

dr inż. Artur Golda¹⁾
dr inż. Arkadiusz Janic¹⁾
dr inż. Katarzyna Synowiec¹⁾
mgr inż. Kamil Zięba¹⁾
dr inż. Grzegorz Cygan²⁾

¹⁾ Centrum Technologiczne Betotech Sp. z o.o., Heidelberg Materials Polska

²⁾ Politechnika Śląska, Wydział Budownictwa

Właściwości betonu z zastosowaniem składnika cyrkularnego w postaci kruszywa z recyklingu (RCA)

Properties of concrete with circular component as recycled concrete aggregate (RCA)

Streszczenie

Model gospodarki obiegu zamkniętego (cyrkularnej), zakłada maksymalnie efektywne korzystanie z zasobów. Koncentruje się na ponownym użyciu, odnawianiu i recyklingu istniejących materiałów, aby wydłużyć cykl życia produktów. W praktyce oznacza to ograniczenie odpadów do minimum. Sprostanie założeniom gospodarki cyrkularnej można osiągnąć przez zagospodarowanie znaczącego strumienia odpadów budowlanych, który stanowi gruz z rozbiórki obiektów budowlanych. Selektownie odzyskany gruz betonowy, odpowiednio przetworzony i rozdzielony na frakcje, może stanowić wartościowy składnik betonu. Szczególnie w kontekście planowanych zmian normalizacyjnych, które mają umożliwić stosowanie kruszyw z recyklingu w większym stopniu.

W artykule opisano właściwości kruszyw z recyklingu betonu uzyskanego w wyniku innowacyjnego procesu wieloetapowego kruszenia i separacji, przeprowadzonego w Zakładzie Recyklingu Betonu w Dąbrowie Górniczej. Kruszywo z recyklingu zastosowano w betonie jako częściowy zamiennik kruszywa naturalnego. Ocenie poddano wpływ na właściwości mieszanki betonowej, szczególnie w aspekcie urabialności, a także na wytrzymałość na ściskanie betonu stwardniałego. Zaadresowane zostały również dalsze plany badawcze, zorientowane głównie na obszar trwałości betonu ze składnikiem cyrkularnym.

Abstract

The circular economy model assumes the most efficient use of resources. It focuses on the reuse, renewal, and recycling of existing materials to extend the life cycle of products. In practice, this means minimizing waste. Meeting the goals of a circular economy can be achieved by managing a significant stream of construction waste, which includes rubble from the demolition of buildings. Selectively recovered concrete rubble, properly processed and separated into fractions, can become a valuable component of concrete. Particularly in the context of planned standardization changes that are expected to allow the use of recycled aggregates to a greater extent.

This article describes the properties of recycled concrete aggregates obtained through an innovative multi-stage crushing and separation process carried out at the Concrete Recycling Plant in Dąbrowa Górnicza. The recycled aggregate was used in concrete

as a partial replacement for natural aggregate. The study evaluated its impact on the properties of the concrete mix, particularly in terms of workability, as well as on the compressive strength of the hardened concrete. Further research plans were also addressed, mainly focused on the durability of concrete containing circular component.

1. Wstęp

Liczba ludności na świecie, według statystyk ONZ, przekroczyła 8 mld w 2022 roku [1], a prognozowany dalszy wzrost populacji, zakłada poziom ok 9,7 mld w 2050 roku [2]. Tak dynamiczny przyrost demograficzny stanowi poważne wyzwanie dla gospodarki - rozumianej jako system instytucji i procesów służących zaspokajaniu potrzeb ludności poprzez produkcję i dystrybucję dóbr oraz usług. To właśnie potrzeby człowieka wyznaczają globalne kierunki rozwoju gospodarczego [3, 4]. Jednocześnie priorytetem pozostaje zapewnienie, aby potrzeby obecnych oraz przyszłych pokoleń były zaspokajane w równym stopniu. Z tego względu, już w latach 70-tych ubiegłego wieku zaproponowano model gospodarki o obiegu zamkniętym (GOZ) [5], który zakłada maksymalne wykorzystanie zasobów, poprzez wdrożenie takich procesów, jak wielokrotne użycie, naprawa, regeneracja oraz recykling, dzięki czemu materiały oraz produkty pozostają w obiegu gospodarczym jak najdłużej [6]. Gospodarka cyrkularna zakłada przy tym redukcję strumienia generowanych odpadów i jednocześnie ograniczenie zużycia surowców naturalnych. Model ten znacząco różni się od dominującego w gospodarkach rozwiniętych, uprzemysłowionego modelu liniowego „weź-wyprodukuj-zużyj”, którego efektem jest rosnący strumień odpadów. W 2022 r. w Unii Europejskiej wytworzono łącznie 2,23 mld t odpadów, z czego 38 % wygenerował sektor budownictwa [7]. Bank Światowy szacuje, że globalna ilość odpadów komunalnych może wzrosnąć o 70 % do 2050 r. [8].

