynierskich mostowych: 4 estakady, 2 mosty, jedną kładkę dla pieszych, kilka wiaduktów, przejście dla średnich zwierząt.

Inwestycja została zrealizowana z uwzględnieniem zasad zrównoważonego rozwoju.

W ramach budowy zastosowano cement CEM II/B-S 42,5 N-NA, który zawiera dodatek żużla wielkopiecowego, co przekłada się na mniejsze zużycie klinkieru i tym samym obniżenie emisji CO₂ w porównaniu z tradycyjnym cementem CEM I 42,5 R-NA. To świadome działanie proekologiczne, które ma na celu zmniejszenie śladu węglowego inwestycji. Dodatkowo wykorzystanie lokalnych surowców – grysów dolomitowych pochodzących z pobliskich złóż – nie tylko ograniczyło potrzebę transportu materiałów z odległych miejsc (co również przekłada się na mniejsze emisje), ale również wsparło lokalną gospodarkę.

Obwodnica będzie stanowiła ważny odcinek drogi ekspresowej S74, która w przyszłości połączy województwa łódzkie, świętokrzyskie i podkarpackie i przyniesie wiele korzyści mieszkańcom miasta i regionu, poprawiając jakość życia, ułatwiając podróżowanie i wspierając rozwój gospodarczy.

2. Beton konstrukcyjny o obniżonej emisyjności w odniesieniu do zastosowanych materiałów

2.1. Cement jako główny składnik emisyjności betonu

Pisząc o betonie o obniżonej emisyjności CO₂ w pierwszej kolejności zwraca się uwagę na emisyjność cementu, który odpowiada w zależności od przeznaczenia i klasy wytrzymałości betonu od 75% do 90% całej wartości śladu węglowego wbudowanego. Przystępując do porównania rozwiązań materiałowych w zakresie zmian cementu, a co za tym idzie redukcji śladu węglowego założono, że ilości cementu w recepturach betonu tej samej klasy są takie same. Zostały przeanalizowane dwa podejścia do rozwiązań recepturowych. W pierwszym założono, że receptury betonu przeznaczone dla klas C30/37 i C35/45 są wykonane na cementach klasy 42,5 odpowiednio przyjmując referencyjne (tradycyjne podejście) na CEM I 42,5 R-NA, natomiast w drugim uwzględniającym aspekty środowiskowe na cemencie CEM II/B-S 42,5 N-NA. Dodatkowo wykonana została kalkulacja śladu węglowego pochodzącego od cementu przy założeniu potencjalnej zamiany cementu CEM I 52,5 R-NA na cement CEM II/B-S 42,5 N-NA dla betonu C50/60.

Dane dla cementów zostały przyjęte w oparciu o wartości GWP netto zawartych w deklaracjach środowiskowych III Typu z roku 2023 opracowanych przez ITB na zlecenie producenta – CEMEX Polska sp. z o.o. [1].

Rzeczywista zamiana rodzaju cementu w obrębie tych samych projektowanych właściwości betonu dla klas C30/37 i C35/45 oraz potencjalna dla klasy C50/60 pozwala osiągnąć redukcję emisji od 57 do 65 kg CO₂ w 1 m³ betonu.

Tabela 1. Porównanie emisyjności rozwiązań w aspekcie zastosowanego cementu

Klasa wytrzymałości betonu	C30/37		C35/45		C50/60	
Rodzaj cementu	CEM I 42,5 R-NA	CEM II/B-S 42,5 N-NA	CEM I 42,5 R-NA	CEM II/B-S 42,5 N-NA	CEM I 52,5 R-NA	CEM II/B-S 42,5 N-NA
Ilość cementu [kg/m ³ betonu]	370	370	390	390	420	420
Emisja [kg eqCO ₂ / t cementu]	481	327	481	327	482	327
Emisja na 1 m ³ betonu od cementu [kg eqCO ₂ / m ³ betonu]	178	121	188	128	202	137
Różnica emisji przy zastosowaniu cementu [kg eqCO ₂ / m ³ betonu]	57		60		65	

2.2. Kruszywa ważny składnik w kalkulacji śladu węglowego

Kruszywa w betonie stanowią 80-90% objętości. To kluczowy składnik, który pozwala na osiągnięcie przez beton projektowanych właściwości mechanicznych oraz odpowiedniej trwałości. Przez wiele lat do produkcji betonów z przeznaczeniem dla inżynierskich obiektów drogowych stosowane były kruszywa łamane pozyskiwane ze skał magmowych lub metamorficznych pochodzące z jednego regionu Polski. Przełomowym momentem było pojawienie się zaktualizowanych WWiORB-ów [2], które stanowiły podstawę dla nowo opracowywanych specyfikacji technicznych stosowanych do projektowania rozwiązań materiałowych w budownictwie infrastrukturalnym. Nikt dotąd nie postrzegał stosowania kruszyw łamanych w aspekcie potencjalnej redukcji śladu węglowego w betonie. Przyjmując, że ślad węglowy dla kruszywa łamanego pozyskiwanego przez odstrzał skały macierzystej i proces kruszenia w modułach A1-A3 (cradle to gate) jest podobny, to niebagatelną rolę odrywa ślad węglowy pochodzący od transportu materiału do miejsca zastosowania. Podejście polegające na zastosowaniu kruszyw lokalnych jest zatem słuszne z punktu widzenia zrównoważonych rozwiązań materiałowych. W przypadku opisywanego w artykule kontraktu Producent betonu – Grupa PBI oraz PBI Beton zdecydowali się wykorzystać do betonów konstrukcyjnych mostowych kruszywa dolomitowe pochodzące z lokalnych kamieniołomów należących do Grupy i oddalonych od miejsca produkcji betonu o 10 km, zamiast kruszyw łamanych produkowanych na Dolnym Śląsku – średnia odległość około 400 km.

Znaczna różnica w odległości przekłada się na różnicę w śladzie węglowym określonym dla 1 tony kruszywa – Tabela 2.

Tabela 2. Porównanie emisyjności transportu kruszywa

Rodzaj kruszywa	Grys dolomitowy	Grys Granitowy
Odległość do miejsca zastosowania – WBT [km]	10 km	400 km
Założona emisja dla transportu kruszywa [6] [26 ton/ 1 km]	1,08114 kg CO ₂ /km	
Emisja CO ₂ dla dostawy kruszyw w miejsce wykorzystania	10,8114 kg CO ₂	432,4560 kg CO ₂

3. Rozwiązania materiałowe zastosowane w mieszankach betonowych

Przed przystąpieniem do realizacji, producent betonu PBI Beton Sp. z o. o., wraz z dostawcami materiałów CEMEX Polska Sp. z o. o. oraz MC Bauchemie Sp. z o. o. przeprowadzili badania wstępne w celu dobrania optymalnego rozwiązania. Założeniem do projektowania było spełnienie wymagań kontraktowych z uwzględnieniem aspektu środowiskowego. Kluczowymi parametrami przy doborze składników było zaprojektowanie mieszanki betonowej dla klasy obiektu S4 w kategorii oddziaływania środowiska E3. Podstawowe rozwiązania materiałowe przedstawiono w tabeli 3.

Tabela 3. Receptury betonu konstrukcyjnego

Składnik	Producent	C30/37	C35/45	C50/60
		Skład [kg]		
CEM II B-S 42,5 N- NA	CEMEX Polska Sp. z o. o.	370	390	
CEM I 52,5 R-NA				420
Kruszywo drobne 0/2	Kopalnie Dolomitu SA (Grupa PBI)	1820	1804	1802
Kruszywo grube 2/8 - grys dolomitowy				
Kruszywo grube 8/16 - grys dolomitowy				
Domieszka uplastyczniająca - Centrament N11	MC Bauchemie Sp. z o. o.	4,6	4,9	5,7
Domieszka upłynniająca - MC PowerFlow evo 508				
Domieszka napowietrzająca Centrament Air 220				
Woda	Wodociągowa	155	154	151

3.1. Cement

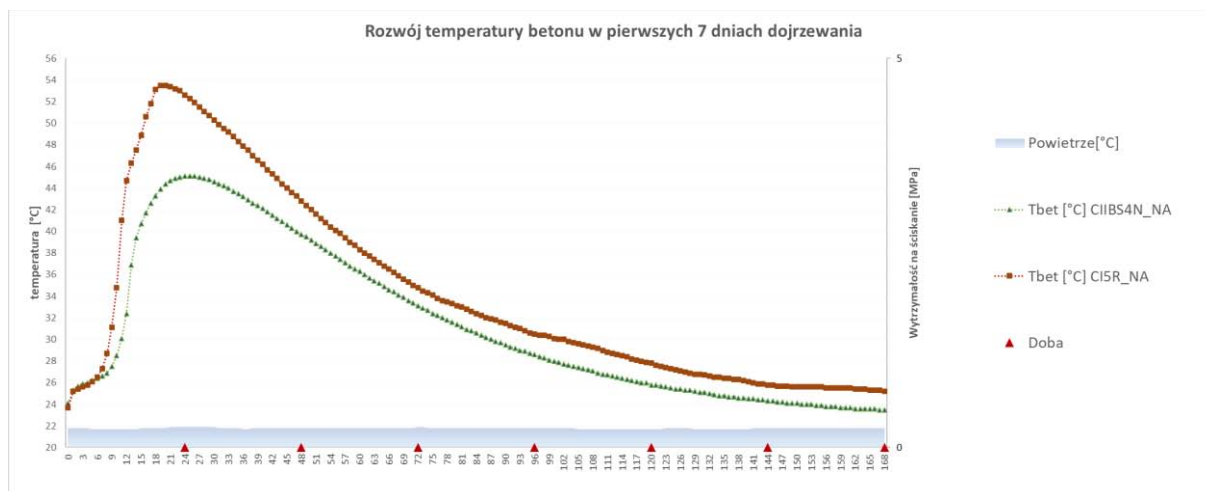
Do całości projektu wykorzystano dwa rodzaje cementu tj. CEM I 52,5 R-NA i CEM II/B-S 42,5 N-NA z Cementowni Rudniki o podstawowych właściwościach zestawionych w tabeli 4.

CEM I 52,5 R-NA zastosowano w betonie C50/60 tylko i wyłącznie do ustroju nośnego jednej z estakad. Jednakże poprzez szereg badań które zostały przeprowadzone dla betonu C50/60 z zastosowaniem cementu CEM II/B-S 42,5 N-NA z łatwością można by zastąpić CEM I lecz ze względów formalno-prawnych ciężko było przekonać Odbiorcę do w/w rozwiązania. Przedstawione poniżej badania dobrze obrazują, że w dzisiejszych czasach obiekty sprężane można łatwo wykonywać na cementach innych niż CEM I. Potrzebne bezpieczne wczesne wytrzymałości są osiągalne na CEM II/B-S a dodatkowym atutem jest wyższa trwałość konstrukcji ze względu na niższe ciepło hydratacji.

Tabela 4. Podstawowe właściwości zastosowanych cementów

Właściwość	Jednostka	CEM II/B-S 42,5 N-NA	CEM I 52,5 R-NA
Początek wiązania	[min]	172	107
Koniec wiązania	[min]	218	139
Woda do konsystencji normowej	[%]	29,7	29,3
Stałość objętości	[mm]	1	1
Powierzchnia właściwa	[cm ² /g]	4464	5011
<i>Wytrzymałość na ściskanie:</i>			
po 2 dniach	[MPa]	18,3	32,8
po 28 dniach	[MPa]	57,5	63,2
<i>Analiza chemiczna:</i>			
SO ₃	[%]	2,55	2,81
Cl	[%]	0,07	0,064
Na ₂ O _{eq}	[%]	0,6	0,48

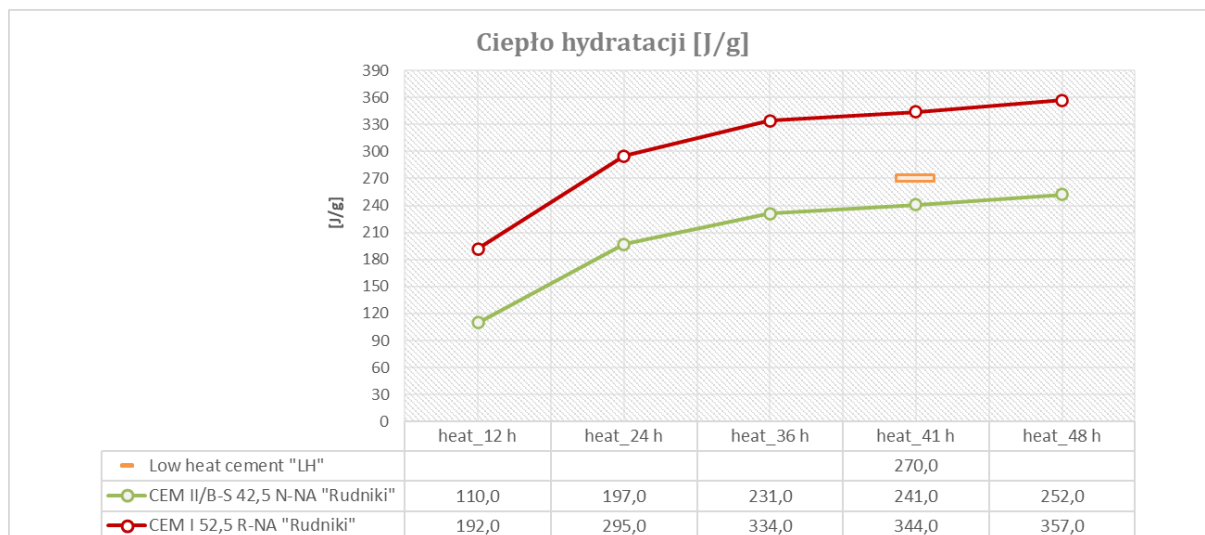
W betonach konstrukcyjnych ważną rolę odgrywa ciepło hydratacji, a w zasadzie ilość i szybkość wydzielania ciepła z egzotermicznej reakcji uwodnienia cementu. Przeprowadzone w warunkach laboratoryjnych, badanie ciepła hydratacji polegało na umieszczeniu zalanej mieszanką betonową formy w walcowej w izolowanej „kabinie” hydratacyjnej i prowadzeniu rejestracji temperatury dojrzewającego betonu przez okres pierwszych 7 dni. Oprócz rejestracji temperatury w mieszance betonowej prowadzony był również monitoring temperatury powietrza w pomieszczeniu laboratoryjnym. W trakcie trwania badania rejestracja temperatury odbywała się za pomocą dwukanałowego rejestratora firmy TESTO model 175 T3 i termopar typu T, przy czym kanał nr 1 rejestrował temperaturę panującą w otoczeniu beczki hydratacyjnej, a kanał nr 2 temperaturę dojrzewającego i twardniejącego betonu. Rejestracja temperatur odbywała się przez 7 dni z interwałem 60 minutowym co umożliwiło wyznaczenie krzywej rozwoju temperatury w dojrzewającym betonie. Pozyskane dane pozwoliły na wykreślenie krzywej rozwoju ciepła hydratacji mieszanek betonowych – przedstawiono na rysunku 1.



Rys. 1. Ciepło hydratacji mieszanek betonowych C 50/60 przez 7 dni

Należy w tym miejscu zwrócić uwagę na znaczącą różnicę w wartości maksymalnej zarejestrowanej temperatury. W przypadku mieszanki wykonanej przy zastosowaniu cementu CEM I 52,5 R-NA wynosi 52,6 °C i pojawia się po 24 godzinach natomiast w przypadku mieszanki wykonanej na cemencie CEM II/B-S 42,5 N-NA wynosi 45,1 °C i pojawia się w okresie 24-26 godzin.

Powyższa analiza znajduje potwierdzenie w badaniu normowym ciepła hydratacji cementów wg PN-EN 196-9. Cement CEM II/B-S 42,5 N-NA nie posiada oznaczenia LH jednakże regularnie uzyskiwane wyniki oznaczeń ciepła uwodnienia kształtują się na poziomie poniżej 270 J/g (rys. 2).

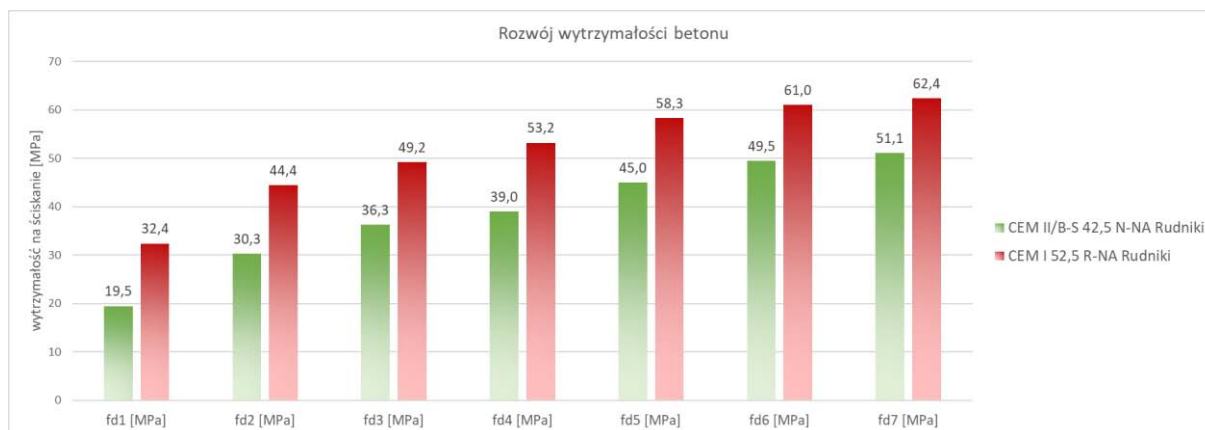


Rys. 2. Ciepło hydratacji cementów wg PN-EN 196-9

Niższe ciepło uwodnienia i wolniejsza dynamika rozwoju wytrzymałości w niewielkim stopniu wpływa na uzyskiwane wytrzymałości w pierwszych dobach twardnienia betonu.

Czas osiągnięcia wymaganej bezpiecznej wytrzymałości betonu do zwolnienia naciągu siły sprężającej jest przesunięty tylko o 3 dni. Dla betonu klasy C 50/60

przyjmujemy, że wytrzymałość ta stanowić powinna 80 % f_{ck} czyli 48 MPa. Wytrzymałość ta gwarantowana jest dla betonu wykonanego na cemencie CEM I 52,5 R-NA po 3 dniach natomiast dla betonu wykonanego na cemencie CEM II/B-S 42,5 N-NA po 6 dniach (rys. 3).



Rys. 3. Dynamika rozwoju wytrzymałości betonu C 50/60 dla pierwszych 7 dni dojrzewania

W przypadku elementów klasyfikowanych jako masywne, analiza ciepła hydratacji mieszanki betonowej ma krytyczne znaczenie dlatego też, zawsze powinna być uwzględniana na etapie projektowanego rozwiązania.

Zastosowanie cementu CEM I, wnoszące potencjalne korzyści wynikające z szybszej rotacji szalunków czy wcześniejszego sprężenia może prowadzić, szczególnie w przypadku niekorzystnych warunków temperaturowych i braku właściwej pielęgnacji, do wystąpienia znacznych gradientów temperatur w elemencie lub na styku powierzchnia elementu / otoczenie. To z kolei, może spowodować powstanie naprężeń, których młody beton nie będzie w stanie przenieść w konsekwencji doprowadzając do powstania zarysowań lub spękań elementu. Nie zawsze zatem szybkość narastania wytrzymałości jest korzystna dla konstrukcji, zwłaszcza jeżeli skutkiem może być ryzyko uszkodzenia elementu, a co za tym idzie dodatkowy czas i koszty napraw. W takiej sytuacji wydłużenie czasu pielęgnacji betonu w szalunkach o nawet 3 doby z racji zastosowania rozwiązania alternatywnego na cemencie CEM II/B-S 42,5 N-NA, może okazać się rozwiązaniem optymalnym finalnie przynoszącym wyłącznie korzyści dla całkowitych kosztów i jakości betonu w konstrukcji.

3.2. Kruszywa

Stos okruszowy został zaprojektowany z trzech frakcji kruszyw. Jako kruszywo drobne przyjęto piasek naturalny, płukany o kategorii reaktywności R0 spełniający zapisy STWiORB. Kruszywo grube o frakcji 2/8 oraz 8/16 stanowiło grys dolomitowy z lokalnej kopalni Kopalnie Dolomitu S.A. która znajdowała się dosłownie kilka kilometrów od wytwórni betonu. W tabeli 5, przedstawiono podstawowe charakterystyki kruszywa grubego.

Tabela 5. Podstawowe właściwości zastosowanych kruszyw grubych

Właściwości	Kruszywo grube	
	2/8	8/16
Pochodzenie	Kopalnie Dolomitu (Grupa PBI)	
Kategoria uziarnienia	Gc85/20	
Zawartość pyłów	f _{1,5}	
Odporność na rozdrabnianie	LA ₂₅	
Mrozoodporność	F ₁	
Mrozoodporność w soli	F _{NaCl} 6	
Nasiąkliwość	WA ₂₄ 1	
Zawartość siarczanów rozpuszczalnych w kwasie	AS _{0,2}	
Zawartość siarki całkowitej	≤1	
Zawartość chlorków rozpuszczalnych w wodzie	<0,001	
Reaktywność alkaliczna PB/1/18 (ASR)	R0	
Reaktywność alkaliczna PB/2/18 (ASR)	R0	
Reaktywność alkaliczna PB/2/18 (ACR)	R0	

3.3. Domieszki

Domieszki zostały dobrane na etapie badań wstępnych jako rozwiązanie spełniające wszystkie przedstawione przez zamawiającego wymagania w zakresie utrzymania konsystencji, stabilności napowietrzenia, odpowiedniej struktury napowietrzenia oraz wpływu na uzyskiwane wytrzymałości wczesne i końcowe.