Komisja Europejska uznaje GOZ za kluczowy element transformacji gospodarczej [9]. Dla sektora budowlanego opracowano przewodnik „Circularity in the Built Environment: A Reading Guide” [10], podkreślający, że budownictwo odpowiada za około 50 % zużycia surowców pierwotnych i 30÷40 % emisji CO₂ w UE. Co więcej, jedna trzecia unijnych odpadów pochodzi z rozbiórek i modernizacji budynków. Zasadnicze znaczenie ma zatem projektowanie z myślą o demontażu (Design for Deconstruction, DfD), które ogranicza ilość odpadów, podnosi wartość odzyskiwanych materiałów i obniża koszty utylizacji.

W Polsce implementację zasad GOZ w budownictwie przyspieszy nowelizacja ustawy o odpadach, która – zgodnie z Dyrektywą 2018/851/UE – od 1 stycznia 2025 r. nałożyła na wytwórców odpadów budowlanych i rozbiórkowych obowiązek ich segregacji, w co najmniej sześciu frakcjach: drewno, metale, szkło, tworzywa sztuczne, gips oraz odpady mineralne (w tym beton, cegły, płytki, materiały ceramiczne i kamień) [11]. Takie regulacje sprzyjają planowaniu i projektowaniu obiektów, z uwzględnieniem procesów recyklingu i ponownemu wykorzystaniu materiałów w nowych inwestycjach.

2. Recykling betonu

W Polsce, po zakończeniu okresu użytkowania obiektu, konstrukcje są najczęściej rozbierane, a powstały materiał – pozbawiony określonych właściwości – trafia na składowiska lub jest wykorzystywany do wykonywania podbudów i niwelacji terenu. Ponieważ beton jest najczęściej wytwarzanym materiałem budowlanym [12], a do jego produkcji zużywa się znaczne ilości zasobów naturalnych (piaski i żwiru stanowią 70–

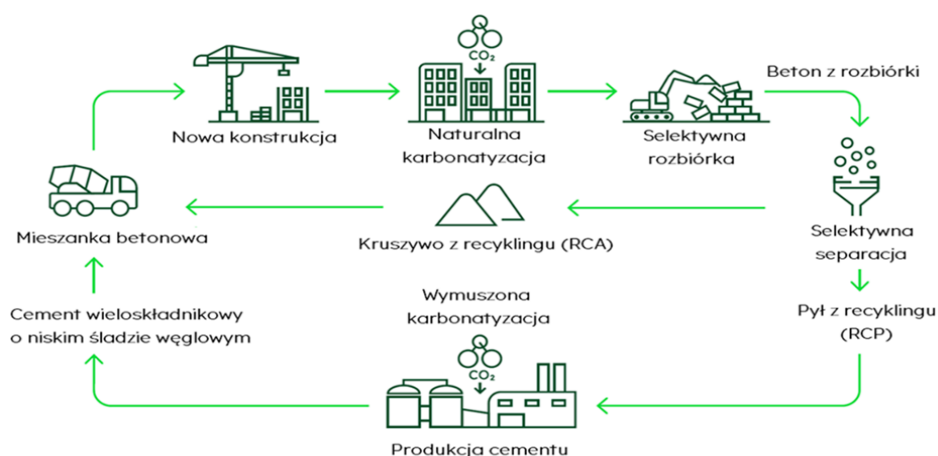
80 % masy mieszanki), ograniczenie eksploatacji kopalin oraz zmiana podejścia do recyklingu stają się pilnym wyzwaniem. Warto podkreślić, że możliwy jest 100% (kompletny) recykling betonu.

2.1. Konwencjonalna produkcja kruszyw z recyklingu

W klasycznym ujęciu recyklingu betonu, pierwszym krokiem jest oddzielenie elementów betonowych od materiałów bitumicznych, drewna, elementów murowych, płyt gipsowych itp. Wstępnie posegregowany materiał trafia do kruszarek szczękowych, z wbudowanym separatorem magnetycznym pozwalającym na oddzielenie elementów stalowych. Rozdrobniony materiał rozdzielony jest na frakcje drobne (< 4 mm) oraz frakcje grube (zazwyczaj < 100 mm), które kierowane są do ponownego kruszenia. W tym podejściu, maksymalizuje się uzysk frakcji grubych oraz minimalizuje się ilość frakcji drobnej, a jakość kruszywa z recyklingu zależy w dużej mierze od jakości materiału pochodzącego z rozbiórki. Kruszywa te charakteryzują się niższą gęstością, większą porowatością i wyższą nasiąkliwością niż kruszywa naturalne [13]. Utrudnia to ich wykorzystanie w produkcji betonu, z uwagi na niekorzystny wpływ na urabialność mieszanki betonowej oraz wytrzymałość betonu [13, 14].

2.2. Selektywna separacja – nowe podejście do recyklingu betonu

W celu poprawy jakości kruszyw z recyklingu betonu i pełnego wykorzystania ich potencjału, proponowano różne metody przetwarzania, takie jak obróbka termiczna i/lub chemiczna, które jednak okazały się kosztowne lub mało efektywne [14]. Selektywna separacja stanowi obiecującą alternatywę: umożliwia wytwarzanie wysokiej jakości kruszyw RCA (Recycled Concrete Aggregates) oraz pyłu RCP (Recycled Cement Paste), który może być wykorzystany jako składnik cementu bezpośrednio lub po procesie wymuszonej karbonatyzacji [15] (rys. 1). Kluczowym założeniem jest efektywne oddzielenie stwardniałego zaczynu cementowego od kruszywa.



Rys. 1. Gospodarka cyrkularna na przykładzie betonu [16]

W 2024 r. grupa Heidelberg Materials uruchomiła w Dąbrowie Górniczej pierwszy na świecie zakład recyklingu betonu, który wykorzystuje opatentowaną technologię

ReConcrete® opartą na selektywnej separacji, wytwarzając jednocześnie kruszywa z recyklingu oraz pył z recyklingu RCP (rys. 2).



Rys. 2. Zakład Recyklingu Betonu, Heidelberg Materials Polska, Dąbrowa Górnicza

Skuteczność wdrożonego procesu recyklingu, potwierdzają badania i przeprowadzona analiza wpływu kruszyw drobnych i grubych na właściwości betonu, które wykazały, że nasiąkliwość i gęstość kruszyw z recyklingu są kluczowe [17].

Celem artykułu jest kompleksowa ocena przydatności wysokiej jakości składnika cyrkularnego (RCA), pozyskanego w innowacyjnym, wieloetapowym procesie kruszenia i separacji prowadzonym w Zakładzie Recyklingu Betonu w Dąbrowie Górniczej, do zastosowań w betonach konstrukcyjnych. Ocena obejmuje szczegółową charakterystykę granulometryczną oraz fizyczną kruszywa. Określono wpływ częściowego zastąpienia naturalnego kruszywa grubego, na reologię mieszanki betonowej oraz wytrzymałość na ściskanie stwardniałego betonu. Uzyskane wyniki stanowią podstawę do dalszych badań trwałościowych, ukierunkowanych na weryfikację długookresowych właściwości betonów zawierających komponenty cyrkularne, w kontekście planowanych zmian normalizacyjnych dopuszczających szersze stosowanie kruszyw pochodzących z recyklingu.

3. Materiały i metody badań

Przedmiotem badań opisanych w artykule były mieszanki betonowe zaprojektowane z następujących składników:

- cement portlandzki wieloskładnikowy CEM II/B-M (S-LL) 42,5N,
- kruszywo naturalne żwirowe,
- kruszywo z recyklingu (RCA) wyprodukowane w zakładzie Heidelberg Materials Polska w Dąbrowie Górniczej,
- superplastyfikator na bazie eterów polikarboksylianowych (PCE).

Dobór materiałów został przeprowadzony w oparciu o ich dostępność rynkową, właściwości użytkowe oraz zgodność z obowiązującymi normami. Każdy z komponentów posiada właściwości umożliwiające jego zastosowanie w technologii betonu konstrukcyjnego, zarówno w kontekście trwałości, jak i efektywności środowiskowej.