Do realizacji zastosowano takie produkty, jak:

- MC PowerFlow 508, który jest superplastyfikatorem utrzymanym w koncepcji zakładającej produkcję betonu o niskiej zawartości wody z zachowaniem wydłużonego czasu urabialności mieszanki betonowej oraz zapewnieniu jej jakości od produkcji na węźle, poprzez transport i zabudowę.
- Centrament Air 220 – napowietrznik należący do grupy związków powierzchniowo czynnych na bazie żywic. Domieszka o wysoce efektywnym działaniu powoduje obniżenie napięcia powierzchniowego wody, co skutkuje podczas mieszania powstawaniem stabilnych mikroporów powietrza regularnie rozmieszczonych w całej objętości betonu.
- Centrament N 11 – uniwersalny plastyfikator, szczególnie przydatny w kombinacji z superplastyfikatorami MC-PowerFlow do betonów projektowych wyższych klas o długim czasie utrzymania konsystencji.

4. Uzyskane parametry betonu niskoemisyjnego z placu budowy

Betony konstrukcyjne dostarczone na plac budowy tytułowej inwestycji, zostały wyprodukowane w dużej części na cemencie CEM II B-S 42,5 N-NA oraz ze względu na wymóg kontraktowy CEM I 52,5 R-NA z Cementowni Cemex. Tak przyjęte rozwiązanie przyczyniło się do obniżenia śladu węglowego wyprodukowanego 1 m³

mieszanki betonowej co zostało opisane w pierwszej części referatu. Stosowanie tego typu rozwiązań, jest możliwe wyłącznie po potwierdzeniu, że mieszanka betonowa wbudowana w poszczególne elementy konstrukcyjne pozwoli przez założony okres projektowy bezpiecznie użytkować poszczególne obiekty. Dlatego ważnym, niezmiennym elementem jest kontrola na etapie produkcji mieszanki oraz betonu stwardniałego.

Podczas realizacji przedmiotowego zadania producent betonu PBI Beton, prowadził kontrolę betonu w ramach Zakładowej Kontroli Produkcji rozszerzając zakres ilości pobieranych prób do badań. Celem było uzyskanie jak największej ilości danych osiąganych parametrów w różnych warunkach.

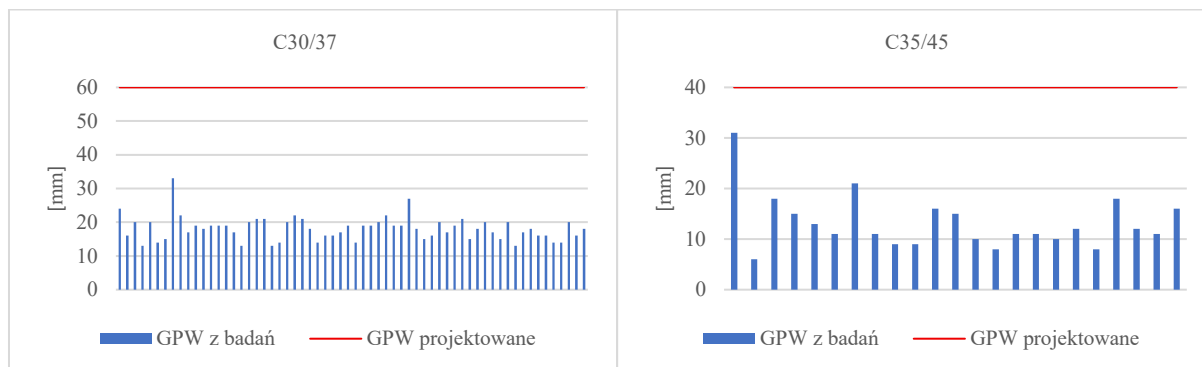
Największa produkcja przypadła na okres II kw. 2023 do III kw. 2024 roku. W tabeli 6 zestawiono projektowane parametry wraz ze średnimi uzyskanymi wynikami z dostarczonej mieszanki betonowej. W tym okresie, w szczególności rozszerzono zakres badania stopnia mrozoodporności, co przełożyło się na wykonanie 117 badań tego parametru.

Tabela 6. Parametry projektowane oraz z placu budowy

a) Projektowane parametry				
Klasa betonu		C30/37	C35/45	C50/60
Klasa konsystencji		S3	S3	S3
Maksymalne uziarnienie		16 [mm]	16 [mm]	16 [mm]
Zawartość powietrza		5,5 [%]	5,5 [%]	5,5 [%]
Głębokość penetracji wody		60 [mm]	40 [mm]	60 [mm]
Stopień mrozoodporności		F150	F200	F150
b) Wyniki otrzymane z realizacji				
Wytrzymałość w 28 dniu (średnia)		58 [MPa]	62 [MPa]	71 [MPa]
Zawartość powietrza		4,3 ÷ 7,0 [%]	4,4 ÷ 7,2 [%]	4,5 ÷ 6,5 [%]
Stopień mrozoodporności	ΔfF	- 4,3 ÷ 18 [%]	- 6,3 ÷ 18,4 [%]	- 8,4 ÷ 18,4 [%]
	ΔmF	- 0,6 ÷ 0,3 [%]	- 0,5 ÷ 0,3 [%]	- 0,4 ÷ 0,3 [%]
	Pęknięcia	brak	brak	brak
Głębokość penetracji wody		13 ÷ 33 [mm]	6 ÷ 31 [mm]	4 ÷ 19 [mm]
Badania charakterystyki porów powietrznych	Całkowita zawartość powietrza - A	4,6 ÷ 7,7 [%]	6,0 ÷ 7,8 [%]	5,1 ÷ 5,7 [%]
	Powierzchnia właściwa porów - α	23,88 ÷ 29,63 [mm ⁻¹]	25,81 ÷ 31,05 [mm ⁻¹]	28,6 ÷ 35,1 [mm ⁻¹]
	Wskaźnik rozmieszczenia - L	0,15 ÷ 0,19 [mm]	0,13 ÷ 0,18 [mm]	0,14 ÷ 0,17 [mm]
	Zawartość mikroporów - A300	1,9 ÷ 3,0 [%]	2,6 ÷ 3,4 [%]	2,6 ÷ 3,8 [%]

Badania trwałościowe, były prowadzone zgodnie z czasem równoważnym w odniesieniu do zastosowanego rodzaju cementu. Zgodnie z wymaganiami kontraktowymi w celu weryfikacji trwałości betonu prowadzono badania odporności na penetrację wody (GPW) oraz odporność na działanie mrozu (F).

Maksymalne wniknięcie wody GPW, w żadnym z betonów nie przekroczyło 40 mm. Na podstawie tego parametru, można stwierdzić, że przyjęte rozwiązania materiałowe, pod względem jakościowym i ilościowym, zostały poprawnie przyjęte, a beton uzyskał bardzo dobrą odporność na wnikanie cieczy.



Rys. 4. Maksymalne wniknięcie wody dla betonu klasy C30/37 oraz C35/45

Na potrzeby referatu oraz sprawdzenia jaką odporność na działanie mrozu uzyskają betony z niskoemisyjnym cementem CEM II B-S 42,5 N-NA, badaniom podawano próbki o różnym napowietrzeniu mieszanki. Cyklom zamrażania i rozmrażania, zostały poddane próbki z zawartością powietrza od 4,3 % do 7,2 % uzyskanych z badania za pomocą aparatu do badania zawartości powietrza w mieszance betonowej. W celu uzupełnienia uzyskiwanych wyników z metody bezpośredniej odporności na działanie mrozu, losowo pobierano próbki do badań charakterystyki porów powietrznych. Przykładowe uzyskane wyniki z tej samej partii mieszanki betonowej przedstawiono w tabeli 7.

Tabela 7. Trwałość betonu konstrukcyjnego

		C30/37			C35/45			C50/60		
	Rodzaj cementu	CEM II B-S 42,5 N-NA			CEM II B-S 42,5 N-NA			CEM I 52,5 R-NA		
	Zawartość powietrza przed zaformowaniem	5,7 [%]			6,2 [%]			4,9 [%]		
Badanie odporności na działanie mrozu	Średnia wytrzymałość próbek mrożonych	62,1 [MPa]	ΔfF	7,6 [%]	63,4 [MPa]	ΔfF	6,1 [%]	72,2 [MPa]	ΔfF	4,2 [%]
	Średnia wytrzymałość próbek porównawczych	67,2 [MPa]			67,5 [MPa]			75,4 [MPa]		
	Średnia masa próbek po badaniu	2417 [g]	ΔmF	0,1 [%]	2397 [g]	ΔmF	0,0 [%]	2414 [g]	ΔmF	0,1 [%]
	Średnia masa próbek przed badaniem	2420 [g]			2398 [g]			2416 [g]		
	Pęknięcia	brak			Brak			brak		
	Badania charakterystyki porów	Całkowita zawartość powietrza - A	5,5 [%]			6,8 [%]			5,2 [%]	
Powierzchnia właściwa porów - α		27,60 [mm-1]			31,05 [mm-1]			28,58 [mm-1]		
Wskaźnik rozmieszczenia - L		0,17 [mm]			0,14 [mm]			0,17 [mm]		
Zawartość mikroporów - A300		2,93 [%]			3,36 [%]			2,57 [%]		
	Głębokość penetracji wody	23 [mm]			18 [mm]			19 [mm]		

Badanie charakterystyki porów powietrznych w stwardniałym betonie, potwierdzało kompatybilność przyjętych rozwiązań materiałowych w szczególności działanie domieszek chemicznych z cementem niskoemisyjnym.

4. Wnioski

Przedstawione w artykule wyniki badań i analizy porównawcze potwierdzają trafność decyzję jaką był wybór cementu CEM II/B-S 42,5 N-NA do zastosowania w produkcji betonu konstrukcyjnego. Uzyskane z kolei wyniki porównania receptury wysokiej klasy wytrzymałości betonu C 50/60 na obu cementach tj. CEM II/B-S 42,5 N-NA oraz CEM I 52,5 R-NA wskazują na możliwość aplikacji tego rodzaju cementu w betonach np. ustrojów nośnych oczywiście z uwzględnieniem czasu pielęgnacji i dojrzewania do uzyskania wymaganych wytrzymałości.

Odnosząc się do ilości wbudowanego cementu w elementy konstrukcyjne, zastosowanie cementu CEM II/B-S 42,5 N-NA w klasach C30/37 oraz C35/45 ograniczyło emisję śladu węglowego wbudowanego, liczonego jako eqCO₂ o ponad 1000 ton, względem rozwiązania na CEM I 42,5 R-NA, co stanowi redukcję o ponad 30 %. Akceptacja możliwości zastosowania tego cementu w betonie klasy C50/60 przeznaczonym na elementy konstrukcyjne ustroju nośnego, zredukowała by ślad węglowy wbudowany o kolejne 230 ton eqCO₂.

Referat pokazuje że podstawą sukcesu jest opracowanie właściwego rozwiązania materiałowego, wysoka jakość zastosowanych składników ale również powtarzalna pod względem jakościowym produkcja mieszanki. Dobór cementu, kruszyw i kompatybilnych domieszek chemicznych stanowić powinien zawsze pierwszy i zasadniczy krok w przygotowaniu optymalnych jakościowo, ale również kosztowo receptur betonowych. Również istotna jest współpraca dostawców surowców pozwalająca szybko i trafnie reagować na wyzwania z jakimi mierzy się budowa i dostawca mieszanki betonowej.

Literatura

- [1] Deklaracje środowiskowe www.cemex.pl/deklaracje-srodowiskowe-iii-typu-epd-cement,
- [2] Warunki Wykonania i Odbioru Robót Budowlanych, M-13-01-00 Beton Konstrukcyjny w Drogowych Obiektach Inżynierskich,
- [3] PN EN 206+A2:2021-08 Beton. Wymagania, właściwości użytkowe, produkcja i zgodność,
- [4] PN B 06265:2022 Beton. Wymagania, właściwości użytkowe, produkcja i zgodność, Krajowe uzupełnienie PN EN 206+A2:2021-08
- [5] PN EN 196-9 Metody badania cementu. Część 9: Ciepło hydratacji. Metoda semiadiabatyczna.
- [6] Greenhouse gas reporting: conversion factors 2019 - GOV.UK

Prof. dr hab. inż. Krzysztof Schabowicz

Politechnika Wrocławska, Wydział Budownictwa Lądowego i Wodnego

Prof. dr hab. inż. Dorota Burchart

Politechnika Śląska, Wydział Transportu i Inżynierii Lotniczej

Wybrane zagadnienia dotyczące deklaracji środowiskowej dla betonu

Selected issues regarding the environmental declaration for concrete

Streszczenie

Sektor budownictwa w Unii Europejskiej odpowiada za znaczną część emisji gazów cieplarnianych. Zarządzanie wskaźnikami zrównoważonego rozwoju i śladem węglowym w budownictwie odgrywa istotną rolę. Jednym z głównych dokumentów wspierających zrównoważony rozwój w branży budowlanej jest deklaracja środowiskowa EPD (ang. *Environmental Product Declaration*). Deklaracja EPD przedstawia informacje odnośnie oceny środowiskowej produktów uwzględniając ich cykl życia. Informacje zawarte w deklaracjach EPD mogą stanowić istotny krok w raportowaniu zrównoważonego rozwoju dla organizacji ESG (ang. *Environmental, Social, Governance*), jak również stać się ważnym elementem Cyfrowego Paszportu Produktu DPP (ang. *Digital Product Passport*). Opracowanie EPD wymaga specjalistycznej wiedzy oraz doświadczenia, jak również zastosowania odpowiednich metod oceny cyklu życia, oprogramowań i baz danych. Do opracowania EPD dla betonu stosowane są odpowiednie zasady, normy i standardy. W celu opracowania deklaracji środowiskowej należy zastosować metodę oceny cyklu życia LCA (ang. *Life Cycle Assessment*), która umożliwia uwzględnienie całego cyklu życia betonu, od wydobycia surowców przez produkcję, transport, użytkowanie, aż po zagospodarowanie odpadów. W pracy przedstawiono istotę i znaczenie deklaracji środowiskowych EPD, zgodnie z nowymi wytycznymi dla betonu w kontekście wymagań dotyczących zrównoważonego rozwoju w sektorze. Przedstawiono wytyczne do opracowania deklaracji środowiskowych dla obiektów budowlanych i betonu oraz moduły oceny cyklu życia obiektów budowlanych w deklaracjach środowiskowych. Wykonano analizę porównawczą wymagań cyfrowego paszportu produktu DPP oraz deklaracji środowiskowej EPD na przykładzie betonu w celu

ustalenia wytycznych dotyczących opracowania paszportu produktu uwzględniając
wskaźniki w oparciu
o deklaracje środowiskowe EPD. Dodatkowo zwrócono uwagę na istotę ujednolicenia
nomenklatury dotyczącej kwestii emisji gazów cieplarnianych na potrzeby EPD oraz
DPP.

Abstract

The construction sector in the European Union is responsible for a significant part of greenhouse gas emissions, which is a challenge for environmental protection. Managing sustainability indicators and carbon footprint in construction plays an important role. One of the main documents supporting sustainable development in the construction industry is the EPD (Environmental Product Declaration). The EPD presents information on the environmental assessment of products taking into account their life cycle. The information contained in EPDs can be an important step in reporting sustainable development for ESG (Environmental, Social, Governance) organizations, as well as becoming an important element of the Digital Product Passport (DPP). The development of an EPD requires specialist knowledge and experience, as well as the use of appropriate life cycle assessment methods, dedicated software and databases. Appropriate principles, norms and standards are used to develop an EPD for concrete. In order to develop an environmental declaration, the Life Cycle Assessment (LCA) method should be used, which allows for taking into account the entire life cycle of concrete, from raw material extraction through production, transport, use, and waste management. The article presents the essence and importance of EPDs, in accordance with the new guidelines for concrete in the context of the requirements for sustainable development in the sector. Guidelines for the development of environmental declarations for construction and concrete objects and modules for the assessment of the life cycle of construction objects in environmental declarations were presented. A comparative analysis of the guidelines for the digital product passport DPP and the environmental declaration EPD was carried out using concrete as an example in order to establish guidelines for the development of a product passport taking into account indicators from environmental declarations EPD. Additionally, attention was drawn to the importance of unifying the nomenclature concerning the issue of greenhouse gas emissions for the needs of EPD and DPP.

1. Wprowadzenie

Sektor budownictwa w Unii Europejskiej stanowi jedno z głównych źródeł emisji gazów cieplarnianych. Uwzględniając wytyczne Komisji Europejskiej odnośnie uzyskania w 2050 roku neutralności klimatycznej podejmowane są działania mające na celu ograniczenie wpływu tego sektora na środowisko. Jednym z pierwszych kroków jest skwantyfikowanie wpływu sektora na poszczególne kategorie szkód w środowisku. Zarządzanie wskaźnikami zrównoważonego rozwoju i śladem węglowym w budownictwie odgrywa istotną rolę [1]. Jednym z dokumentów wspierających zrównoważony rozwój w branży budowlanej jest deklaracja środowiskowa EPD (ang. *Environmental Product Declaration*), która zawiera informacje odnośnie oceny środowiskowej produktów uwzględniając ich cykl życia. EPD obejmuje informacje, które mogą stanowić istotny element w raportowaniu zrównoważonego rozwoju dla organizacji ESG (ang. *Environmental, Social, Governance*).

Aktualnie opracowywane są kolejne dyrektywy i rozporządzenia, które podkreślają podejście cyklu życia do wytwarzanych produktów oraz pojawił się wymóg Cyfrowego Paszportu Produktu DPP (ang. *Digital Product Passport*), również w branży budowlanej. Celem wprowadzenia w najbliższych latach DPP jest promowanie ekoprojektowania, zwiększanie zrównoważonego rozwoju i umożliwienie, aby każdy produkt był częścią modelu gospodarki o obiegu zamkniętym. Opracowanie EPD i DPP wymaga specjalistycznej wiedzy oraz doświadczenia, jak również zastosowania odpowiednich metod oceny cyklu życia. W celu opracowania deklaracji środowiskowej i paszportu produktu należy zastosować metodę oceny cyklu życia LCA (ang. *Life Cycle Assessment*), która umożliwia uwzględnienie całego cyklu życia. LCA wyrobów budowlanych, która stanie się obligatoryjna dla producentów zgodnie z nowymi regulacjami UE, to istotna metoda wspierająca transformację sektora budownictwa w kierunku gospodarki o obiegu zamkniętym. LCA pozwala szczegółowo ocenić wpływ na środowisko produktu na każdym etapie cyklu życia, od wydobycia surowców przez produkcję, transport, użytkowanie, aż do zagospodarowania odpadów.

W ostatnich latach pojawiają się coraz wyższe wymagania odnośnie oceny cyklu życia wyrobów budowlanych, jak również śladu węglowego. Według nowego rozporządzenia ESPR [2] ustanowiony jest DPP, w którym należy przedstawiać ślad węglowy i ślad środowiskowy produktów w całym cyklu życia, dodatkowo według nowego rozporządzenia CPR2 [3] dotyczące wyrobów budowlanych na terenie Unii Europejskiej, obiekty budowlane oraz ich części muszą być zaprojektowane, zbudowane, użytkowane, konserwowane i demontowane w taki sposób, aby przez cały cykl życia wykorzystanie zasobów naturalnych było zrównoważone. Nowe wytyczne odnośnie DPP wskazują na istotę informacji dotyczących analizy cyklu życia materiałów budowlanych zawartych w EPD, które zawierając dane dotyczące wpływu produktu na środowisko w całym cyklu życia.

W niniejszej pracy przedstawiono istotę i znaczenie deklaracji środowiskowych EPD, zgodnie z nowymi wytycznymi dla betonu w kontekście wymagań dotyczących zrównoważonego rozwoju w sektorze. Przedstawiono wytyczne do opracowania deklaracji środowiskowych dla obiektów budowlanych i betonu. Celem pracy było również zintegrowanie deklaracji środowiskowych EPD i paszportów produktów DPP uwzględniając kwestie związane z aspektami środowiskowymi uwzględniając perspektywę cyklu życia.

2. Typy i etapy opracowania deklaracji środowiskowych

Deklaracje środowiskowe EPD wymagają zastosowania określonych standardów, zapewniających jednoznaczność przekazywanych informacji i danych. Zasady i procedury przyznawania etykiet i deklaracji środowiskowych są określone w międzynarodowych normach. Wyróżnia się trzy typy etykiet i deklaracji środowiskowych. Seria norm ISO 14000 zawiera wytyczne dotyczące systemów zarządzania środowiskowego, w tym deklaracje środowiskowe:

- PN-EN ISO 14020 „Etykiety i deklaracje środowiskowe. Zasady ogólne”
- PN-EN ISO 14024 „Etykiety i deklaracje środowiskowe. Etykietowanie środowiskowe I typu. Zasady i procedury”
- PN-EN ISO 14021 „Etykiety i deklaracje środowiskowe. Własne stwierdzenia środowiskowe (Etykietowanie środowiskowe II typu)”
- PN ISO 14025 „Etykiety i deklaracje środowiskowe. Deklaracje środowiskowe III typu”.

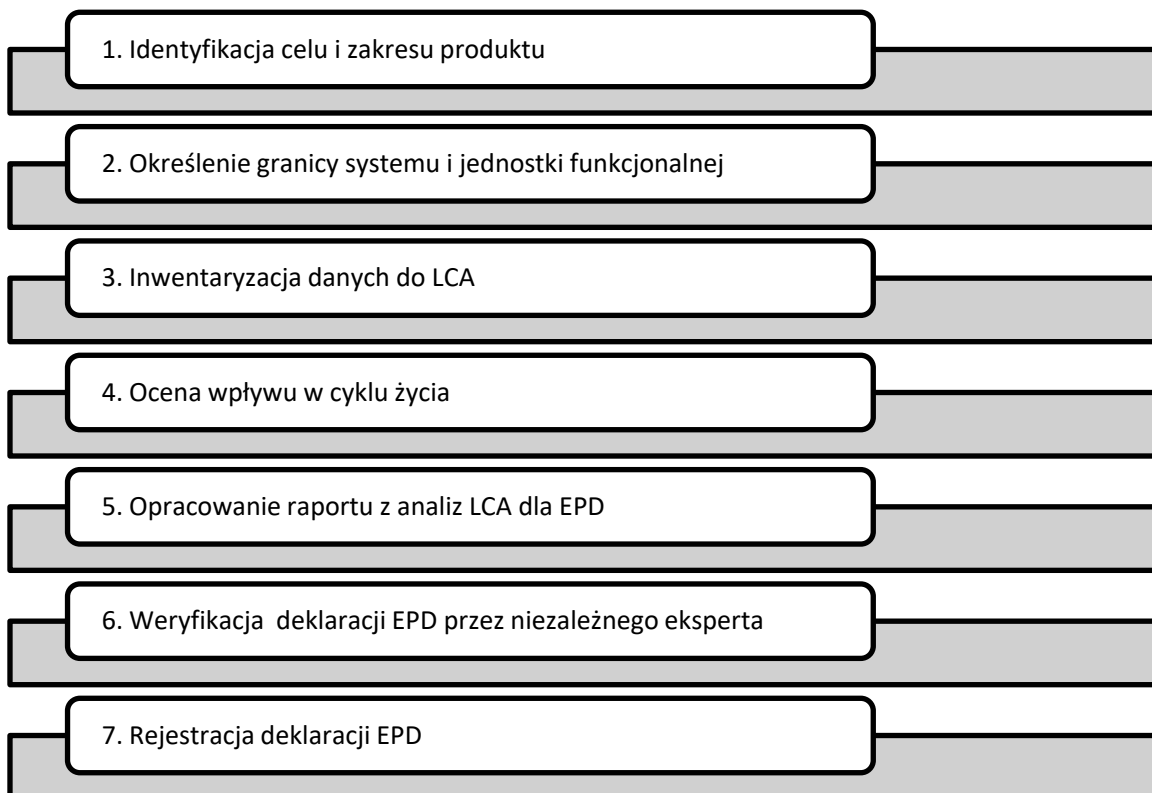
W tabeli 1 przedstawiono przykładowe deklaracje środowiskowe EPD dla producentów betonu. Na platformie międzynarodowej EPD (ang. *International EPD System*) [10] wszystkie deklaracje są w języku angielskim.

Tabela 1. Przykładowe deklaracja środowiskowe EPD dla betonu

Produkt	Producent
Vertua® plus concrete groups	CEMEX POLSKA
Beton ECOPact	Lafarge Cement S.A.
Beton towarowy C30/37 i C20/25	CONCRETE - ZABŁOCCY S.J.
Ready-Mix Concrete	Holcim (Australia) Pty Ltd
H-35 concrete and H-30 concrete	PROMOTORA MEDITERRANEA- 2 S.A. Spain
Ready mixed concrete, C28/35	Roma Grus AB Sweden
Ready mixed concrete, C35/45 XF4	Roma Grus AB Sweden
Precast Concrete Elements	GLAVBOLGARSTROY PREFAB EAD Bulgaria
Precast Concrete Product - Hollow-core Slabs	HORMIPRESA Spain
Concrete casting panel	QINGDAO CIMC COMPOSITES CO.,LTD China, Europe
Precast concrete products - Solid walls	Perdanga, UAB Lithuania
Precast concrete products	Prefabricados de hormigón Etxeberria, S.A. Spain
GASBETON - Autoclaved Aerated Concrete Blocks	Ekoru s.r.l. Italy
Concrete roofing tiles and fittings	BMI Group Nordic Sweden
Reinforced concrete element for underground constructions	Edilbloc Snc di Lanza Walter & C Italy
Precast solid concrete walls ECO 30	Skandinaviska Byggelement AB Sweden
Concrete middle Pile Type 8	Centrum Pile AB Sweden
Solid precast concrete insulated wall	Gripen Betongelement AB Sweden
Precast concrete columns	INHUS Prefab, UAB Lithuania
Solid precast concrete insulated lightweight wall	Gripen Betongelement AB Sweden

W celu uzyskania deklaracji środowiskowych należy wykonać analizy środowiskowe sprawdzonymi, dokładnymi i wiarygodnymi metodami oceny, uzasadnionymi naukowo. Deklaracje środowiskowe powinny zawierać informacje o okresie ważności, w celu zapewnienie ciągłego doskonalenia produktów oraz uwzględnienie zmieniających się warunków rynkowych, innowacji oraz postępu technologicznego. Po upływie określonego terminu zarówno etykieta, deklaracja, jak i procedury oraz kryteria przyjęte do jej opracowania powinny zostać poddane weryfikacji.

Deklaracje środowiskowe III typu [4] przedstawiają dane ilościowe dotyczące oddziaływania na środowisko danego produktu uwzględniając cykl życia. Dane przedstawione w deklaracjach przygotowywane są w oparciu o wyniki analiz oceny cyklu życia LCA według norm ISO 14040 [5] oraz ISO 14044 [6]. Określenie cyklu życia zgodnie z normą ISO 14040, oznacza „kolejne i powiązane ze sobą etapy systemu wyrobu, od pozyskania lub wytworzenia surowca z zasobów naturalnych do ostatecznej likwidacji”. Oznacza to że, deklaracja środowiskowa III typu odnosi się do całego cyklu życia produktów, a nie tylko jednego aspektu jak energochłonność w fazie użytkowania. Deklaracje te zawierają znacznie więcej danych i informacji środowiskowych niż deklaracje środowiskowe I i II typu. Deklaracje środowiskowe III typu są deklaracjami dobrowolnymi producenta, które wymagają weryfikacji przez niezależną третią stronę, w celu zapewnienia wiarygodności oraz spójności z wymaganiami normy ISO. Opracowanie deklaracji EPD wymaga kilku etapów, przedstawionych na rysunku 1.



Rys. 1. Etapy wykonania deklaracji środowiskowej EPD

Deklaracje środowiskowe III typu są wykorzystywane głównie w relacji business to business, na różnych poziomach łańcucha dostaw. Zasady dotyczące kategorii produktu PCR (ang. *Product Category Rules*) opracowywane są w ramach międzynarodowego systemu EPD. PCR zawierają instrukcje programowe i standardy, zasady i wytyczne oraz wymagania dotyczące opracowywania deklaracji środowiskowych dla określonych kategorii wpływu. Zasady kategorii produktów PCR są opracowane w celu umożliwienia zadeklarowania wpływu cyklu życia produktów na środowisko jako deklaracje środowiskowe typu III zgodnie z międzynarodową normą ISO 14025 [4].

Deklaracje EPD powinny być zgodne z regulacjami prawnymi i standardami międzynarodowymi. Dodatkowo deklaracja EPD powinna spełniać branżowe standardy ISO oraz specyficzne reguły kategorii produktu PCR określone przez organizację producentów.

3. Wytyczne do opracowania deklaracji środowiskowych dla obiektów budowlanych i betonu

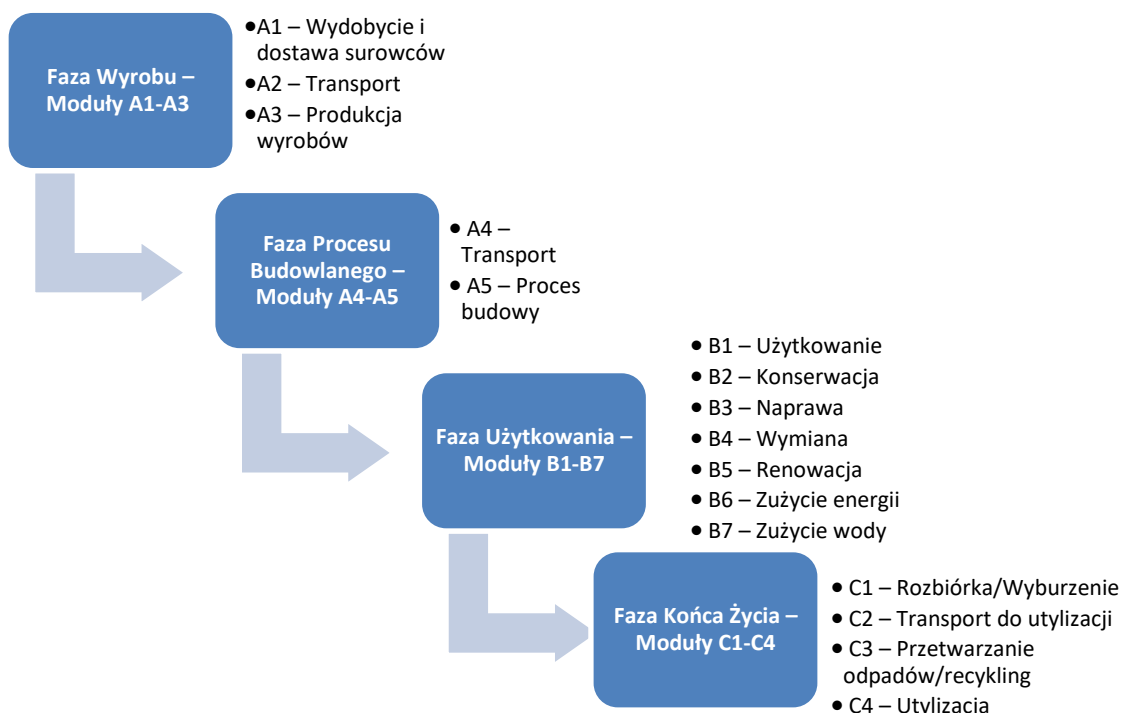
Do opracowania deklaracji środowiskowej służy wiele regulacji i norm, które obejmują zarówno zasady wykonania deklaracji, jak również wymagań odnośnie analizy cyklu życia dla deklaracji środowiskowej EPD. W tabeli 2 przedstawiono normy dotyczące analiz cyklu życia oraz środowiskowych deklaracji wyrobu dla obiektów budowlanych i betonu.

Jak wykazano w tabeli 2 opracowanie deklaracji środowiskowej obiektów budowlanych i betonu wymaga znajomości wytycznych zgodnie z wieloma normami. W przypadku obiektów budowlanych analizy LCA w deklaracjach środowiskowych mogą obejmować następujące moduły przedstawione na rysunku 2. Zasady kategorii produktu dla betonu i elementów betonowych, zawierają wytyczne do opracowania deklaracji środowiskowych betonu i elementów betonowych, które obejmują elementy, jak [7, 8]:

- granica systemu, która obejmuje procesy i etapy cyklu życia produktu, które należy wziąć pod uwagę, w tym wyróżnia się oceny od kołyski do bramy z opcjami, albo od kołyski do grobu,
- modelowanie i ocena właściwości specyficznych dla stosowanych materiałów,
- procedury alokacji dla procesów wieloproduktowych w całym łańcuchu produkcyjnym,
- procedury alokacji w zakresie ponownego użycia i recyklingu,
- zasady inwentaryzacji danych do obliczenia wskaźników środowiskowych,
- zasady wykonania analiz oceny wpływu w cyklu życia odpowiednie dla EPD betonu,
- wytyczne i zasady określania referencyjnego okresu użytkowania.

Tabela 2. Normy dotyczące analiz cyklu życia oraz środowiskowych deklaracji produktu EPD dla obiektów budowlanych oraz betonu

Norma	Zakres
EN 15941:2024 - Sustainability of construction works - Data quality for environmental assessment of products and construction work - Selection and use of data	Definiuje wymagania dotyczące jakości danych w odniesieniu do reprezentatywności czasowej, technologicznej i geograficznej dla danych używanych do analizy wskaźników opartych na LCA, EPD oraz dla prac budowlanych przy stosowaniu EPD, danych inwentaryzacji cyklu życia lub innych informacji opartych na LCA.
PN-EN 15804+A2:2020-03 Zrównoważenie obiektów budowlanych -- Deklaracje środowiskowe wyrobu -- Podstawowe zasady kategoryzacji wyrobów budowlanych	Obejmuje podstawowe zasady kategoryzacji wyrobu (PCR) do deklaracji środowiskowych III typu wyrobu i usługi budowlanej. Definiuje wskaźniki oraz sposób ich zestawiania i raportowania, fazy cyklu życia wyrobu uwzględniane w EPD, zasady opracowywania scenariuszy, zasady obliczania analizy zbioru danych wejściowych i wyjściowych w cyklu życia i oceny oddziaływania w cyklu życia.
PN-EN 15978:2012 Zrównoważone obiekty budowlane -- Ocena środowiskowych właściwości użytkowych budynków -- Metoda obliczania	Podano metodę oceny cyklu życia (LCA) w celu oceny środowiskowych właściwości użytkowych budynku. Podejście do oceny obejmuje wszystkie etapy cyklu życia budynku i jest ono oparte na danych otrzymanych ze środowiskowych deklaracji wyrobu (EPD).
PN-EN ISO 14025:2010 Etykiety i deklaracje środowiskowe -- Deklaracje środowiskowe III typu -- Zasady i procedury	Ustalono zasady i określono procedury opracowania deklaracji środowiskowych III typu. W szczególności określono wykorzystanie norm serii ISO 14040 przy opracowaniu programów i deklaracji środowiskowych III typu.
PN-EN ISO 14040:2009 Zarządzanie środowiskowe -- Ocena cyklu życia -- Zasady i struktura	Opisano zasady i strukturę oceny cyklu życia (LCA), w tym podstawowe etapy cyklu życia produktu
PN-EN ISO 14044:2009 Zarządzanie środowiskowe -- Ocena cyklu życia -- Wymagania i wytyczne	Podano wymagania i procedury niezbędne do oceny cyklu życia (LCA)
PN-EN ISO 14067:2018-10 Gazy cieplarniane -- Ślad węglowy wyrobów -- Wymagania i wytyczne dotyczące kwantyfikacji	Określono zasady, wymagania i wytyczne dotyczące kwantyfikacji i raportowania śladu węglowego wyrobu (CFP) zgodnie z oceną cyklu życia (LCA) (ISO 14040 i ISO 14044). Niniejszy dokument dotyczy tylko jednej kategorii wpływu: zmiany klimatu.
PCR 2019:14-c-PCR-003 Beton i elementy betonowe (EN 16757)	W przypadku wszystkich zasad i instrukcji metodologicznych c-PCR odnosi się do normy EN 16757:2022 Zrównoważony rozwój obiektów budowlanych - Deklaracje środowiskowe produktu - Zasady kategorii produktu dla betonu i elementów betonowych.
PN-EN 16757:2023-04 Zrównoważone podejście do obiektów budowlanych -- Deklaracje środowiskowe wyrobu -- Zasady dotyczące kategorii wyrobów w odniesieniu do betonu i elementów betonowych	Opisano parametry, zasady oraz etapy przeprowadzania analizy cyklu życia (LCA) przy opracowywaniu EPD dla betonu i elementów betonowych dla budownictwa, z wyłączeniem autoklawizowanego betonu komórkowego i betonu związanego żywicą. Jest przeznaczony do stosowania jako c-PCR w połączeniu z normą EN 15804:2012+A2:2019.



Rys. 2. Moduły oceny cyklu życia obiektów budowlanych w deklaracjach środowiskowych [9]

W sektorze budownictwa wysoki wbudowany ślad węglowy związany jest z kluczowymi materiałami konstrukcyjnymi, jak stal i beton, które odpowiadają nawet za około 70% emisji gazów cieplarnianych w module pierwszym A1-A3. Analiza LCA betonu w przypadku deklaracji środowiskowej obejmuje moduły związane z jego procesem produkcyjnym i jest najczęściej wyrażony jako ekwiwalent CO₂ na m³ mieszanki betonowej [10].

4. Zintegrowanie deklaracji środowiskowej i paszportu produktu

Komisja Europejska dotychczas opracowała wiele regulacji, które obejmują zupełnie nowe podejście do oceny środowiskowej wyrobów, w tym wyrobów budowlanych. I tak:

- Pierwszym dokumentem odnośnie Cyfrowego Paszportu Produktu DPP był unijny plan działania na rzecz gospodarki o obiegu zamkniętym CEAP (ang. *Circular Economy Action Plan*) [11].
- W rozporządzeniu UE dotyczącym ekoprojektowania ESPR (ang. *Ecodesign for Sustainable Products Regulation*) [2] zostały przedstawione wytyczne dotyczące cyfrowego paszportu produktu DPP oraz parametry produktów, które powinny być uwzględnione w DPP (załącznik 1 ESPR), w tym między innymi ślad środowiskowy produktu, ślad węglowy produktu oraz ślad materiałowy produktu.
- Według nowego rozporządzenia (UE) 2024/3110 CPR2 [3] jednym z istotnych nowości jest podejście do wyrobów budowlanych, które obejmuje cykl życia, co

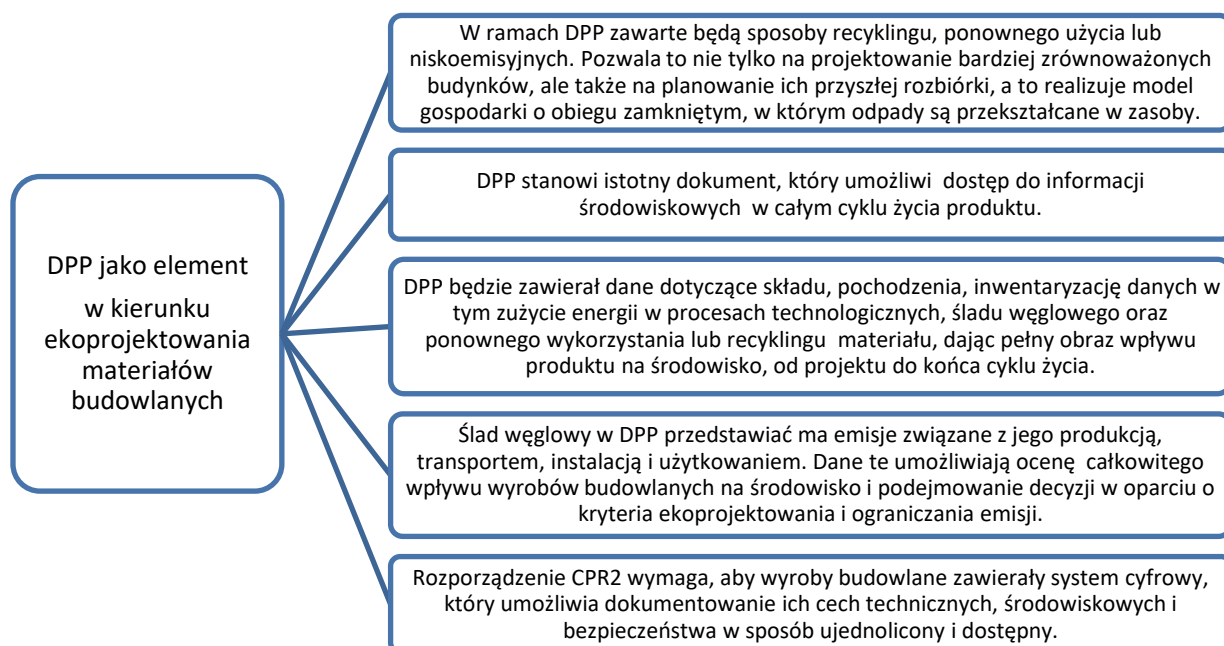
oznacza kolejne powiązane ze sobą etapy cyklu życia wyrobu, od nabycia surowca lub jego pozyskania z zasobów naturalnych, a w przypadku wyrobów, które wcześniej wbudowano w obiekty budowlane – od ostatniego demontażu z obiektu budowlanego, do ostatecznego usunięcia wyrobu. Obiekty budowlane oraz wszelkie ich części muszą być zaprojektowane, zbudowane, użytkowane, konserwowane i demontowane lub rozbierane w taki sposób, aby przez cały cykl życia wykorzystanie zasobów naturalnych było zrównoważone. To nowe podejście jest zgodne z zasadami gospodarki o obiegu zamkniętym.

- Nowe rozporządzenie Parlamentu Europejskiego i Rady (UE) 2024/3110, (CPR2) [3] wprowadza cyfrowy paszport produktów dla wyrobów budowlanych. Głównym celem nowego rozporządzenia 2024/3110 [3] jest zharmonizowanie aspektów technicznych, środowiskowych i bezpieczeństwa dla wyrobów budowlanych. W tym ma pomóc wprowadzony w rozporządzeniu Cyfrowy paszport produktu (DPP), który będzie obowiązkowy dla wielu produktów od 2026 r.