3.1. Cement

W pracy zastosowano cement portlandzki wieloskładnikowy CEM II/B-M (S-LL) 42,5N z Cementowni GóraŹdŹe, Heidelberg Materials Polska, zgodny z wymagania normy PN-EN 197-1 [19]. Właściwości użytkowe cementu zestawiono w tabeli 1, natomiast skład chemiczny w tabeli 2. Cement CEM II/B-M (S-LL) 42,5N to cement niskoemisyjny, dla którego obliczony współczynnik netto śladu węglowego (GWPnet – Global Warming Potential) wynosi 418 kg CO₂ na tonę produktu. Dzięki obniżonej emisji dwutlenku węgla w procesie produkcji, materiał ten wpisuje się w strategię zrównoważonego rozwoju i ograniczania wpływu budownictwa na środowisko naturalne. Ponadto, charakterystyka techniczna cementu umożliwia jego szerokie zastosowanie zarówno w betonach zwykłych, jak i specjalistycznych, typu betony architektoniczne czy samozagęszczalne.

Tabela 1. Właściwości mechaniczne i fizyczne cementu CEM II/B-M (S-LL) 42,5N

Kategoria	Właściwość	Wartość średnia
Właściwości mechaniczne	Wytrzymałość na ściskanie po 2 dniach [MPa]	19,4
	Wytrzymałość na ściskanie po 28 dniach [MPa]	52,4
Właściwości fizyczne	Początek czasu wiązania [min]	221
	Woda do konsystencji normowej [%]	28,8
	Stałość objętości [mm]	0,6
	Powierzchnia właściwa [cm ² /g]	4059
	Ciepło hydratacji [J/g]	244

Tabela 2. Skład chemiczny cementu CEM II/B-M (S-LL) 42,5N

Skład chemiczny [% masy]									
Strata prażenia	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	Cl ⁻	Na ₂ O	K ₂ O
3,45	22,21	5,62	3,63	58,10	2,76	2,64	0,062	0,22	0,62

3.2. Kruszywo

Zastosowane kruszywa – zarówno naturalne, jak i pochodzące z recyklingu (RCA) – spełniały wymagania określone w normie PN-EN 12620 [20] dotyczącej kruszyw do betonu oraz były zgodne z zaleceniami normy PN-EN 206 [21] w zakresie ich stosowania w mieszankach betonowych. Właściwości kruszyw zestawiono w tabeli 3 oraz tabeli 4.

Tabela 3. Właściwości kruszywa naturalnego

Właściwość	Frakcja 2/8	Frakcja 8/16
Kategoria kruszywa z recyklingu	G _c 85/20	G _c 85/20
Pyły	f _{1,5}	f _{1,5}
Kategoria mrozoodporności	F ₁	F ₁
Zawartość ziaren nieforemnych	Fl ₁₅	Fl ₁₅
Gęstość ziaren [Mg/m ³]	2,62	2,61
Odporność na rozdrabnianie (LA)	LA ₃₀	LA ₃₀
Zawartość chlorków [%]	<0,01	<0,01
Nasiąkliwość [%]	1,03	0,98

Kruszywo z recyklingu (RCA) posiada status wyrobu budowlanego zgodnie z obowiązującymi przepisami prawa oraz zostało objęte certyfikowanym systemem zakładowej kontroli produkcji (ZKP), prowadzonym zgodnie z wymaganiami normy PN-EN 12620 [20]. Deklarowanym systemem oceny i weryfikacji stałości właściwości użytkowych jest system 2+, co oznacza, że nadzór nad procesem produkcyjnym sprawowany jest przez jednostkę notyfikowaną, a producent zobowiązany jest do prowadzenia ciągłego monitoringu jakości wyrobu.

Tabela 4. Właściwości kruszywa RCA typu A+ [22] z zakładu w Dąbrowie Górniczej

Właściwość	Fracja 4/8	Fracja 8/16
Kategoria kruszywa z recyklingu	G _c 85/20	G _c 85/20
Pyły	f _{1,5}	f _{1,5}
Składniki kruszywa grubego z recyklingu	R _{CU95}	R _{CU95}
Zawartość ziaren nieforemnych	Fl ₁₅	Fl ₁₅
Gęstość ziaren [Mg/m ³]	2,60	2,60
Odporność na rozdrabnianie (LA)	LA ₃₀	LA ₂₅
Zawartość chlorków [%]	<0,01	<0,01
Nasiąkliwość [%]	7,4	4,8

3.3. Domieszka chemiczna

W badaniach zastosowano domieszkę chemiczną na bazie eterów polikarboksylowych o właściwościach przedstawionych w tabeli 5.