Zgodnie z rozporządzeniem ESPR [2] wyroby prefabrykowane z betonu zwykłego, lekkiego, autoklawizowanego napowietrzonego należą do rodziny wyrobów, dla których będzie obowiązkowe opracowanie paszportów DPP. Na rysunku 3 przedstawiono zakres DPP w kierunku ekoprojektowania materiałów budowlanych, natomiast w tabeli 3 przedstawiono analizę porównawczą wytycznych DPP oraz EPD na przykładzie betonu.

Wpływ betonu związany jest z wieloma procesami, w tym wydobycie kamienia wapiennego, produkcja cementu, produkcja mieszanki betonowej, transport, zastosowanie mieszanki oraz ostatni etap życia który może również uwzględniać wiele procesów. Dzięki analizie LCA, która uwzględnia cały cykl życia betonu można określić które procesy i materiały powodują najwyższe emisje. To pomaga w kolejnym kroku, którym jest optymalizacja receptur i składu oraz optymalizacja elementów konstrukcyjnych. Stwierdzono, że zastosowanie betonu o niskim śladzie węglowym może znacznie obniżyć wbudowany ślad węglowy [10].

W przypadku paszportu produktu DPP można na początek zastosować dane i wskaźniki w oparciu o deklaracje środowiskowe EPD, które zawierają zweryfikowane dane niezbędne do analizy porównawczej środowiskowej oceny cyklu życia, jednak pamiętając, że deklaracje są aktualizowane po około 5 latach, a w przypadku DPP można wprowadzać aktualizację wraz ze zmianą technologii czy po wprowadzeniu innowacji. Docelowo również dodatkowe korzyści dla materiałów budowlanych można uzyskać poprzez integrację systemu modelowania informacji o budynkach BIM (ang. *Building Information Modeling*) z EPD i DPP.



Rys. 3. Zakres DPP w kierunku ekoprojektowania materiałów budowlanych [2, 3].

Tabela 3. Analiza porównawcza wytycznych EPD i DPP na przykładzie betonu [2, 8]

Lp.	Aspekt	EPD	DPP
1	Cel analizy	Przedstawia informacje o oddziaływaniu deklarowanych betonów na środowisko uwzględniając najczęściej granicę systemu od wydobycia surowców do bramy firmy. Aspekty środowiskowe są zweryfikowane przez niezależny przedsiębiorstwo.	Cyfrowy Paszport Produktu betonu pozwala na identyfikację produktu, zawiera informacje o wyrobie w całym cyklu życia. Informacje dotyczą całego cyklu – od produkcji, przez dystrybucję, aż po recykling
2	Granica systemu	Cykl życia betonu może obejmować różne granice w zależności od celu analiz: Od kołyski do bramy z modułami C1–C4 i modułem D Od kołyski do bramy z opcjami, modułami C1–C4, modułem D i z opcjonalnymi modułami Od kołyski do grobu i modułu D Od kołyski do bramy (A1–A3). Od kołyski do bramy z opcjami	Cykl życia obejmuje kolejne powiązane ze sobą etapy cyklu życia wyrobu, od nabycia surowca, a w przypadku wyrobów, które wcześniej wbudowano w obiekty budowlane – od ostatniego demontażu z obiektu budowlanego, do ostatecznego usunięcia wyrobu;
3	Inwentaryzacja danych	Skład i produkcja mieszanek betonowych	Skład i pochodzenie surowców i materiałów, w tym zużycie energii
4	Kategoria oddziaływania	Wskaźniki środowiskowe zgodnie z metodą ILCD, w tym między innymi zmiana klimatu, działanie toksyczne dla ludzi, wpływ na zdrowie człowieka, zakwaszenie, eutrofizacja oraz zużycie zasobów naturalnych	Wskaźniki oceny cyklu życia, takie jak ślad środowiskowy, ślad węglowy, ślad materiałowy
5	Dokument	Certyfikat deklaracji środowiskowej III typu	Cyfrowy paszport produktu

5. Kluczowy wskaźnik środowiskowy dla EPD betonu

Najistotniejszym wskaźnikiem dla deklaracji środowiskowych w przypadku betonu jest emisja gazów cieplarnianych. Na podstawie analizy wybranych deklaracji środowiskowej III typu dla betonu [10], stwierdzono, że kwestie związane z analizą emisji gazów cieplarnianych są różnie definiowane, dlatego istotne jest ujednolicenie nomenklatury na potrzeby EPD. W tabeli 4 przedstawiono podsumowanie przeglądu wskaźnika środowiskowego związanego ze śladem węglowym zgodnie z nowymi regulacjami prawnym w odniesieniu do oceny efektywności środowiskowej produktów, w tym obiektów budowlanych i betonu.

Tabela 4. Wskaźniki związane ze śladem węglowym obiektów budowlanych i betonu

Regulacje prawne	Wskaźnik środowiskowy	Definicja
PCR 2019:14 Beton i elementy betonowe [7]	Wskaźnik GWP-total	wskaźnik GWP total jest identyczny z GWP-GHG
Recast EPBD [12]	Współczynnik globalnego ocieplenia (GWP) w całym cyklu życia budynku	wskazuje na ogólny wkład budynku w emisje prowadzące do zmiany klimatu
	Emisje gazów cieplarnianych w całym cyklu życia	oznacza emisje gazów cieplarnianych, które powstają na wszystkich etapach cyklu życia budynku, w tym na etapie produkcji i transportu wyrobów budowlanych, działań na miejscu budowy, zużycia energii w budynku i wymiany wyrobów budowlanych, a także rozbiórki oraz transportu materiałów odpadowych i gospodarowania nimi oraz ich ponownego użycia, recyklingu i ostatecznego usunięcia;
PN-EN 15804 [9]	Całkowity współczynnik globalnego ocieplenia (całkowity GWP)	jest sumą kopalnego GWP, biogenego GWP oraz GWP-luluc
	Zmiany klimatu	określana jest jako współczynnik globalnego ocieplenia, całkowity potencjał globalnego ocieplenia jako całkowity GWP
Rozporządzenie ESPR [2] (wprowadza DPP)	Ślad środowiskowy	oznacza ilościowe określenie wpływów cyklu życia produktu na środowisko, w oparciu o metodę oznaczania śladu środowiskowego produktu ustanowioną zaleceniem (UE) 2021/2279
	Ślad węglowy	oznacza sumę emisji gazów cieplarnianych oraz pochłaniania gazów cieplarnianych w systemie produktowym, wyrażoną jako ekwiwalent dwutlenku węgla i opierającą się na ocenie cyklu życia wykorzystującej jedną kategorię wpływu – zmiana klimatu
	Ślad materiałowy	oznacza całkowitą ilość surowców wydobytych w celu zaspokojenia potrzeb konsumpcji końcowej
Raport Levels [13]	Ślad węglowy	suma emisji i pochłaniania gazów cieplarnianych w systemie produktu, wyrażona jako ekwiwalenty CO ₂ i oparta na ocenie cyklu życia przy użyciu pojedynczej kategorii wpływu zmiany klimatu
	Potencjał globalnego ocieplenia (GWP)	współczynnik charakterystyki opisujący radiacyjny wpływ wymuszania jednej jednostki masy danego gazu cieplarnianego w stosunku do dwutlenku węgla w danym okresie czasu
ISO 14067 [14]	Ślad węglowy	suma emitowanych i pochłanianych przez produkt gazów cieplarnianych, wyrażana ekwiwalentem CO ₂ i bazująca na ocenie cyklu życia

Na podstawie przeglądu wskaźników oceny związanych ze śladem węglowym przedstawionych w tabeli 3, wykazano, że w przypadku regulacji odnoszących się do materiałów budowlanych są używane inne pojęcia, niezgodne z nomenklaturą stosowaną w raportach dotyczących zmian klimatu opracowanych przez Międzyrządowy Zespół ds. Zmian Klimatu IPCC (ang. *Intergovernmental Panel on Climate Change*).

Zgodnie z wykonanym przeglądem raportów IPCC dotyczących gazów cieplarnianych stwierdzono, że w celu wykonania oceny emisji gazów cieplarnianych należy uwzględnić wartości potencjału globalnego ocieplenia GWP (ang. *Global Warming Potential*) w odniesieniu do CO₂ zgodnie z metodyką IPCC. W tabeli 5 przedstawiono wartości potencjału globalnego ocieplenia (GWP) dla najważniejszych gazów cieplarnianych dla horyzontu czasowego 100 lat według Szóstego Raportu IPCC [15]. Jak widać w tabeli 4 GWP dla dwutlenku węgla wynosi 1. Przykładowo dla podtlenku azotu (N₂O) wartość potencjału globalnego ocieplenia wynosi 273, więc emisja gazu cieplarnianego 1 Mg N₂O odpowiada 273 Mg eqCO₂.

Tabela 5. Wartości potencjału globalnego ocieplenia (GWP) dla wybranych gazów cieplarnianych [15]

Gazy cieplarniane	Wzór chemiczny	Wartości wskaźnika GWP
Dwutlenek węgla	CO ₂	1,0
Metan – niekopalny	CH ₄	27,0
Metan – kopalny	CH ₄	29,8
Podtlenek azotu	N ₂ O	273,0
Trójfluorek azotu	NF ₃	17400,0
Sześćfluorek siarki	SF ₆	24300,0

W przypadku deklaracji środowiskowych istotne jest rozróżnienie śladu węglowego, emisji gazów cieplarnianych oraz potencjału globalnego ocieplenia. Dla obiektów budowlanych dodatkowo rozróżnia się ślad węglowy wbudowany (dotyczy między innymi śladu węglowego betonu) i operacyjny.

Dyrektywa EPBD [12] jest kluczowym elementem unijnej polityki energetycznej, mającym na celu poprawę efektywności energetycznej budynków oraz redukcję emisji gazów cieplarnianych. Zgodnie z Dyrektywą EPBD współczynnik globalnego ocieplenia (GWP) wyraża zarówno emisje dwutlenku węgla wbudowane w wyroby budowlane, jak i bezpośrednie i pośrednie emisje dwutlenku węgla na etapie użytkowania. Wymóg obliczania GWP w cyklu życia nowych budynków stanowi zatem pierwszy krok w kierunku lepszego uwzględnienia charakterystyki całego cyklu życia budynków i gospodarki o obiegu zamkniętym.

Jak wykazano w tabeli 4 współczynnik GWP jest stałą wartością dla gazów cieplarnianych określaną przez Międzyrządowy Zespół ds. Zmian Klimatu, dlatego nie może być zmienny w cyklu życia budynku.

Na podstawie analizy definicji zawartych w Dyrektywie EPBD można stwierdzić, że pojęcie emisji gazów cieplarnianych oraz potencjału globalnego ocieplenia zostało potraktowane tak samo. Podobnie jest w przypadku zdefiniowania potencjału globalnego ocieplenia GWP zgodnie z normą PN-EN 15804+A2:2020-03 [9], gdzie kategoria oddziaływania na zmiany klimatu określana jest jako współczynnik globalnego ocieplenia.

Wskaźniki śladu środowiskowego oraz śladu węglowego czyli wskaźniki efektywności środowiskowej uwzględniające cykl życia wyrobów budowlanych oraz betonu, powinny być obliczane z uwzględnieniem metod opracowanych na poziomie międzynarodowym. Podstawową organizacją, która opracowuje wskaźniki dotyczące zmian klimatu jest Międzyrządowy Zespół ds. Zmian Klimatu (IPCC).

6. Wnioski

- Komisja Europejska wskazała sektor budowlany jako jeden z tych, który stoi przed największymi wyzwaniami związanymi z realizacją celów w zakresie klimatu i zrównoważonego rozwoju. To wiąże się z opracowaniem przepisów związanych z deklarowaniem właściwości użytkowych w zakresie zrównoważenia środowiskowego i zrównoważonego charakteru wyrobów budowlanych, w tym ustanowieniem wartości progowych i klas. W tym celu, odnośnie kwestii związanych z aspektami środowiskowymi wyrobów budowlanych, pomóc mogą istniejące deklaracje środowiskowe EPD dla wyrobów budowlanych.
- Wprowadzenie wielu regulacji Komisji Europejskiej również ma wpływ na sektor budowlany. Wymagania odnośnie zrównoważonego rozwoju, nowego podejścia do ekoprojektowania obiektów budowlanych, czy wymóg zastosowania cyfrowego paszportu produktu DPP zmieniają podejście do produktu, gdyż wymagają nowej perspektywy cyklu życia. Dlatego istotnym jest zintegrowanie działań w kierunku ujednolicenia metodyki oceny cyklu życia, śladu węglowego, jak i wytycznych oraz ujednolicenia i uporządkowania nomenklatury zarówno dla EPD jak i DPP.
- 7 stycznia 2025 r. weszło w życie w Polsce rozporządzenie CPR2, które zawiera nowe podejście do oceny środowiskowej materiałów budowlanych i wprowadza obligatoryjny cyfrowy paszport produktu. DPP ma przedstawiać całkowicie nową perspektywę do oceny produktów i materiałów budowlanych uwzględniając analizę cyklu życia. Co istotne interesariusze zewnętrzni będą mieli dostęp do informacji odnośnie zużytych materiałów, surowców, wskaźników środowiskowych, śladu węglowego i metod recyklingu czy utylizacji. Aktualnie jest etap opracowywania wytycznych do DPP, dlatego tak istotne jest już teraz wykazanie, iż w przypadku oceny środowiskowej materiałów budowlanych istnieją wytyczne, które warto wykorzystać do opracowania DPP.
- Wykazano, że materiały budowlane, w tym wyroby prefabrykowane z betonu zwykłego, lekkiego, autoklawizowanego napowietrzonego należą do rodziny wyrobów, dla których trzeba będzie opracować DPP, dlatego ważna jest ocena zgodności i zintegrowanie informacji wymaganych w paszportach produktów DPP z dotychczas opracowanymi deklaracjami EPD. Zasadne wydaje się ustalenie wytycznych dotyczących opracowania paszportu produktu uwzględniając wskaźniki z deklaracji środowiskowych EPD.
- Na podstawie analizy nomenklatury stosowanej zarówno w normach, rozporządzeniach odnośnie analiz cyklu życia obiektów budowlanych i betonu oraz stosowanej w deklaracjach środowiskowych EPD wykazano, że należy ujednolicić pojęcia stosowane szczególnie w normach uwzględniając raporty dotyczące kwestii związanych z emisjami gazów cieplarnianych.

7. Literatura

- [1] Burchart D., Schabowicz K., Zarządzanie śladem węglowym w sektorze budownictwa, „Inżynier Budownictwa” 5/2024.
- [2] Rozporządzenie Parlamentu Europejskiego I Rady (UE) 2024/1781 z dnia 13 czerwca 2024 r. w sprawie ustanowienia ram ustalania wymogów ekoprojektu w odniesieniu do zrównoważonych produktów (Rozporządzenie ESPR).
- [3] Rozporządzenie Parlamentu Europejskiego I Rady (UE) 2024/3110 z dnia 27 listopada 2024 r. w sprawie ustanowienia zharmonizowanych zasad wprowadzania do obrotu wyrobów budowlanych i uchylenia rozporządzenia (UE) nr 305/2011 (Rozporządzenie CPR2).
- [4] PN-EN ISO 14025:2010 Etykiety i deklaracje środowiskowe -- Deklaracje środowiskowe III typu -- Zasady i procedury.
- [5] PN-EN ISO 14040:2009 Zarządzanie środowiskowe -- Ocena cyklu życia -- Zasady i struktura.
- [6] PN-EN ISO 14044:2009 Zarządzanie środowiskowe -- Ocena cyklu życia -- Wymagania i wytyczne.
- [7] PCR 2019:14-c-PCR-003 Beton i elementy betonowe (EN 16757).
- [8] PN-EN 16757:2023-04 Zrównoważone podejście do obiektów budowlanych -- Deklaracje środowiskowe wyrobu -- Zasady dotyczące kategorii wyrobów w odniesieniu do betonu i elementów betonowych.
- [9] PN-EN 15804+A2:2020-03 Zrównoważenie obiektów budowlanych -- Deklaracje środowiskowe wyrobu -- Podstawowe zasady kategoryzacji wyrobów budowlanych.
- [10] EPD International System <https://www.environdec.com/library> (Dostęp 29.05.2025 r).
- [11] Communication From The Commission To The European Parliament, The Council, The European Economic And Social Committee And The Committee Of The Regions. A new Circular Economy Action Plan For a cleaner and more competitive Europe COM/2020/98 final.
- [12] Dyrektywa Parlamentu Europejskiego I Rady (UE) 2024/1275 z dnia 24 kwietnia 2024 r. w sprawie charakterystyki energetycznej budynków (Dyrektywa EPBD).
- [13] Dodd N., Donatello S. & Cordella M., 2021. Level(s) indicator 1.2: Life cycle Global Warming Potential (GWP) user manual: introductory briefing, instructions and guidance (Publication version 1.1).
- [14] PN-EN ISO 14067:2018-10 Gazy cieplarniane -- Ślad węglowy wyrobów -- Wymagania i wytyczne dotyczące kwantyfikacji.
- [15] Sixth Assessment Report <https://www.ipcc.ch/assessment-report/ar6/> (Dostęp 29.05.2025 r).

Paweł Tokarz

P.P.M. Bosta Beton Sp. z o.o.

„Beton w zgodzie z naturą czyli „ZERO WASTE (zero marnowania) - kruszywo z recyklingu w połączeniu z cementami niskoemisyjnymi w betonie jako przyszłość budownictwa”

Streszczenie

Produkcja betonu jest silnie związana z potrzebami człowieka, ale i z uwarunkowaniami środowiska naturalnego. Do produkcji betonu wykorzystywane są zasoby naturalne i przez procesy technologiczne tworzony jest bardzo wdzięczny w użytkowaniu człowieka materiał konstrukcyjny o ciekawych walorach wizualnych, dzięki któremu powstają domy, mosty, obiekty inżynieryjne. Rozwój cywilizacji powoduje duże zapotrzebowanie na produkcję betonu a tym samym eksploatację naturalnych surowców m.in. kruszywa naturalne czy emisję CO₂. Idea „zero waste” jest przeciw wagą dla niepohamowanej eksploatacji tworzonych dóbr. Produkcja betonu nie może być obojętna na ewolucję potrzeb rynku, więc idea zrównoważonego rozwoju poprzez ideę „zero waste” wskazuje nowy kierunek dla producentów betonu. Bosta-Beton Sp.z o.o. jako producent betonu rozwija nowe kierunki w produkcji, prowadzi badania nad wykorzystaniem nowych źródeł surowców w tym kruszywa z recyklingu celem ograniczenia eksploatacji naturalnych surowców.

W artykule przedstawione są możliwości prowadzenia produkcji betonu w myśl idei „zero waste” poprzez analizę dokumentów normowych i prawnych, przez badania dostępnych surowców z kruszywa z recyklingu oraz cementów niskoemisyjnych CEM IV czy CEM II B-V po wskazanie pozytywnych i negatywnych skutków takiego działania.

Podsumowanie dokonanych analiz prawnych, badawczych, ekonomicznych przez Bostę-Beton ma na celu wskazanie w jakim punkcie przemian obecnie jest produkcja betonu w Polsce na tle światowych trendów w myśl idei „ZERO WASTE” (zero marnowania).

Abstract

Concrete production is closely linked to human needs, as well as to the conditions of the natural environment. Natural resources are used in the production of concrete, and through technological processes, a highly versatile and user-friendly construction material is created—one with appealing visual qualities that enable the construction of houses, bridges, and engineering structures. The advancement of civilization generates high demand for concrete production, which in turn leads to the exploitation of natural resources such as natural aggregates and contributes to CO₂ emissions. The "zero waste" concept serves as a counterbalance to the unrestrained exploitation of resources. Concrete production cannot remain indifferent to the evolving needs of the market, and thus, the idea of sustainable development through the "zero waste" approach points to a new direction for concrete manufacturers. Bosta-Beton Sp. z o.o., as a concrete producer, is developing new approaches to production and conducting research into the use of alternative raw material sources, including recycled aggregates, in order to reduce the exploitation of natural resources.

This article presents the possibilities of conducting concrete production in accordance with the "zero waste" philosophy, through the analysis of standard and legal documents, research into available recycled aggregates and low-emission cements such as CEM IV and CEM II B-V, and an assessment of the positive and negative effects of such practices.

The summary of legal, research, and economic analyses conducted by Bosta-Beton aims to highlight the current state of concrete production in Poland within the context of global trends, in line with the "ZERO WASTE" philosophy."

1. Wprowadzenie

We współczesnym świecie zdominowanym przez rozwój nowych technologii, coraz powszechniejsze jest wykorzystywanie cyfrowych narzędzi i osiągnięć cywilizacji to wciąż niezmiennie do budowy domów, mostów, dróg wykorzystujemy znany od wieków beton. Mamy świadomość, że jest to wciąż podstawowy materiał do budowy konstrukcji inżynierskich jak i wdzięczny materiał do tworzenia ciekawych form architektonicznych. Niemniej jedna i ten materiał podlega ewolucji i zmienia się poprzez wykorzystywanie nowych technologii jak domieszki nowej generacji np. polimerowe czy dodatki powodujące „samoleczenie” się betonu. Do produkcji betonu oprócz standardowych surowców takich jak cement, kruszywo, woda, domieszki i dodatki zaczęto używać wszelkiego rodzaju włókien stalowych jak i z tworzyw sztucznych typu plastik. Z uwagi na wymagania Parlamentu Europejskiego o redukcji dwutlenku węgla cementownie zmieniają podejście do produkcji dotychczas produkowanych cementów oferując nowe cementy o niskim śladzie węglowym.

P.P.M.B. Bosta-Beton A CRH Company produkując beton na rynku polski od 35 lat bazując na doświadczeniach inżynierów i technologów również pracując nad rozwojem technologii produkcji betonu w oparciu o nowe surowce.

W artykule prezentowany jest przykład podążania za zmianami cywilizacyjnymi czyli większego poszanowania dla środowiska naturalnego. Kierując się polityką „ZERO WASTE (zero marnowania) podjęliśmy jako zespół technologów Bosta-Beton wyzwanie, aby nasze prace rozwojowe ukierunkować na produkcję betonu z wykorzystaniem kruszywa z recyklingu oraz cementów niskoemisyjnych. Wszystko po to by móc realizować potrzeby rynku budowlanego ale w trosce o środowisko naturalne. Przeprowadziliśmy analizę dostępności surowców i wykonaliśmy serie badań celem opracowania optymalnego rozwiązania mieszanek betonowych z wykorzystaniem kruszyw naturalnych oraz pochodzących z odzysku w połączeniu z cementami z dodatkami CEM IV czy CEM II B-V.

2. Analiza wymagań prawnych i normowych dla kruszyw z recyklingu

P.P.M.B. Bosta-Beton A CRH Company jako świadomy producent betonu prowadzi produkcję w oparciu o obowiązujące wymagania prawne, zapisy norm krajowych i europejskich. Analizując zapisy obowiązujących, na dzień dzisiejszy, norm istnieje możliwość wykorzystywania oprócz kruszyw naturalnych także kruszyw z odzysku co wpisuje się w politykę „ZERO WASTE” (zero marnowania).

Zgodnie z normą PN-EN 12620+A1 "Kruszywo do betonu" będziemy nazywać – kruszywo z recyklingu jako powstałe w wyniku przeróbki nieorganicznego materiału zastosowanego uprzednio w budownictwie. W normie PN-EN 12620+A1 w tablicy 20 mamy klasyfikację składników kruszyw grubych z recyklingu.

Tablica 20 - Kategorie składników grubych kruszyw z recyklingu

Składniki	Zawartość procent masy	Kategorie
Rc	≥ 90 ≥ 80 ≥ 70 ≥ 50 < 50	Rc ₉₀ Rc ₈₀ Rc ₇₀ Rc ₅₀ Rc Deklarowana
	Brak wymagania	Rc _{NR}
Rc + Ru	≥ 95 ≥ 90 ≥ 70 ≥ 50 < 50	Rcu ₉₅ Rcu ₉₀ Rcu ₇₀ Rcu ₅₀ Rcu Deklarowana
	Brak wymagania	Rcu _{NR}
Rb	≤ 10 ≤ 30 ≤ 50 > 50	Rb ₁₀₋ Rb ₃₀₋ Rb ₅₀₋ Rb Deklarowana
	Brak wymagania	Rb _{NR}
Ra	≤ 1 ≤ 5 ≤ 10	Ra ₁₋ Ra ₅₋ Ra ₁₀₋
X + Rg	$\leq 0,5$ ≤ 1 ≤ 2	XRg _{0,5-} XRg ₁₋ XRg ₂₋
	Zawartość cm³/Kg	
FL	$\leq 0,2^a$	FL _{0,2-}
	≤ 2	FL ₂₋
	≤ 5	FL ₅₋
^a Kategoria $\leq 0,2$ przeznaczona jest tylko do specjalnych zastosowań, wymagających wysokiej jakości wykończenia powierzchni.		

Tabela nr 1 Zestawienie klasyfikacji składników wg normy PN-EN 12620+A1

W normie PN-EN 12620+A1 "Kruszywo do betonu" mamy dokładny podział na pochodzenie składników i procentowy udział poszczególnych materiałów, które mogą wchodzić w skład kruszywa z recyklingu.

Składnik	Opis
Rc	Beton, wyroby betonowe. zaprawa, betonowe elementy murowe
Ru	Kruszywo niezwiązane, kamień naturalny, kruszywo związane hydraulicznie
Rb	Ceramiczne elementy murowe (tj. cegły i dachówki) Silikatowe elementy murowe Beton napowietrzony nie pływający w wodzie
Ra	Materiały bitumiczne
FL	Materiał pływający w wodzie, objętościowo
X	Inne: Spoiste (np. glina i grunt) Metale różne (żelazne i nieżelazne), Nie pływające w wodzie drewno, plastik i guma Tynk gipsowy
Rg	Szkło

Tabela nr 2 Opis składników wg normy PN-EN 12620+A1

Przykłady kruszyw recyklingowych powstałych z różnych rodzajów materiałów obrazują poniższe zdjęcia:



Fot 1. Magazyn kruszyw z recyklingu



Fot 2. Kruszywa z recyklingu z różnego typu materiałów

Norma PN-EN 206+A2:2021-08, „Beton. Wymagania, właściwości użytkowe produkcja i zgodność” definiują trzy sposoby wtórnego pozyskania kruszywa do betonu:

- **kruszywo odzyskane przez wypłukanie** z mieszanki betonowej



Rysunek 1. Instalacja do odzyskiwania kruszywa ze świeżej mieszanki betonowej

- **kruszywo odzyskane przez przekruszenie** betonu stwardniałego, który nie był wcześniej stosowany na budowie



Rysunek2. Przykład kruszywa powstałego z przekruszenia betonu

- **kruszywo z recyklingu** powstałe w wyniku przetworzenia materiału nieorganicznego zastosowanego wcześniej na budowie



Rysunek3. Przykład selekcji odpadów budowlanych do produkcji kruszywa recyklingowego

Zgodnie z zapisami normy PN-EN 206+A2:2021-08(tablica E.2.)” Beton. Wymagania, właściwości użytkowe produkcja i zgodność” kruszywom z recyklingu stawiane są poniższe wymagania:

- kruszywo powinno być o frakcji powyżej 4 mm

- w tablicy E.2. doprecyzowany jest udział procentowy kruszywa z recyklingu, którym to można zastąpić kruszywo naturalne w mieszankach betonowych w zależności od klas ekspozycji dla betonu. Poniższa tabela E.2. definiując górne granice procentowego udziału kruszyw z recyklingu wyznacza w sposób ostrożny możliwość zastępowania kruszyw naturalnych w mieszankach betonowych.

Tablica E.2 - Maksymalny procent zastąpienia grubych kruszyw (% masowo)

Typ kruszywa z recyklingu	Klasy ekspozycji			
	X0	XC1, XC2	XC3, XC4, XF1, XA1, XD1	Wszystkie pozostałe klasy ekspozycji ^a
Typ A: (RC ₉₀ , Rcu ₉₅ , Rb ₁₀₋ , Ra ₁₋ , FL ₂₋ , XRg ₁₋)	50%	30%	30%	0%
Typ B ^b : (RC ₅₀ , Rcu ₇₀ , Rb ₃₀₋ , Ra ₅₋ , FL ₂₋ , XRg ₂₋)	50%	20%	0%	0%
^a Kruszywa z recyklingu typu A znanego pochodzenia można stosować przy klasach ekspozycji, na które zaprojektowano beton pierwotny, przy maksymalnym procencie zastąpienia wynoszącym 30 % ^b Nie zaleca się stosowania kruszyw z recyklingu typu B do betonu klas wytrzymałości na ściskanie > C30/37				

Tabela nr.3. Dane wg normy PN-EN 206+A2:2021-08 (tablica E.2.)

- w tablicy E.3. są wyszczególnione wymagania dla kruszyw w recyklingu w oparciu o normę PN-EN 12620+A1 „Kruszywa do betonu”. Dane zebrane w tabeli E.3. wskazują kryteria kilku najistotniejszych właściwości kruszyw z recyklingu, które mają bezpośredni wpływ na jakość samego kruszywa i jego przydatności w betonie. Wprowadzone typy kruszyw A i B oraz uporządkowany podział surowców wchodzących w skład kruszyw recyklingowych pozwala na selekcję pod kontem przydatności kruszywa do betonu.

Tablica E.3 - Zalecenia dotyczące grubych kruszyw z recyklingu wg EN 12620

Właściwości ^a	Rozdział w EN 12620:2002+A1:2008	Typ	Kategoria zgodnie z EN 12620
Zawartość pyłów	4.6	A + B	Kategoria lub wartość deklarowana
Wskaźnik płaskości	4.4	A + B	≤ Fl ₅₀ lub ≤ SL ₅₅
Odporność na rozdrabnianie	5.2	A + B	≤ LA ₅₀ lub ≤ SZ ₃₂

Gęstość ziaren w stanie suchym ρ_{rd}	5.5	A	$\geq 2100 \text{ kg/m}^3$
		B	$\geq 1700 \text{ kg/m}^3$
Nasiąkliwość	5.5	A + B	Wartość deklарowana
Składniki ^b	5.8	A	Rc ₉₀ , Rcu ₉₅ , Rb ₁₀₋ , Ra ₁₋ , FL ₂₋ , XRg ₁₋
		B	Rc ₅₀ , Rcu ₇₀ , Rb ₃₀₋ , Ra ₅₋ , FL ₂₋ , XRg ₂₋
Zawartość siarczanów rozpuszczalnych w wodzie	6.3.3	A + B	SS _{0,2}
Zawartość jonów chlorkowych rozpuszczalnych w kwasie	6.2	A + B	Wartość deklарowana
Wpływ na początek czasu wiązania	6.4.1	A + B	$\leq A_{40}$
^a Kategorię NR (brak wymagań) można stosować w odniesieniu do innych właściwości, niewymienionych w niniejszej tablicy. W odniesieniu do tych właściwości kategorię NR można zadeklарować zgodnie z EN 12620			
^b w przypadku specjalnych zastosowań, przy których wymagana jest wysoka jakość wykończenia powierzchni, zaleca się ograniczenie wskaźnika FL składnika do kategori FL _{0,2-} .			

Tabela nr.4. Dane wg normy PN-EN 206+A2:2021-08 (tablica E.3.)

Dzięki zapisom norm:

- PN-EN 12620+A1 „Kruszywa do betonu”
- PN-EN 206+A2:2021-08 “Beton. Wymagania, właściwości użytkowe produkcja i zgodność” producenci betonu mogą formalnie bez przeszkód stosować kruszywo z recyklingu. Na producencie spoczywa odpowiedzialność, aby umiejętnie wykorzystać dostępne źródła kruszywa z recyklingu.

W Polsce od 01.01.2025r. w wyniku zmian przepisów jest obowiązek segregacji odpadów budowlanych na sześć grup: drewno, metale, szkło, tworzywa sztuczne, gips, odpady mineralne w tym beton, cegłę, płytki i materiały ceramiczne oraz kamienne obowiązek ten spoczywa na przedsiębiorstwach świadczących usługi rozbiórkowe. Nowe podejście poprzez większą segregację odpadów u źródeł ich wytwarzania w myśl polityki „ZERO WASTE” otwiera drogę do pozyskanie większej ilości kruszywa recyklingowego do wykorzystania w betonie.

3. Dostępności kruszyw z recyklingu na rynku Polskim

Beton to mieszanka cementu, kruszywa, domieszek, dodatków oraz wody. Proporcje poszczególnych surowców kształtują się jak niżej.

Produkcja betonu opiera się o podstawowe surowce:

- cement stanowi (8-15% masy wszystkich składników)
- kruszywo drobne(25-32% masy wszystkich składników)
- kruszywo grube(45-52% masy wszystkich składników)
- domieszki(<1% masy wszystkich składników)
- dodatki(<8% masy wszystkich składników)
- wodę(5-9% masy wszystkich składników)

Nasuwa się wniosek, że skoro kruszywo grube stanowi blisko 50% procent masy 1 metra sześciennego betonu to jeśli rocznie produkcja betonu w Polsce wynosi ok 25 milionów metrów sześciennych betonu to potrzebujemy ok. 28 miliona ton kruszywa grubego. Jeśli moglibyśmy wykorzystać 20% kruszyw z recyklingu 5,6 miliona ton. Dużo czy mało trudno wskazać jednoznacznie zależne od skali, ale na pewno ma ogromny wpływ na gospodarkę odpadami i otwiera nowe perspektywy polityki „ZERO WASTE”.

Jeśli jest formalna możliwość, aby korzystać z kruszywa z recyklingu to skąd je pozyskać? Szukając odpowiedzi na takie pytanie, jako zespół technologów Bosta-Beton zaczęliśmy poszukiwania źródeł kruszyw z recyklingu. Na rynku polskim jest już wiele firm, które produkują kruszywa z recyklingu, ale są to firmy głównie przerabiają materiał rozbiórkowy z burzonych konstrukcji. Firmy te działają w systemie mobilnym, ustawiając sprzęt do burzenia i kruszenia elementów konstrukcji, selekcionując drewno i tworzywa sztuczne a rozdrabniając na mniejsze frakcje żelbet, ceramikę. Pozyskany z żelbetów gruz, z którego odzyskiwana jest stal zbrojeniowa pozostaje głównie kruszony na frakcje 0/64. Bardzo rzadko spotykany jest jedno rodny materiał pochodzący tylko i wyłącznie np. z gruzu betonowego. Większość dostępnych kruszyw z recyklingu jest niejednorodnych i zawiera zmieszany beton, ceramikę tworzywa sztuczne i drewno. Pojawiają się również firmy, które zaczynają oferować kruszywo z recykling do konkretnego zastosowania jako np. kruszywa do niezwiązanych i hydraulicznie związanych materiałów stosowanych w obiektach budowlanych i budownictwie drogowym wg normy PN-EN 12620. Niestety póki co ten materiał jest dostępny okresowo i jego ilość jest słabo dostępna. Do produkcji betonu najbardziej pożądane frakcje to 4/16, 8/16 i 16/31,5 jednak najbardziej popularne dostępne frakcje to 0/31,5.

Firmy produkujące kruszywo z recyklingu przygotowują materiał celem wykorzystania w drogownictwie np. podbudowy dróg o niskich kategoriach ruchu lub jako materiał do utwardzenia czy wyrównania placów składowych. Wciąż powstają nowe rozwiązania technologiczne a takim jest pozyskanie kruszywa poprzez zastosowanie dodatków chemicznych. Dzięki rozwiązaniom firm chemicznych możemy odzyskiwać kruszywo z niewykorzystanych resztek świeżej mieszanki betonowej bez skomplikowanych urządzeń.

4. Wyniki badań kruszyw

W ramach współpracy spółek zrzeszonych w grupie CRH tj. Bosta-Beton i Trzuskawica powstał projekt produkcji kruszywa z recyklingu. Z pomocą zespołu pracującego w kopalni kruszyw Trzuskawica oraz dzięki współpracy podwykonawców zajmujących się recyklingiem/kruszeniem betonów udało się wyselekcjonować gruz budowlany powstały z rozbiórki fundamentów hal przemysłowych na Górnym Śląsku. Przygotowano partię gruzu żelbetonowego poprzez wstępną selekcję oraz oczyszczenie gruzu z fragmentów stali zbrojeniowej i materiałów typu drewno. Tak przygotowany gruz został skuszony do frakcji 4/16 i rozsiany na poszczególne frakcje, gdzie w wyniku przesiewania powstały również drobne frakcje od 0 do 4mm. Tak przygotowane kruszywo 4/16 zostało poddane szczegółowym badaniom zgodnie z normą EN 12620: 2002+A1: 2008. Dzięki pracy zespołu laboratoryjnego i produkcyjnego kopalni Trzuskawica uzyskaliśmy kruszywo z recyklingu na które zostały wystawione dokumenty jakościowe tj. Deklaracja Właściwości Użytkowych jak i karta CE

Niepowtarzalny kod identyfikacyjny typu wyrobu	Kruszywo grube 4/16 RA mm	
Numer referencyjny deklaracji właściwości użytkowych	02/R/K/23	
Poziom lub klasa zadeklarowanych właściwości użytkowych	Wymiar kruszywa	4/16
	Uziarnienie	G _C 85/20
	Tolerancja uziarnienia kruszywa grubego na sitach pośrednich	G _T 17,5
	Kształt kruszywa grubego	FI ₁₅
	• Wskaźnik płaskości	
	Gęstość ziarn [kg/dm ³]:	• 2,62 ± 0,1 • 2,15 ± 0,1 • 2,35 ± 0,1
	• ρ _s	
	• ρ _{sd}	
	• ρ _{sd}	
	Gęstość nasypowa w stanie luźnym	• 2,19 ± 0,1
	Nasiakliwość	≤ 8,5
	Pyły	f _d
	Zawartość zanieczyszczeń organicznych, obecność humus	Kruszywo nie zawiera znacznej ilości humusu (barwa jaśniejsza od wzorcowej)
	Odporność na rozdrabnianie kruszywa grubego	LA ₄₀
	Odporność na ścieranie kruszywa grubego	MD _E 35
	Składniki grubego kruszywa z recyklingu	• Rc 40 • Rcu 95 • Rb 10- • Ra 1- • XR_E0,5-
	Chlorki rozpuszczalne w kwasie [%]	0,035 ± 0,005
	Siarczany rozpuszczalne w kwasie	AS _{0,8}
	Siarczany rozpuszczalne w wodzie	SS _{0,2}
	Siarka całkowita	S ₁
	Zanieczyszczenia lekkie [%]	< 0,1
	Wpływ na początek czasu wiązania cementu (kruszywa z recyklingu)	A ₁₀
Zastosowana zharmonizowana specyfikacja techniczna	EN 12620:2002+A1: 2008	
Zamierzone zastosowanie wyrobu	Przygotowanie betonu do zastosowania w budynkach, do dróg i innych obiektów budowlanych	

Tabela nr.5. Dane dla kruszywa z recyklingu wg DWU

Dla otrzymanego kruszywa 4/16 wykonano również analizę sitową, która posłużyła do projektowania składów mieszanek betonowych celem sprawdzenia parametrów jakościowych samego betonu.

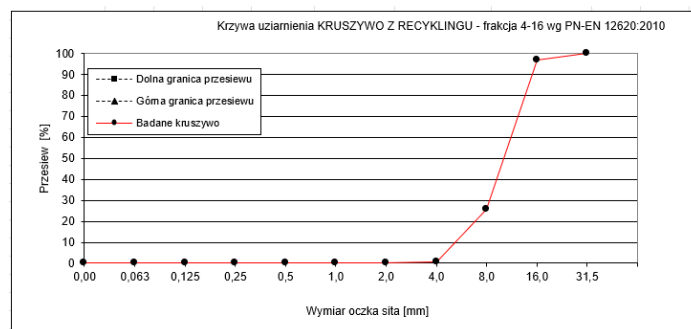


Tabela nr.6. Wykres analizy sitowej kruszywa z recyklingu

5. Wyniki badań betonu z użyciem kruszywa z recyklingu oraz cementami niskoemisyjnymi

5.1. Beton z kruszywem z recyklingu.

Realizując projekt wykorzystania do produkcji betonu kruszyw z recyklingu, przeprowadzono szereg badań porównawczych mieszanek betonowych. Do badań zostało zastosowane kruszywo z recyklingu 4/16 wyprodukowane przez kopalnię Trzuskawica CRH oraz cement niskoemisyjnego z cementowni Ożarów CRH. Głównym celem było sprawdzenie możliwości uzyskania optymalnego składu mieszanki betonowej w myśli idei „ZERO WASTE”.

	Oznaczenie zarobu	Wzorcowy	2 PLInno 2	3 PLInno 2
	Receptura	K20S0CWFOWPTS	C30/37 recykling	C30/37 recykling
Cement	CEM II/A-V 42,5 R-NA (CO)	300	300	300
Dodatki	Popiół lotny	75	75	75
Kruszywa	Kruszywo 1 Piasek 0/2	715	715	715
	Kruszywo 2 Grys wapienny 2/8	400	280	280
	Kruszywo 3 Grys wapienny 8/16	670	470	470
	Kruszywo z recyklingu 4/16		320	320
Domieszki	Domieszka 1 Plastyfikator	1,50	1,50	2,10
	Domieszka 2 Superplastyfikator	3,00	3,00	3,60
Woda	Projektowana	166	166	175
Badanie mieszanek	Badanie mieszanek			
Temperatura	Temperatura mieszanek °C			
	po 5 min	26,0	27,5	26,0
	Temperatura otoczenia °C			
	po 5 min	20,0	21,0	21,0
Konsystencja	Opad stożka [mm]			
	po 5 min	180	100	240
	po 30 min	160	70	190
	po 60 min	130	20	140
Zawartość powietrza	Zawartość powietrza [%]			
	po 5 min	2,2	3,0	2,8
	Uwagi		Zamieniono kruszywo gube 30% kruszywa z recyklingu	Celem poprawy reologii mieszanki betonowej zwiększono ilość domieszek i wody
	Wytrzymałość na ściskanie	Wytrzymałość Średnia	Wytrzymałość Średnia	Wytrzymałość Średnia
	7d	33,5	25,96	22,7
	28d	46,3	45,1	44,5
		47,1	46,2	43,1
		46,7	45,7	43,8

Wnioski z przeprowadzonych badań mieszanki betonowej i samego stwardniałego betonu, kluczowym jest źródło pochodzenia samego kruszywa i procentowy udział materiałów odpadowych w nim zawartych. O ile możemy wprowadzać modyfikację mieszanki przez zastosowanie domieszek poprawiających reologię mieszanki to najtrudniejszym jest spełnienie nie tylko podstawowego parametru betonu tj. wytrzymałości na ściskanie ale głównie zapewnić parametry trwałościowe betonu w konstrukcji.