Tabela 5. Właściwości domieszki chemicznej

Właściwość			
Składnik podstawowy	Gęstość*	Odczyn pH*	Zawartość części stałych
Eter polikarboksylowy	1,05 g/cm ³	6,0	21,2%
*pomiar w temp. 20 °C			

3.4. Projektowanie betonu ze składnikiem cyrkularnym RCA

Program badawczy zakładał ocenę wpływu kruszywa grubego z recyklingu na właściwości mieszanki betonowej i betonu stwardniałego. Analizowano różne kompozycje składu z uwagi na zmienny stopień zastąpienia kruszywa naturalnego 2/16 mm kruszywem z recyklingu 4/16 mm (objętościowo 30%, 50%, 80%, 100%). W tabeli 6 zestawiono receptury mieszanek betonowych. Przyjęte oznaczenia odpowiadają udziałowi kruszywa z recyklingu, np. RCA 30 odpowiada 30% zastąpieniu kruszywa naturalnego kruszywem z recyklingu. Dla pełnej kompensacji nasiąkliwości (WA₂₄) w badaniach stosowano kruszywo wysuszone w 105 °C oraz dodatkową ilość wody, obliczoną wg udziału poszczególnych frakcji. Przed zasadniczym mieszaniem składników, kruszywo było wstępnie nasycane częścią całkowitej wody zarobowej, przez 30 minut.

Tabela 6. Receptury betonu przy zróżnicowanym udziale kruszywa z recyklingu (RCA)

Składnik	Zawartość składnika [kg/m ³]				
	REF	RCA 30	RCA 50	RCA 80	RCA 100
Piasek 0/2 mm	705	705	705	705	705
Żwir 2/8 mm	477	320	238	96	-
Żwir 8/16 mm	663	444	331	136	-
RCA typu A+ 4/8 mm	-	146	220	352	440
RCA typu A+ 8/16 mm	-	207	313	501	627
CEM II/B-M (S-LL) 42,5N	300	300	300	300	300
Woda efektywna	165	165	165	165	165
Woda całkowita	176	193	202	217	228
Superplastyfikator	2,4	2,4	2,4	2,4	2,4

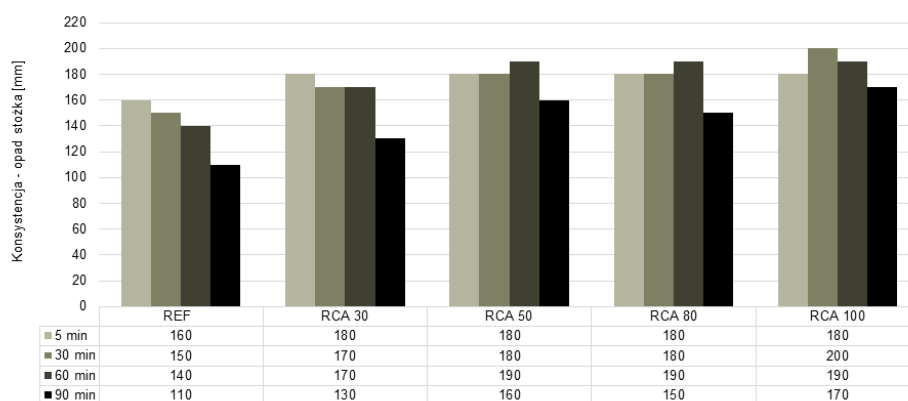
4. Omówienie wyników badań

W rozdziale zestawiono i omówiono wyniki badań:

- konsystencji oznaczonej metodą opadu stożka wg PN-EN 12350-2 [23],
- zawartości powietrza w mieszance betonowej wg PN-EN 12350-7 [24],
- wytrzymałości na ściskanie betonu wg PN-EN 12390-3 [25],
- odporności na karbonatyzację oznaczonej metodą przyspieszoną wg PN-EN 12390-12 [26].

4.1. Właściwości mieszanki betonowej

Oznaczenie konsystencji oraz zawartości powietrza wykonano po 5, 30, 60 i 90 minutach od momentu pierwszego kontaktu wody z cementem. Uzyskane rezultaty przedstawiono na rys.3 i w tabeli 7.