5.2. Beton z cementami niskoemisyjnymi

Kierując się dobrem środowiska naturalnego i zmianami prawnymi o redukcji CO2 Bosta-Beton CRH wspólnie z Cementownią Ożarów CRH przeprowadziły wspólne badania laboratoryjne, których celem było sprawdzenie podstawowych parametrów betonu z użyciem cementów o niskim śladzie węglowym CEM II A-V 42,5 R, CEM II B-V 42,5R jak i CEM IV.

Nr Zarobu Lab.	1		2		3		4		5	
CEM I 42,5R [kg]	-		-		-		-		145	
CEM II/B-V 42,5R [kg]	-		290		-		-		-	
CEM II/A-V 42,5R [kg]	290		-		-		-		-	
CEM IV/A(V) 32,5R	-		-		290		340		145	
Woda Projekt [kg]	175		175		175		175		175	
Woda Dozowana [kg]	175		175		175		175		175	
Popiół Lotny [kg]	90		90		90		40		90	
Ilość Spoiwa [kg]	380		380		380		380		380	
Domieszka Plastyfikator [kg]/% m.c.	2,90	1,00%	2,90	1,00%	2,90	1,00%	2,90	0,85%	2,90	1,00%
0-2 Piasek [kg]	641		639		638		644		642	
2-8 Grys [kg]	418		417		417		420		419	
8-16 Grys [kg]	721		719		718		725		722	
Ilość Kruszywa [kg]	1780,0		1775,0		1773,0		1789,0		1783,0	
Mieszanka [g]	13046		13024		12955		13108		13024	
Ciężar Objętościowy mieszanki (badany) [kg/m3]	2372		2368		2355		2383		2368	
Zawartość Powietrza (badana) [%] 10'	1,2		1,1		1,1		0,9		1,0	
Konsystencja [mm] 10'	170		190		165		185		160	
Konsystencja [mm] 30'	140		-		140		-		-	
W/C Całkowite	0,60		0,60		0,60		0,51		0,60	
W/S Całkowite	0,46		0,46		0,46		0,46		0,46	
Zarób laboratorium	13 ltr		13 ltr		13 ltr		13 ltr		13 ltr	
R2 [MPa]	19,1	18,3	15,6	15,6	13,4	13,1	16,4	16,7	17,0	16,6
Średnia	18,7		15,6		13,3		16,6		16,8	
% wytrzymałości 28 dniowej	41,4%		37,8%		34,3%		37,3%		37,5%	
R7 [MPa]	35,0	33,3	27,6	28,6	25,9	26,7	30,6	31,1	33,1	31,7
Średnia	34,2		28,1		26,3		30,9		32,4	
% wytrzymałości 28 dniowej	75,6%		68,1%		68,1%		69,6%		72,2%	
R28 [Mpa]	45,0	45,4	40,6	41,9	38,9	38,3	44,3	44,4	44,8	44,9
Średnia	45,2		41,3		38,6		44,4		44,9	
% wytrzymałości 28 dniowej	100,0%		100,0%		100,0%		100,0%		100,0%	
R56 [MPa]	52,5	56,3	47,2	47,6	49,0	47,8	53,6	50,8	51,9	51,2
Średnia	54,4		47,4		48,4		52,2		51,6	
% wytrzymałości 28 dniowej	120,4%		114,9%		125,4%		117,7%		114,9%	
R2/R28	0,41		0,38		0,34		0,37		0,37	

Wnioski z przeprowadzonych badań przy zastosowaniu cementów niskoemisyjnych. Spełnienie założonej klasy C30/37 dla wszystkich kombinacji nie było najtrudniejszym wyzwaniem. Wszystkie opracowane składy betonu pozwoliły spełnić klasę wytrzymałości na ściskanie ale znaczącym parametrem, który wyróżniał poszczególne rozwiązania to dynamika narastania wytrzymałości. Projektując betony z cementami niskoemisyjnymi musimy mieć świadomość, że redukując CO2 przy produkcji cementów z dodatkami CEM II czy CEM IV wpływa na wydłużenie procesu narastania wytrzymałości wczesnej. Stwarza to konieczność oceny klasy wytrzymałości na ściskanie przez zastosowanie tzw. czasu równoważnego tj. np. ocena po 56 dniach dojrzewania. Wolniejszą dynamikę narastania wytrzymałości na ściskanie należy uwzględnić podczas tworzenia konstrukcji w nowo powstających obiektach budowlanych.

6. Podsumowanie prowadzonych prac nad wdrażaniem polityki „zero waste” przy produkcji betonu

Możemy stwierdzić, że jako producenci betonu jesteśmy na progu przemian i nowego podejścia do produkcji w myśl polityki „zero waste”. Należy więcej uwagi poświęcić na segregację odpadów budowlanych u źródeł czyli przy wyburzaniu starych obiektów budowlanych czy sprzątaniu nowo powstających obiektów. Kolejnym krokiem jest tworzenie mechanizmów prawnych zachęcających lub nawet wymuszających stosowanie w budownictwie materiałów z recyklingu w tym betonu recyklingowego. Producenci cementów dostosowując zmieniające się potrzeby rynku wprowadzają nowe rozwiązania cementów wieloskładnikowych co wymusza zmianę technologii wykonywania standardowych dotychczas stosowanych rozwiązań. Producenci betonu mają możliwości i wiedzę, aby stosować kruszywo recyklingowe oraz nowe cementy. Ale producenci betonu muszą mieć możliwości pozyskania odpowiedniej jakości kruszywa z recyklingu przez odpowiednią i świadomą gospodarkę odpadami. Po stronie odbiorcy materiału-betonu konieczne jest stworzenie przestrzeni do świadomego wykorzystania nowego produktu co może być usankcjonowane poprzez nowe dokumenty np. paszporty produktu. Pędzący świat wymusza zmiany również w obszarze technologii i produkcji dobrze znanego od wielu lat materiału jakim jest beton. Wszystkie przemiany i nowe rozwiązania muszą być tak prowadzone aby nie zapominać o środowisku naturalnym.

Literatura

- [1]. PN-EN 12620+A1 „Kruszywa do betonu”
- [2]. PN-EN 206+A2:2021-08 “Beton. Wymagania, właściwości użytkowe produkcja i zgodność”
- [3]. PN-B-06265:2022-08 „Beton. Wymagania, właściwości użytkowe produkcja i zgodność” Krajowe uzupełnienie PN-EN 206+A2:2021-08
- [4]. Z. Kohutek, Beton przyjazny środowisku, Stowarzyszenie Producentów Betonu Towarowego w Polsce, Kraków 2008
- [5]. PN-EN 197-1 „Cement – Część 1: Skład, wymagania i kryteria zgodności dotyczące cementów powszechnego użytku”
- [6]. PN-EN 197-2 „Cement – Część 2: Ocena zgodności”

dr inż. Katarzyna Kalinowska-Wichrowska, dr hab. inż. Marta Kosior- Kazberuk,
prof. PB
Politechnika Białostocka

Właściwości kompozytów bezcementowych z udziałem kruszywa z recyklingu betonu i biokarbonizatu

The properties of cementless composites with recycled concrete aggregate and biochar

Streszczenie

W dobie intensywnych poszukiwań alternatyw dla tradycyjnych kompozytów cementowych oraz efektywnego zagospodarowania odpadów gruzobetonowych i komunalnych, kompozyty bezcementowe (geopolimery) z udziałem kruszywa z recyklingu betonu, a także wykorzystanie produktów popirolitycznych w budownictwie, są przedmiotem zainteresowania coraz liczniejszej grupy badaczy. Celem przedstawionych w artykule badań było określenie wpływu zastosowania kruszywa z recyklingu gruzu betonowego (RCA) oraz biokarbonizatu (B) z pirolizy odpadów komunalnych, na właściwości fizyczno-mechaniczne i mikrostrukturę geopolimerów oraz ich zdolność do pochłaniania CO₂. W ramach eksperymentu przygotowano zaprawy geopolimerowe różniące się zawartością kruszywa z recyklingu i biokarbonizatu. Zróżnicowano również warunki dojrzewania zapraw. Frakcję 1-2 mm kruszywa naturalnego (piasku), co stanowiło 40% stosu okrucowego, całkowicie zastąpiono RCA, natomiast biokarbonizat (B) zastosowano w ilości 10% masy popiołu lotnego. Po 24 h od wykonania, po rozformowaniu, część próbek dojrzewała w suszarce laboratoryjnej w temperaturze 65°C, drugą, poddano przyspieszonej karbonatyzacji w reaktorze z czystym CO₂ pod ciśnieniem 5 atmosfer. Wyniki badań wykazały, że próbki poddane karbonatyzacji charakteryzowały się wyższą wytrzymałością na ściskanie (do 50% wzrostu w stosunku do serii kontrolnych), mniejszą nasiąkliwością oraz obniżoną porowatością. Badania mikrostruktury i analizy chemiczne potwierdziły powstawanie zeolitu, wydzielanie węgla wapnia oraz zmiany struktury porów, co przyczyniło się do poprawy parametrów mechanicznych kompozytów. Wyniki badań wskazują na potencjał do zastosowania geopolimerów wzbogaconych biokarbonizatem i kruszywem recyklingowym jako nowoczesnych kompozytów bezcementowych, dodatkowo wykazujących zdolność pochłaniania CO₂ z atmosfery.

Abstract

In the era of intensive search for alternatives to traditional cement composites as well as effective management of concrete and municipal waste, cement-free composites (geopolymers) with recycled concrete aggregate, as well as the use of post-pyrolysis products in construction, are the subject of interest of an increasing group of researchers. The research aimed to determine the effect of using aggregate from recycled concrete rubble (RCR) and biochar (B) from the pyrolysis of municipal waste on the physical and mechanical properties and microstructure of geopolymers, as well as their ability to absorb CO₂. As part of the experiment, geopolymer mortars were prepared with different contents of recycled aggregate and biochar. The regime of conditioning the mortars was also varied. The 1-2 mm fraction of natural aggregate (sand), which constituted 40% of the total content of aggregate, was completely replaced with RCR, while biochar (B) was used in the amount of 10% of the fly ash mass. After 24 hours from manufacturing, some of the samples were conditioned in a laboratory dryer at 65°C, while the others were subjected to accelerated carbonation in a reactor with pure CO₂ at a pressure of 5 atmospheres. The test results showed that the carbonated samples were characterised by higher compressive strength (up to 50% increase compared to the control series), lower water absorption and reduced porosity. Microstructure tests and chemical analyses confirmed the formation of zeolite, calcium carbonate precipitation and changes in the pore structure, which contributed to the improvement of the mechanical parameters of the composites. The research results indicate the potential for using geopolymers enriched with biochar and recycled aggregate as modern cement-free composites, additionally demonstrating the ability to absorb CO₂ from the atmosphere.

1. Wstęp

W obliczu rosnącej świadomości ekologicznej oraz wynikających z niej działań na rzecz ograniczenia negatywnego wpływu człowieka na środowisko i redukcji antropogenicznej emisji gazów cieplarnianych, przed przemysłem budowlanym stoi wyzwanie wdrażania bardziej zrównoważonych rozwiązań. Jednym z obiecujących kierunków są geopolimery – nowoczesne materiały wiążące, które mogą być otrzymywane m.in. z naturalnych surowców, takich jak metakaolinit, oraz z ubocznych produktów spalania (UPS), takich jak żużle czy odpady energetyczne. Ich wykorzystanie nie tylko ogranicza ilość odpadów trafiających do środowiska, ale również pośrednio przyczynia się do zmniejszenia emisji CO₂ [1]. Zmniejszenie śladu węglowego w cyklu życia wyrobów budowlanych jest kluczową dziedziną zrównoważonego rozwoju i gospodarki o obiegu zamkniętym, tak ważnego aspektu w dobie rosnącego zanieczyszczenia powietrza i w dążeniu do neutralizacji jego skutków. W tym kontekście coraz większe zainteresowanie budzi także wykorzystanie kruszywa z recyklingu gruzu betonowego (RCA) oraz biocharu (BC), na przykład powstającego w procesie pirolizy odpadów organicznych. Zastosowanie tego typu materiałów odpadowych nie tylko sprzyja gospodarce cyrkularnej, ale może również przyczyniać się do dodatkowego pochłaniania CO₂ z atmosfery [2,3].

Najczęściej stosowanymi prekursorami do geopolimerów są popioły lotne, żużel wielkopiecowy, metakaolin, a także czerwony szlam [4]. Popularnie stosowanymi aktywatorami są wodorotlenek sodu lub potasu oraz szkło wodne. Badania pokazują, że geopolimery charakteryzują się większą odpornością na wysoką temperaturę, krótszym czasem wiązania, a nawet lepszymi właściwościami mechanicznymi niż tradycyjny beton cementowy ([5, 6].

Kruszywa naturalne (NA) wciąż stanowią główny składnik kruszywowy zarówno w betonie geopolimerowym (GPC), jak i w tradycyjnym betonie cementowym (CC). Ponieważ kruszywa stanowią od 75 do 80% całkowitej objętości betonu, zapotrzebowanie na nie w procesie jego wytwarzania jest bardzo wysokie. Obecna nadmierna eksploatacja kruszyw naturalnych doprowadziła w niektórych regionach do niedoboru zasobów piasku i żwiru, a także do degradacji środowiska [7].

Zastosowanie RAC pozwala na zmniejszenie zużycia energii oraz ograniczenie problemu nadmiaru składowanych odpadów budowlanych. Wynika to głównie z faktu, że RA wykorzystywane w RAC pochodzą z rozdrobnionych, oczyszczonych i przesortowanych fragmentów betonu odpadowego, które następnie są mieszane zgodnie z określoną krzywą uziarnienia [8]. Niemniej jednak efektywność betonu z takim kruszywem (RAC) w dużej mierze zależy od jego jakości. Z uwagi na wysoką nasiąkliwość i niską wytrzymałość mechaniczną recyklingowanego kruszywa, jego wykorzystanie w praktycznych zastosowaniach inżynierskich pozostaje ograniczone [9].

Zastosowanie kruszywa z recyklingu w betonie geopolimerowym przyczynia się do zmniejszenia zużycia surowców naturalnych oraz emisji CO₂. Wong (2022), [10] oraz Pawluczuk i in. 2021 [11] wykazali, że właściwości mechaniczne geopolimerów takie, jak wytrzymałość na ściskanie i moduł sprężystości, mogą być porównywalne z betonem tradycyjnym, pod warunkiem odpowiedniej modyfikacji składu mieszanki i obróbki kruszywa z recyklingu. Zwrócili oni uwagę RCA uszczelnia mikrostrukturę kompozytu, co wpływa na poprawę ich właściwości. Dodatkowo [12] przeprowadzona analiza cyklu życia (LCA) wykazała znaczne ograniczenie emisji gazów cieplarnianych w porównaniu z konwencjonalnym betonem. Biochar, jako produkt termicznej degradacji biomasy w warunkach beztlenowych, zyskuje na znaczeniu jako dodatek do kompozytów budowlanych ze względu na porowatą strukturę, zdolność do sekwestracji węgla oraz właściwości pucolanowe. Piccolo i in. (2021) [13] zsyntetyzowali lekkie materiały geopolimerowe zawierające biochar, wykazując poprawę właściwości mechanicznych, takich jak wytrzymałość na zginanie i ściskanie, a także redukcję gęstości kompozytu.

Integracja zarówno kruszywa z recyklingu, jak i biocharu w geopolimerach może przynieść synergiczne korzyści środowiskowe i techniczne. Jednocześnie, jak zauważają autorzy cytowanych prac, niezbędne są dalsze badania mające na celu optymalizację proporcji i sposobów aplikacji tych komponentów w celu maksymalizacji ich efektywności.

Badania wykazały, że zastąpienie naturalnego kruszywa RCA w geopolimerowym betonie prowadzi do obniżenia wytrzymałości na ściskanie. Na przykład, w badaniu przeprowadzonym przez Lyu i in. (2023) [14] stwierdzono, że zwiększenie zawartości RCA powoduje stopniowy spadek wytrzymałości na ściskanie, rozciąganie i zginanie, a także modułu sprężystości. Moduł sprężystości był najbardziej

podatny na zmiany, podczas gdy wytrzymałość na rozciąganie ulegała najmniejszemu spadkowi. Zwiększona zawartość RCA wiązała się również z wyższą absorpcją wody i zmniejszoną odpornością na przenikanie jonów chlorkowych, korozję siarczanową, działanie kwasów, mrozoodporność i karbonatyzację w betoniegeopolimerowym. Integracja RCA tworzy bardziej złożone strefy przejściowe w geopolimerowym betonie, co skutkuje zmniejszoną wytrzymałością wiązania i luźniejszą, bardziej porowatą mikrostrukturą. Rodzaj biocharu, w tym temperatura pirolizy i rodzaj biomasy, ma istotny wpływ na właściwości geopolimerów. Badania wykazały, że biochar wytworzony w wyższych temperaturach pirolizy (np. 500°C) może prowadzić do większej poprawy wytrzymałości na ściskanie w porównaniu z biocharem wytworzonym w niższych temperaturach [15].

W artykule przedstawiono wyniki badań wytrzymałości na ściskanie oraz zmian mikrostrukturalnych geopolimerów na bazie popiołu lotnego, z dodatkiem kruszywa z recyklingu gruzu betonowego i biokarbonizatu, dojrzewających w warunkach laboratoryjnych oraz poddanych przyspieszonej karbonatyzacji w atmosferze CO₂.

2. Materiały i metody

Geopolimery przygotowano na bazie popiołu lotnego (PL) klasy F z Elektrowni Ostrołęka. Zawartość ważniejszych tlenków (PL) przedstawia się następująco: SiO₂ (54,6%), w tym reaktywna SiO₂ (42,36%), Al₂O₃ (25,3%), CaO (2,14%), w tym reaktywne CaO (1,84%), straty prażenia (4,37%), i inne.

Jako kruszywa użyto normowego piasku kwarcowego 0-2 mm wg PN-EN 196-1 oraz kruszywa z recyklingu gruzu betonowego 1-2 mm, które powstało z przekruszenia zapraw cementowych na CEM I 42,5 R i współczynnika w/c=0.5. Wykorzystano domielony do frakcji <0,063 mm biokarbonizat SS550 [16], który pochodził z pirolizy osadów ściekowych. Do aktywacji zastosowano mieszaninę Na₂SiO₃/8M NaOH w stosunku wagowym 2,5:1. Wykonano 8 serii zapraw geopolimerowych w formach 4x4x16 cm. Wszystkie próbki geopolimerów najpierw utwardzano przez 24 h w temperaturze 65°C. Po rozformowaniu jedna część próbek dojrzewała w warunkach laboratoryjnych, a drugą poddano karbonatyzacji przy ciśnieniu 5 atmosfer czystego CO₂ przez 24 h. Wykonane serie geopolimerów i ich skład, a także warunki dojrzewania zawarto w Tabeli 1. Przeprowadzono następujące badania kompozytów geopolimerowych: wytrzymałość na ściskanie wg PN-EN 196-1, skład fazowy metodą XRD, głębokości karbonatyzacji wg PN-EN 12390-12 i pomiaru zdolności sekwestracji CO₂ (w odniesieniu do przyrostu masy po ekspozycji). Ilość zabsorbowanego przez zaprawę CO₂, wyrażoną ułamkiem masowym w procentach, obliczono według równania:

$$\%CO_2 = \frac{m_1 - m_0}{m_0} \times 100$$

w którym:

m₁ – masa badanej próbki po procesie sekwestracji CO₂, g

m₀ – początkowa masa badanej próbki, g

Szybkość karbonatyzacji została określona poprzez obliczenie nachylenia dopasowanej linii przy użyciu następującego równania:

$$d_k = a + K_{AC} \times \sqrt{t}$$

gdzie (mm) to (mm) to a

w którym:

d_k – średnia głębokość karbonatyzacji w czasie t (dni), mm

a – stała reprezentująca punkt przecięcia osi y, mm

K_{AC} - szybkość karbonatyzacji, mm·dzień^{-0,5}

Wyniki badań i ich analiza

W Tabeli 1. Przedstawiono skład wykonanych serii geopolimerów przeznaczonych do badań.

Tabela 1. Skład i opis przygotowanych kompozytów geopolimerowych na 12 próbek 4/4/16 cm

Składniki (skład na 12 bele- czek 4/4/16 cm)	SE- RIA IA	SE- RIA IIA	SE- RIA III A	SE- RIA IVA	SERIA IB karbo- natyza- cja	SERIA IIB karbo- natyza- cja	SERIA III B karbo- naty- zacja	SERIA IVB karbo- natyza- cja
jednostka	g							
kruszywo naturalne, piasek 0-2 mm	5 400	3 584	5 400	3 584	5 400	3 584	5 400	3 584
kruszywo z recy- klingu (1-2 mm)	-	1 515	-	1 515	-	1 515	-	1 515
popiół lotny	1 800	1 800	1 620	1 620	1 800	1 800	1 620	1 620
Biochar	-	-	180	180	-	-	180	180
Aktywator Na ₂ SiO ₃ /8 M NaOH	1 500	1 500	1 500	1 500	1 500	1 500	1 500	1 500

W celu identyfikacji i porównania faz krystalicznych występujących w próbkach geopolimerowych zawierających składniki recyklingowe, przeprowadzono analizę dyfrakcji rentgenowskiej (XRD) dla ośmiu próbek materiałowych. Próbkę oznaczoną jako seria A (1A–4A) nie zostały poddane karbonatyzacji, natomiast ich odpowiedniki z serii B (1B–4B) zostały poddane kontrolowanemu procesowi karbonatyzacji. Widma dyfrakcyjne przedstawiono odpowiednio na rysunkach 1 i 2.

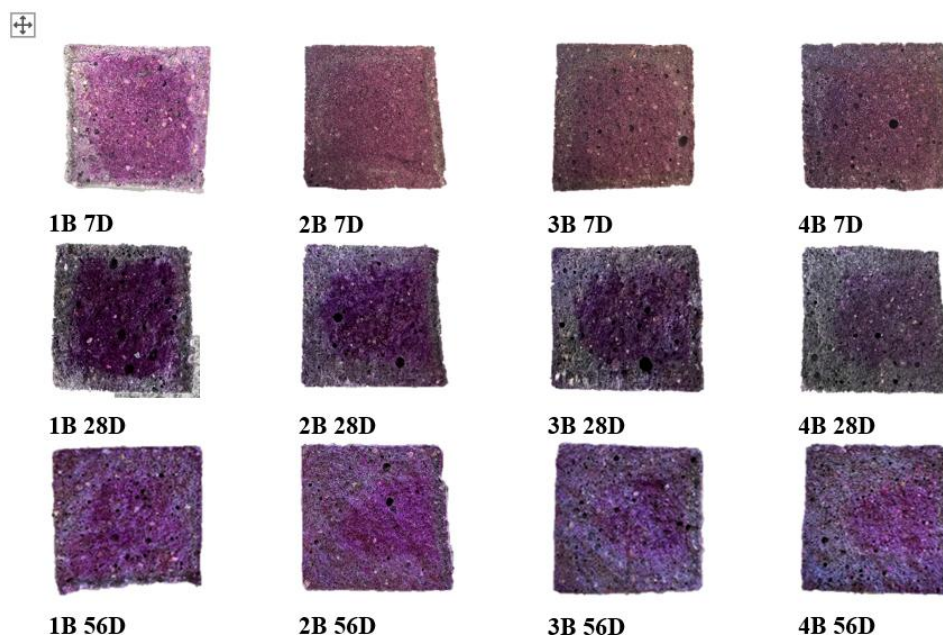
Rys.1. XRD próbek geopolimerowych dojrzewających w suszarce laboratoryjnej, a następnie w warunkach laboratoryjnych

Rys.2. XRD próbek geopolimerowych dojrzewających w suszarce laboratoryjnej, a następnie w komorze karbonatyzacyjnej

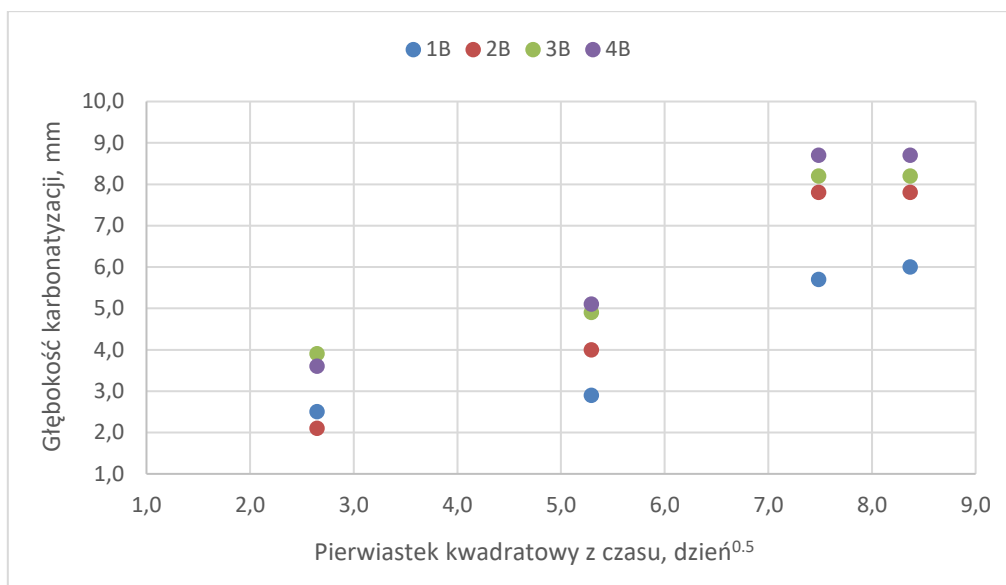
Jak zaobserwowano na Rys.1.i Rys.2. dominującymi fazami krystalicznymi są mulit i kwarc. Pierwszy z nich—został rozpoznany po charakterystycznych odległościach międzypłaszczyznowych d_{hkl} 3,39; 3,42; 5,37Å, drugi natomiast po d_{hkl} 3,34; 4,25; 2,13Å. Na wszystkich analizowanych dyfraktogramach rozpoznano również obecność zeolitu o typie struktury gismondytu. Został on zidentyfikowany po najmocniejszych refleksach d_{hkl} 10,00; 4,27; 3,34; 3,19 i 3,13Å. Jego powstanie ściśle związane jest reakcją szkliva glinokrzemianowego obecnego w popiołach lotnych z aktywatorem ($\text{Na}_2\text{SiO}_3/8 \text{ NaOH}$). Skład mineralny uzupełniają niewielkie ilości kalcytu, który w próbkach poddanych karbonatyzacji wykrył się w głównej mierze na powierzchniach zewnętrznych otrzymanych geopolimerów. Na jego obecność wskazują na dyfraktogramach piki d_{hkl} 3,03; 3,86; 2,28; 2,09 Å. We wszystkich próbkach zaobserwowano obecność intensywnych pików odpowiadających kwarcowi (SiO_2) (około $26^\circ 2\theta$), który stanowi dominującą fazę krzemionkową obecną w popiele lotnym oraz kruszywach naturalnych i z recyklingu. W obszarze około $29^\circ 2\theta$ występują silne sygnały charakterystyczne dla kalcytu (CaCO_3), których intensywność istotnie wzrasta w próbkach po karbonatyzacji, co jednoznacznie potwierdza przebieg tego procesu. W próbkach serii A, szczególnie 1A i 2A, zaobserwowano obecność portlandytu (Ca(OH)_2), rozpoznawalnego w zakresie 18° i $34^\circ 2\theta$.

Próbki 2A i 4A, w których część kruszywa naturalnego została zastąpiona kruszywem z recyklingu, wykazują zwiększoną obecność kalcytu i kwarcu, co może wynikać z pozostałości zaprawy cementowej na powierzchni kruszywa wtórnego. Dodatek biocharu, obecny w próbkach 3A i 4A, wpływa na ogólną strukturę materiału, co przejawia się zwiększonym udziałem faz amorficznych oraz poszerzeniem pasm w zakresie $20^\circ - 35^\circ 2\theta$. Efekt ten może być związany z powierzchniową adsorpcją jonów oraz interakcją z układem aktywatora zasadowego, co opisywano wcześniej m.in. w pracach Xu i van Deventer [4]. W serii B, wszystkie próbki wykazują istotnie większą intensywność sygnału kalcytu, co potwierdza ich karbonatyzację. Uzyskane wyniki XRD potwierdzają, że zarówno skład surowcowy, jak i proces karbonatyzacji wpływają na skład fazowy otrzymanych materiałów. Dodatki w postaci kruszywa z recyklingu oraz biocharu wpływają na przemiany mineralogiczne i mogą poprawiać stabilność chemiczną geopolimerów.

Wizualną ocenę głębokości karbonatyzacji przeprowadzono poprzez nałożenie roztworu wskaźnika pH (fenoloftaleiny) na świeżo oddzielone powierzchnie próbek (Rysunek 3). Wyniki zależności między głębokością karbonatyzacji a pierwiastkiem kwadratowym z czasu przedstawiono na Rysunku 4.



Rys.3. Przekroje próbek geopolimerów poddanych karbonatyzacji



Rysunek 4. Głębokość karbonatyzacji próbek zapraw geopolimerów (wskaźnik pH – fenoloftaleina).

Największą zdolnością sekwestracyjną charakteryzowały się próbki z serii ,3B, 2B,4B kolejno(0,35-0,66%), a najmniejszą próbka z serii 1B (0,22%) – Tabela 2. Wyniki analizy regresji przeprowadzonej z wykorzystaniem obserwowanych pomiarów głębokości karbonatyzacji w różnych okresach czasu dla zapraw geopolimerów przedstawiono w Tabeli 3.

Tabela 2. Ilość zabsorbowanego przez zaprawy dwutlenku węgla.

Próbka/Seria	CO ₂ , %
1B	0,22
2B	0,46
3B	0,35
4B	0,65

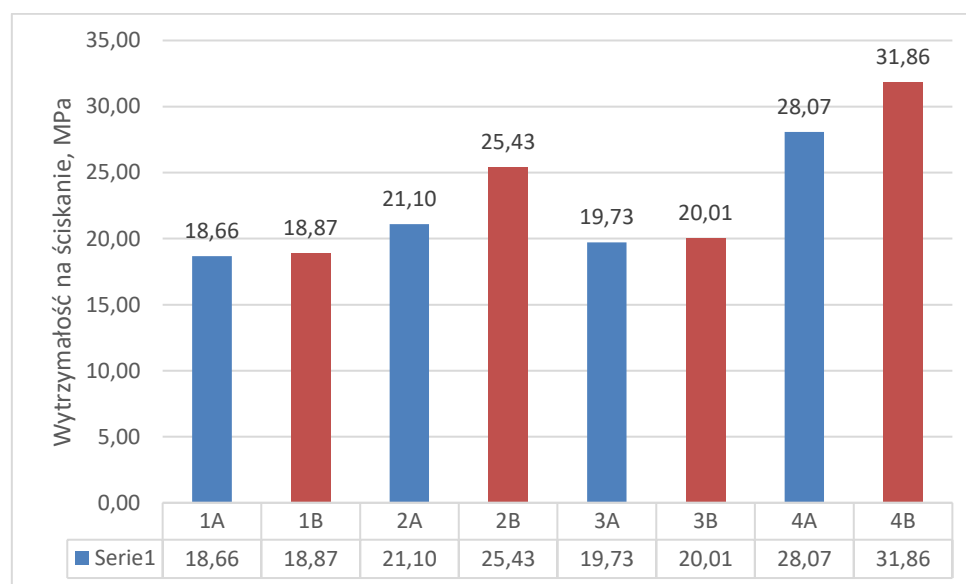
Tabela 3. Wyniki analizy regresji przeprowadzonej z wykorzystaniem obserwowanych pomiarów głębokości karbonatyzacji w różnych okresach czasu dla zapraw geopolimerów (wskaźnik pH – fenoloftaleina).

Parametr	1B	2B	3B	4B
K _{AC} (mm·dzień ^{-0,5})	0,67	1,09	0,84	0,98

R^2	0,87	0,95	0,92	0,94
-------	------	------	------	------

Wartości R^2 wahały się od 0,80 do 0,95, wskazując na dobry lub doskonały poziom dokładności w procesie dopasowania. Wyniki wskazują, że stopień karbonatyzacji wynoszący $1,09 \text{ mm} \cdot \text{dzień}^{-0,5}$ obserwowany w zaprawie 2B był najwyższy, podczas gdy zaprawa 1B charakteryzowała się najniższym stopniem karbonatyzacji wynoszącym $0,67 \text{ mm} \cdot \text{dzień}^{-0,5}$. Po 70 dniach ekspozycji, zaprawa 4B charakteryzowała się głębokością karbonatyzacji równą 8,7 mm, o 45% większą w porównaniu do zaprawy 1B (6,0 mm), (Rysunek 3).

Na Rysunku 5. przedstawiono wyniki wytrzymałości na ściskanie kompozytów geopolimerowych



Rysunek 5. Wyniki wytrzymałości na ściskanie próbek geopolimerowych po 28 dniach dojrzewania

Uzyskane wartości wytrzymałości na ściskanie mieszczą się w zakresie od 18,87 MPa (1B) do 31,86 MPa (4B). Zauważalny jest wyraźny trend wzrostowy wynikający z zastosowania dodatków recyklingowych oraz modyfikatorów organicznych. Seria 1B (referencyjna) uzyskała najniższy wynik wytrzymałości na ściskanie, co potwierdza ograniczoną wytrzymałość geopolimeru bazowego opartego jedynie na kruszywie naturalnym i popiele lotnym. Seria 2B z kolei, zawierająca dodatkowo kruszywo z recyklingu, wykazała wyraźny wzrost wytrzymałości do poziomu 25,43 MPa, co sugeruje korzystny wpływ materiału wtórnego.

Kompozyty geopolimerowe zawierające biokarbonizat (Seria 3B) jako dodatek, osiągnęła wartość 20,01 MPa, co wskazuje na umiarkowany, lecz pozytywny efekt wprowadzenia modyfikatora organicznego. Biochar, dzięki dużej powierzchni właściwej i porowatej strukturze, może poprawiać mikrostrukturę matrycy wiążącej oraz uczestniczyć w wiązaniu jonów wapniowych.

Najwyższą wartość wytrzymałości uzyskano dla serii 4B – 31,86 MPa, co potwierdza synergiczny efekt zastosowania zarówno kruszywa z recyklingu, jak i biokarbonizatu. Połączenie tych składników skutkuje wzmocnieniem strukturalnym materiału, co może wynikać zarówno z efektów fizycznych (redukcja pustek, lepsze wypełnienie) jak i chemicznych (lepsze sieciowanie struktur polimerycznych oraz wiązanie jonów Ca^{2+} i Na^+). Należy przeprowadzić bardziej zaawansowane testy mikrostrukturalne (SEM oraz analizę rozkładu porów przed i po karbonatyzacji).

Wnioski

Jak wykazały wyniki przeprowadzonych badań, zastosowanie do geopolimerów kruszyw z recyklingu i biokarbonizatu powoduje polepszenie parametrów fizyczno-mechanicznych kompozytów: wyższą wytrzymałość na ściskanie i zginanie, niższą nasiąkliwość oraz wyższą gęstość objętościową. Dodatkowo obecność tych składników sprzyja pochłanianiu CO_2 z atmosfery, co również wpływa na poprawę wyżej wymienionych właściwości kompozytów. Przeprowadzone badania mikrostrukturalne (dyfraktometria rentgenowska) potwierdzają, że zmieniająca się w wyniku powstawania węglanu wapnia struktura geopolimerów jest bardziej szczelna, modyfikacji ulega także rodzaj i średnica porów, co skutkuje polepszeniem parametrów wytrzymałościowych geopolimerów, a dalej poprawą ich trwałości. W naturalnym cyklu życia produktu pochłanianie CO_2 z atmosfery będzie wpływało na korzyść parametrów użytkowych geopolimerów na bazie materiałów odpadowych, co może być istotną alternatywą dla betonów cementowych na składnikach naturalnych i doskonałym rozwiązaniem pod względem realizacji celów zrównoważonego rozwoju.

Literatura

- [1] Miś J. i Łach M. (2014). Wytwarzanie i właściwości geopolimerów na bazie tufu wulkanicznego. *Inżynieria Materiałowa*, Nr 35 (3), 270-276.
- [2] Wyrzykowski, M., Toropovs, N., Winnefeld, F., Lura, P. (2024). Cold-bonded biochar-rich lightweight aggregates for net-zero concrete. *Journal of Cleaner Production*, 434, 140008. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.140008>
- [3] Liang, C., Pan, B., Ma, Z., He, Z., Duan, Z. (2020). Utilization of CO_2 curing to enhance the properties of recycled aggregate and prepared concrete: A review. *Cement and Concrete Composites*, 105, 103446. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2019.103446>
- [4] Zhang, P., Sun, X., Wang, F., & Wang, J. (2023). Mechanical Properties and Durability of Geopolymer Recycled Aggregate Concrete: A Review. *Polymers*, 15(3), 615. <https://doi.org/10.3390/polym15030615>
- [5] Zhang, P.; Han, X.; Hu, S.; Wang, J.; Wang, T. High-temperature behavior of polyvinyl alcohol fiber-reinforced metakaolin/fly ash-based geopolymer mortar. *Compos. Part B-Eng.* 2022, 244, 110171

- [6] Ren, R.; Li, L. Impact of polyethylene fiber reinforcing index on the flexural toughness of geopolymer mortar. *J. Build. Eng.* 2022, 57, 104943).
- [7] Zhang, H.; Xiao, J.; Tang, Y.; Duan, Z.; Poon, C. Long-term shrinkage and mechanical properties of fully recycled aggregate concrete: Testing and modelling. *Cem. Concr. Compos.* 2022, 130, 104527
- [8] Junak, J.; Sicakova, A. Concrete containing recycled concrete aggregate with modified surface. *Procedia Eng.* 2017, 180, 1284–1291
- [9] Feng, C.; Cui, B.; Huang, Y.; Guo, H.; Zhang, W.; Zhu, J. Enhancement technologies of recycled aggregate—Enhancement mechanism, influencing factors, improvement effects, technical difficulties, life cycle assessment. *Constr. Build. Mater.* **2022**, 317, 126168
- [10] Wong, L. S. (2022). Durability Performance of Geopolymer Concrete: A Review. *Polymers*, 14(5), 868. <https://doi.org/10.3390/polym14050868>
- [11] Pawluczuk, E., Kalinowska-Wichrowska, K., Jimenez, J. R., Rodriguez, J. M. F., & Suescum-Morales, D. (2021). Geopolymer concrete with treated recycled aggregates: Macro and microstructural behaviour. *Journal of Building Engineering*, 44, 1–15. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2021.103317>
- [12] Gopalakrishna B.; Pasla D., Durability Performance of Recycled Aggregate Geopolymer Concrete Incorporating Fly Ash and Ground Granulated Blast Furnace Slag; 2024, *Journal of Materials in Civil Engineering*, Volume 36, Issue 4, <https://doi.org/10.1061/JMCEE7.MTENG-17067>
- [13] Piccolo, F., Andreola, F., Barbieri, L., & Lancellotti, I. (2021). Synthesis and Characterization of Biochar-Based Geopolymer Materials. *Applied Sciences*, 11(22), 10945. DOI: 10.3390/app112210945MDPI+1PMC+1
- [14] Lyu, S., Xiao, J., Singh, A., & Ye, T. (2023). *The influence of recycled aggregate on the properties of geopolymeric recycled concrete: A comprehensive review*. *Journal of Asian Concrete Federation*, 9(4), 1–16. DOI: [10.1007/s41062-023-00800-3](https://doi.org/10.1007/s41062-023-00800-3)
- [15] Gupta, S.; Kashani, A.; Mahmood, A.H.; Han, T. Carbon sequestration in cementitious composites using biochar and fly ash—Effect on mechanical and durability properties. *Constr. Build. Mater.* **2021**, 291, 123363. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.123363>
- [16] https://www.biochar.ac.uk/standard_materials.php

Karol Rogucki IMBUD

Tomasz Olszewski FRD

Maria Gościński war-REMEDIUM

Piotr Jarszewski war-REMEDIUM

Recykling mieszanki betonowej z wykorzystaniem prasy filtracyjnej

Concrete mix recycling using a filter press

Streszczenie

Słowa kluczowe:

Recykling mieszanki betonowej, woda odzyskana z procesu produkcji betonu, wpływ zawiesiny z recyklingu na RMC i CBGM

Systemy recyklingu mieszanki betonowej są stosowane w Polsce od ponad 25 lat. Służą zazwyczaj do rozdzielania odpadowej mieszanki na wodną zawiesinę pyłów mineralnych i części stałe czyli kruszywo. Do układu recyklingu trafia również woda z mycia gruszek, pomp i innego sprzętu oraz nawierzchni placu wytwórni. Zawiesina zawiera do 20% frakcji pylastej pochodzącej z kruszywa i spoiwa. Zarówno odzyskane kruszywo jak i zawiesina są kierowane z powrotem do produkcji. W dalszym ciągu jednak świeża woda musi być stosowana do produkcji betonu wyższych klas, betonu napowietrzonego, napełniania zbiorników gruszek i pomp oraz mycia sprzętu. Natomiast w przypadku produkcji „suchych” mieszanek zawiesina jest wykorzystywana tylko w niewielkim stopniu a zawarte w niej części mineralne, korzystnie działające na właściwości CBGM nie są w pełni wykorzystane. W referacie przedstawiono działanie systemu WATERWASH filtrującego zawiesinę, zapewniającego odzysk praktycznie (wizualnie) czystej wody oraz półsuchych „brykietów” frakcji pylastych, które mogą znaleźć zastosowanie do produkcji. Przedstawiono wyniki badania wytrzymałości betonu oraz mieszanek CBGM z zastosowaniem odzyskanej wody i oddzielonego osadu.

Abstract

Keywords:

Recycling of concrete mix, water recovered from the concrete production process, impact of recycled suspension on RMC and CBGM.

Concrete mix recycling systems have been used in Poland for over 25 years. They are usually used to separate the waste mix into an aqueous suspension of mineral dust and solid parts, i.e. aggregate. The recycling system also receives water from washing trucks, pumps and other equipment and the surface of the production site. The suspension contains up to 20% of the dust fraction coming from the aggregate and binder. Both the recovered aggregate and the suspension are directed back to production. However, fresh water must still be used for the production of higher-class concret, areated concret, filling the tanks of trucks and pumps and washing equipment. During the production of semi-dry mixes, the suspension is used only to a small extent and the mineral parts contained in it, which have a beneficial effect on CBGM parameters, are not fully utilized. The paper presents the operation of the WATERWASH system filtering suspension, which allows for the recovery of practically pure water and semi-dry "briquettes" of dust fractions that can be used in production. The results of the study of concrete strength and CBGM properties using water and separated sediment are presented.

1. Wstęp

Ocenia się, że do produkcji jednego metra sześciennego betonu zużywa się około 500L wody [1]. Jest to zazwyczaj woda pitna, na której niedobór cierpi, jak się ocenia 4,3 miliarda ludzi na świecie [2]

Normy krajowe i międzynarodowe we wszystkich regionach świata dopuszczają stosowanie różnych rodzajów wody podając jednocześnie szczegółowe wymagania.

Tab. 1. Wymagania normowe dla wody do betonu (wybrane parametry)

Parametr	Australia [3]	Indie [4]	ISO [5]	USA [6]	Brazylia [7]	EU [8]
pH	≥ 5	≥ 6	≥ 5	≥ 4	≥ 5	≥ 4
Kolor	-	-	Bładożółty lub jaśniejszy	Bładożółty lub jaśniejszy	-	Bładożółty lub jaśniejszy
Zapach	-	-	Słaby H ₂ S i cementu	-	-	Słaby H ₂ S i cementu

Parametr	Australia [3]	Indie [4]	ISO [5]	USA [6]	Brazylia [7]	EU [8]
Substancje organiczne [mg/L]	-	≤ 200	Po dodaniu NaOH barwa wody powinna być jaśniejsza od roztworu wzorcowego (wg ISO i EN żółtawobrazowa lub jaśniejsza)			
Tłuszcze i oleje	-	-	Co najwyżej ślady	-	Co najwyżej ślady	Co najwyżej ślady
Sucha masa [mg/L]	-	≤ 3000	≤ 4000	≤ 50 000	≤ 50 000	-
Chlorki [mg Cl ⁻ /L]	≤ 800	≤ 500 ¹⁾ ≤ 2000 ²⁾	≤ 500 ⁴⁾ ≤ 1000 ¹⁾ ≤ 4500 ²⁾	≤ 500 ³⁾ ≤ 1000 ¹⁾	≤ 500 ⁴⁾ ≤ 1000 ¹⁾ ≤ 4500 ²⁾	≤ 500 ⁴⁾ ≤ 1000 ¹⁾ ≤ 4500 ²⁾
Azotany [mg NO ₃ ⁻ /L]	-	-	≤ 500	≤ 500	≤ 500	≤ 500
Fosforany [mg P ₂ O ₅ /L]	≤ 100	-	≤ 100	≤ 100	≤ 100	≤ 100
Cynk [mg Zn ²⁺ /L]	-	-	≤ 100	≤ 100	≤ 100	≤ 100
Ołów [mg Pb ²⁺ /L]	-	-	≤ 100	≤ 100	≤ 100	≤ 100
Cukry [mg/L]	≤ 100	-	≤ 100	≤ 100	≤ 100	≤ 100

1) Beton zbrojony (lub zawierający elementy metalowe)

2) Beton bez wbudowanej stali, bez elementów metalowych, niezbrojony

3) Beton sprężony, płyty mostowe i w przypadku wymagań

4) Beton sprężany i iniekcje kanałów kablowych

2. Opis techniczny

Zespół recyklingu (Fot.1) składa się ze stanowiska do mycia gruszek, pomp, wywrotek i innego sprzętu, skąd rozwodniona mieszanka betonowa jest pompowana do bębna myjki – separatora BETONWASH (Fot.2).

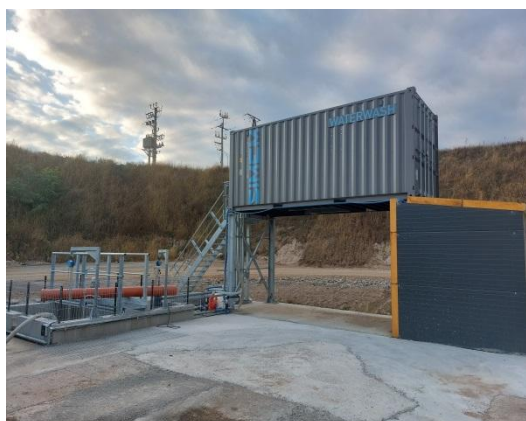


Fot. 1 Zespół recyklingu BETONWASH + WATERWASH



Fot. 2 Stanowisko mycia sprzętu, separator BETONWASH i zbiornik zawiesziny

Odzyskane kruszywo w postaci frakcji 0/16 (0,15/16) jest kierowane na składowisko a zawiesina spływa do zbiornika magazynującego o pojemności 25 m³ wyposażonego w cyklicznie działające mieszadło. Z tego zbiornika zawiesina trafia do prasy filtracyjnej WATERWASH (Fot.3 i 4)



Fot. 3 Kontener WATERWASH



Fot. 4 Prasa filtracyjna

Składniki stałe w postaci „ciasteczek, brykietów” wypadają grawitacyjnie na płytę betonową skąd okresowo są przewożone ładowarką na składowisko kruszyw a „czysta” woda odpływa do zbiornika. Szczegółowy opis, dane techniczne i dalsze opcjonalne wyposażenie jak np. system korekcji pH wody podano w materiałach informacyjnych SIMEM [14]

3. Badania

Większość nowoczesnych betoniarni w Polsce jest wyposażona w system recyklingu mieszanki. Odzyskana zawiesina może być wykorzystywana w produkcji mieszanek betonowych. Pojawia się tutaj podstawowy problem: mieszanki o dużej zawartości wody, w znacznej części betony konstrukcyjne o wysokich wymaganiach w zakresie utrzymania konsystencji w czasie, zawartości powietrza w mieszance, trwałości i wytrzymałości uzyskanego po stwardnieniu betonu są bardzo wrażliwe na wzrost zawartości drobnych frakcji. Problemy z utrzymaniem konsystencji w czasie, urabialnością, stabilnością napowietrzenia zgłasza wielu autorów [9],[10] oraz praktyków na węzłach betoniarskich. Z kolei w przypadku produkcji „suchych” mieszanek – CBGM, z racji małej ilości dodawanej wody, zawiesina jest wykorzystywana w bardzo ograniczonym zakresie. Mieszanki te, szczególnie w przypadku kruszyw płukanych wykazują zazwyczaj niedobór frakcji drobnych stąd stosowanie w nich odsączonych z wody „brykietów” może być bardzo korzystne.

W związku z tym w firmie IMBUD Suwałki uznano za opłacalne wyposażenie węzła w pełny zespół recyklingu BETONWASH i WATERWASH.

3.1 Badania mieszanki betonowej.

Badania wykonano w laboratorium z wykorzystaniem „czystej” odfiltrowanej wody z prasy filtracyjnej WATERWASH. Odfiltrowana woda jest bezbarwna, nie wykazuje zmętnienia, po wstrząśnięciu w zamkniętym pojemniku pojawia się piana, która zanika po kilkunastu sekundach. Parametry tej wody w porównaniu w wodą pitną wg WHO oraz z wymaganiami normy podano w tabeli 2. Kilka próbek wody pobranych podczas pracy urządzenia wykazało zawartość substancji rozpuszczonych w zakresie $0,80 \div 1,35\%$ i pH $12,3 \div 12,9$. Badania chemiczne jednej próbki wykonano w laboratorium GBA Polska. W dalszym tekście wodę tę określa się jako „woda z recyklingu”

Tab. 2. Wymagania dla wody i wyniki badania wody z recyklingu mieszanki betonowej

Parametr	WHO [12]	PN-EN 1008 [8]	WATERWASH
pH	6,5 ÷ 8,5	≥ 4	12,8
Substancje rozpuszczone [mg/L]	500 ÷ 1500	-	9 200
Chlorki [mg Cl ⁻ /L]	200 ÷ 600	≤ 1000*	350
Azotany [mg NO ₃ ⁻ /L]	≤ 10**	≤ 500	39
Fosforany [mg P ₂ O ₅ /L]	≤ 0,4	≤ 100	0,098
Cynk [mg Zn ²⁺ /L]	≤ 3	≤ 100	0,014
Ołów [mg Pb ²⁺ /L]	≤ 0,01	≤ 100	< 0,0006
Cukry [mg/L]	-	≤ 100	

Parametr	WHO [12]	PN-EN 1008 [8]	WATERWASH
Alkalia [mg/L] ($\text{Na}_2\text{O} + 0.658 \text{ K}_2\text{O}$)	$\text{Na} \leq 200 \text{ mg/L}$	$\leq 1500^{***}$	560 w tym Na^+ 150
Węglany [ppm]	30 ÷ 400	-	
Siarczany [mg $\text{SO}_4^{2-}/\text{L}$]	-	≤ 2000	150

* patrz Tab. 1

** wg [17] zawartość azotanów nie powinna przekraczać 50 mg/L

*** w przypadku przekroczenia tej zawartości woda może być stosowana jedynie wtedy, gdy będzie można wykazać, że zostały podjęte działania zapobiegające szkodliwej reakcji krzemionki z alkaliom.

Wykonano badanie porównawcze zastępując demineralizowaną wodę wodociągową wodą z recyklingu. Do badania zastosowano cement CEM V/A(S-V) 42,5N-LH/HSR/NA, popiół lotny krzemionkowy kategorii A, piasek kopalniany 0/2, żwir 2/16 i domieszkę – upłynniacz polimerowy. Zastosowana domieszka jest w pełni kompatybilna z cementami o dużej ilości składników nieklinkierowych. W odróżnieniu od większości plastyfikatorów i upłynniaczy spotykanych na rynku zapewnia stabilność konsystencji mieszanek betonowych opartych na CEM V, cementach zawierających popioły wapienne (W), CEM II/C itp.

Skład mieszanek betonowych podano w tabeli 3

Tab. 3. Skład mieszanek betonowych 1÷4 [kg/m³]

Składnik	1	2	3	4
CEM V/A (S-V) 42,5N-LH/HSR/NA	300	300	300	300
Popiół lotny	50	50	50	50
Piasek 0/2	800	800	750	750
Kruszywo grube 2/16	1000	1000	1050	1050
upłynniacz	3,0	3,0	3,0	3,0
Woda dejonizowana	175		170	
Woda z recyklingu WATERWASH		175		170

3.2 Badania mieszanki związanej hydraulicznie (CBGM)

Badania wykonano w laboratorium z wykorzystaniem „brykietów” z prasy filtracyjnej. Wykonano badanie porównawcze mieszanek CBGM, w których pewne ilości spoiwa i kruszywa zastąpiono ww. brykietami czyli częściowo odwodnionym szlamem z recyklingu mieszanki betonowej. W dalszej części pracy opisany odpad jest określany terminem „szlam”

Zawartość wody i uziarnienie szlamu podano w tabeli 4 a skład mieszanek w tabeli 5.

Tab. 4. Skład częściowo odwodnionego szlamu z recyklingu mieszanki betonowej

Substancja stała [%]			Woda [%]
$\geq 0,125$ mm	$0,063 \div 0,125$ mm	$< 0,063$ mm	
2,1	8,6	48,3	41,0

Tab. 5. Skład mieszanek A÷ C CBGM [kg/m³]

Składnik	A	B	C
CEM II/B-V 42,5	150	150	130
Piasek 0/2	1870	1850	1870
plastyfikator	1,4	1,4	1,4
Woda dejonizowana	198	185	182
Szlam		50	50

Zastosowanie domieszki chemicznej w badanych mieszankach miało na celu poprawę urabialności. Zastosowany plastyfikator jest domieszką tradycyjną na bazie filtrowanego i częściowo odcukrzzonego lignosulfonianu. Mieszanki zagęszczano w formach cylindrycznych Ø100 x 120 wg PN-EN 13286-50 [18] i badano wg PN-EN 13286-41 [19] Z każdej mieszanki pobrano po 6 próbek na dwa terminy badań.

4. Wyniki

4.1 Beton

Uzyskane wyniki przedstawiono w tabeli 6. Wartość wytrzymałości podano jako średnią z trzech badanych próbek.

Tab. 6. Właściwości mieszanki i stwardniałego betonu

Mieszanka		1	2	3	4
Konsystencja – opad stożka [mm]	5 min.	185	195	210	205
	60 min.	155	155	170	170
	90 min.	120	120	165	160
Zawartość powietrza po 60 min [%]		3,0	2,7	2,9	2,5
Beton					
Wytrzymałość na ściskanie [MPa]	2 dni	14,8	14,2	13,3	13,5
	7 dni	24,6	25,1	25,0	24,8
	28 dni	41,2	42,0	40,3	40,5
	56 dni	45,1	46,2		
Gęstość [kg/m ³] (wartość średnia ze wszystkich próbek)		2325	2340	2330	2335

Zastosowanie wody z recyklingu nie spowodowało istotnych zmian właściwości mieszanki i stwardniałego betonu. Śladowa ilość substancji powierzchniowoczynnych (po wstrząśnięciu nieznaczna piana zanikająca po kilkunastu sekundach) nie ma wpływu na konsystencję ani na zawartość powietrza w mieszance.

4.2 Mieszanka związana hydraulicznie

Uzyskane wyniki przedstawiono w tabeli 7. Wartość wytrzymałości podano jako średnią z trzech badanych próbek.

Tab. 7. Właściwości mieszanki CBGM

Mieszanka		A	B	C
Gęstość [kg/m ³] (wartość średnia ze wszystkich próbek)		2100	2130	2140
Wytrzymałość na ściskanie [MPa]	7 dni	3,7	2,8	2,1
	28 dni	5,1	4,8	3,9

Mieszanka ze zmniejszoną o 20 kg/m³ ilością cementu czyli o 13% wykazała spadek wytrzymałości po 28 dniach o 1,2 MPa czyli o 23%. Spadek wytrzymałości na skutek ubytku cementu nie jest rekompensowany dodatkiem szlamu.

5. Wnioski

- Woda z recyklingu WATERWASH spełnia wymagania PN-EN 1008 [8]
- Nie stwierdzono oczekiwanego wpływu na konsystencję i wczesną wytrzymałość betonu. Na podstawie wcześniejszych własnych doświadczeń i danych literaturowych [9], [10], [15], [16] spodziewano się wystąpienia istotnych różnic po wprowadzeniu wody z recyklingu.
- Mieszanka betonowa i stwardniały beton wyprodukowany z zastosowaniem tej wody mają właściwości podobne do uzyskanych w przypadku stosowania czystej, demineralizowanej wody wodociągowej.
- Woda recyklingu WATERWASH nadaje się do wszystkich zastosowań przemysłowych występujących na węźle betoniarskim jak mycie sprzętu, pobieranie wody do zbiorników gruszek, cystern do pielęgnacji podbudów i nawierzchni itp.
- Istnieje możliwość zastosowania tej wody do innych celów przemysłowych i rolniczych.
- Jednorazowe badanie mieszanki związanej hydraulicznie CBGM wskazuje na możliwość pewnego obniżenia wytrzymałości w przypadku zastosowania szlamu. Z uwagi na wstępny charakter badania wymaga to wyjaśnienia w dalszych próbach, tym bardziej, że najważniejszym parametrem użytkowym jest nie wytrzymałość na ściskanie a moduł sprężystości [16]
- System recyklingu w IMBUD nie zapewnia jeszcze możliwości kontrolowanego dozowania odsączonej frakcji drobnej (szlamu) do mieszarki węzła. Uzyskane „brykiety” powinny zostać przekruszone do frakcji 0-4 a uzyskany granulát może być dozowany przez osobny zasiek jako składnik częściowo zastępujący piasek w mieszankach związanych hydraulicznie (CBGM).

6. Plan dalszych badań

Badania wykonano w fazie rozruchu instalacji na jednej próbce szlamu i jednej wody. Po rozpoczęciu ciągłej pracy instalacji przewiduje się przy okazji kontroli produkcji zebranie dużej ilości wyników dla statystycznej oceny jakości betonu z udziałem wody z recyklingu.

Po opracowaniu sposobu dozowania zagęszczonego szlamu przewiduje się produkcję i badania mieszanek związanych hydraulicznie wraz z badaniem próbek w rozszerzonym zakresie (wytrzymałość, mrozoodporność, szczelność, moduł sprężystości)

7. Literatura

[1] Maddikeari, M.; Das, B.B.; Tangadagi, R.B.; Roy, S.; Nagaraj, P.B.; Ramachandra, M.L.

A Comprehensive Review on the Use of Wastewater in the Manufacturing of Concrete: Fostering Sustainability through Recycling. Recycling 2024, 9, 45. MDPI Bazylea Szwajcaria <https://doi.org/10.3390/recycling9030045>

[2] Mekonnen, M.M.; Hoekstra, A.Y. *Sustainability: Four billion people facing severe water scarcity.* Sci. Adv. 2016, 2, e1500323.

<https://www.science.org/doi/10.1126/sciadv.1500323>

[3] AS 1379-2007; *Specification and Supply of Concrete.* Standards Australia: Sydney, Australia

[4] 36. IS 456; *Plain and Reinforced Concrete - Code of Practice.* Bureau of Indian Standards: New Dehli, India, 2000; pp. 1–114.

[5] ISO 12439:2025; *Mixing Water for Concrete.* International Organization for Standardization (ISO): Geneva, Switzerland, 2025

[6] ASTM C1602/C1602M-18; *Standard Specification for Mixing Water Used in the Production of Hydraulic Cement Concrete.* ASTM International: West Conshohocken, PA, USA, 2018.

[7] ABNT NBR 15900-1; *Água para Amassamento do Concreto: Parte 1—Requisitos.* Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT): Rio de Janeiro, Brazil; São Paulo, Brazil, 2009

https://freitag.com.br/storage/legislation/4/portaria_norma_473.pdf

[8] PN-EN 1008; *Woda zarobowa do betonu. Specyfikacja pobierania próbek, badanie i ocena przydatności wody zarobowej do betonu, w tym wody uzyskanej z procesów produkcji betonu* <https://sklep.pkn.pl/pn-en-1008-2004p.html>

[9] Gałań P. *Woda szlamowa z urządzeń recyklingowych w produkcji betonu – właściwości i możliwości ponownego wykorzystania* XI Konferencja Dni Betonu 2021 str. 993 <https://www.dnibetonu.com/wp-content/pdfs/2021/Galan%20-%20Woda%20szlam.pdf>

[10] Chatveera, B.; Lertwattanakul, P.; Makul, N. *Effect of sludge water from readymixed concrete plant on properties and durability of concrete.* Cem. Concr. Comp. 2006 28, 441–450. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2006.01.001>

- [11] Agwe, T.M.; Tibenderana, Ph.; Twesigye-Omwe, M.N.; Mbujje, J.W.; Abdulkadir, S.T. *Concrete Production and Curing with Recycled Wastewater: A Review on the Current State of Knowledge and Practice* Advances in Civil Engineering Volume 2022, Article ID 7193994
<https://doi.org/10.1155/2022/7193994>
- [12] Guidelines for drinking-water quality Fourth edition incorporating the first and second addenda World Health Organization 2022
<https://iris.who.int/bitstream/handle/10665/352532/9789240045064-eng.pdf?sequence=1>
- [13] Majer, S; Budziński, B; Lehner, P; *Elastic modulus of Cement Bound Granular Material (CBGM)* 22nd International Conference on Modelling in Mechanics 2024 ELSEVIER B.V. <https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0>)
- [14] Broszury informacyjne SIMEM 2024
https://simem.com/wp-content/uploads/2024/09/SDPWAT_03_RECYCLING_01_EN-DE_web.pdf
<https://simem.com/machine/waterwash/>
- [15] Faleńska, M.; Jarszewski, P. *Recykling mieszanki betonowej*. XLIX Konferencja Naukowa Komitetu Inżynierii Lądowej i Wodnej PAN i Komitetu Nauki PZITB Warszawa-Krynica 2003 Tom III str. 147
- [16] Świercz, P.; Wdowik, S.; Skowera, K.; Wrona, J.; Wrzecion, K. *Skuteczność działania domieszek w zależności od jakości wody zarobowej* IX Konferencja Dni Betonu Wisła 2016 [Downloads/Skuteczność działania domieszek w zależności od jakości wody zarobowej.pdf](#)
- [17] Rozporządzenie MZ z dnia 7 grudnia 2017 r. w sprawie jakości wody przeznaczonej do spożycia przez ludzi (Dz. U. 2017.2294)
<https://isap.sejm.gov.pl/isap.nsf/download.xsp/WDU20170002294/O/D20172294.pdf>
- [18] PN-EN 13286-50:2007 *Mieszanki niezwiązane i związane spoiwem hydraulicznym*.
Cz. 50: *Metoda sporządzania próbek związanych hydraulicznie za pomocą aparatu Proctora*
- [19] PN-EN 13286-41:2022-04 *Mieszanki niezwiązane i związane spoiwem hydraulicznym*. Cz. 41: *Metoda badania wytrzymałości na ściskanie mieszanek związanych hydraulicznie*.

XIII
KONFERENCJA

DNI BETONU 2025

13-15 października 2025



PARTNERZY PROGRAMOWI



SPONSORZY / FIRMY



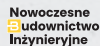
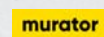
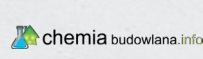
PATRONAT MEDIALNY



www.bta-czasopismo.pl



WSPÓŁPRACA MEDIALNA



ORGANIZATOR



Stowarzyszenie Producentów Cementu

30-003 Kraków • ul. Lubelska 29 • tel.: +48-12-423-33-55

biuro@polskicement.pl • dnibetonu@polskicement.pl

www.polskicement.pl

Bądź z nami w kontakcie:

www.facebook.com/PolskiCement

www.facebook.com/ArchitekturaBetonowa

x.com/polskicement

www.instagram.com/architektura_betonowa



ISBN: 978-83-61331-51-3