Rys. 3. Konsystencja mieszanek betonowych

Na podstawie uzyskanych wyników stwierdzono, że zastąpienie części kruszywa naturalnego kruszywem grubym z recyklingu (RCA) korzystnie wpływa na kształtowanie i utrzymanie konsystencji mieszanki betonowej w czasie (rys. 3). Najwyższy opad stożka w każdym terminie badania odnotowano dla receptury, w której stopień zastąpienia kruszywem z recyklingu wynosił 100% (RCA 100). Uzyskane wyniki badań są zbieżne z rezultatami opisanymi przez Silva i wsp.[27] oraz Kou i wsp. [28], którzy efekt upłynnienia uzasadnili m.in. niepełnym nasyceniem porów kruszywa,

w czasie badania konsystencji mieszanki betonowej. Jest to związane głównie ze zwiększoną ilością wolnej wody, która musiała zostać dodana podczas mieszania, aby zrekompensować wyższą nasiąkliwość RCA. Mieszanka referencyjna charakteryzowała się najmniejszym opadem stożka.

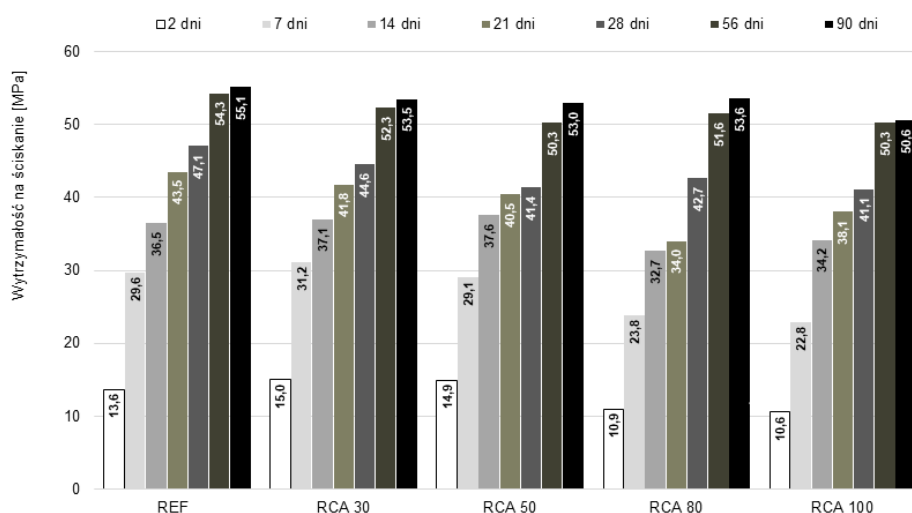
Tabela 7. Zawartość powietrza w mieszance betonowej

Oznaczenie	Zawartość powietrza [%]			
	5 min	30 min	60 min	90 min
REF	2,2	2,5	3,2	3,6
RCA 30	2,0	2,4	2,6	3,2
RCA 50	1,3	1,5	2,6	3,0
RCA 80	1,4	1,6	1,6	2,3
RCA 100	0,8	0,8	1,5	2,4

Zaobserwowano, iż początkowa zawartość powietrza (po 5 min) maleje wraz ze wzrostem udziału kruszywa RCA. Dla mieszanki referencyjnej zawartość powietrza oznaczono na poziomie 2,2%, podczas gdy dla RCA 100 zawartość powietrza wyniosła tylko 0,8%. Dla wszystkich badanych mieszanek stwierdzono jednak wzrost zawartości powietrza w czasie. Wyniki oznaczenia po 90 min są wyższe (odpowiednio 3,6% i 2,4%), choć względnie różnice są mniejsze, a generalny trend został utrzymany. Podobne zależności opisano w pracach [27, 28].

4.2. Właściwości betonu stwardniałego

Wytrzymałość na ściskanie stwardniałego betonu określono zgodnie z normą PN-EN 12390-3 [25]. Dla lepszego rozpoznania wpływu kruszywa z recyklingu (RCA) na rozwój wytrzymałości na ściskanie betonu, badanie przeprowadzono po 2, 7, 14, 21, 28, 56 i 90 dniach dojrzewania betonu – rys. 4.



Rys. 4. Wytrzymałość na ściskanie betonów przy zmiennej zawartości kruszywa grubego z recyklingu (RCA)

Wyniki badań wytrzymałości na ściskanie wykazały, że we wczesnym etapie dojrzewania betonu, zastosowanie do 50% kruszywa z recyklingu nie wpływa

negatywnie na wytrzymałość – wartości są porównywalne lub nawet wyższe niż dla betonu z kruszywem naturalnym (REF). W przypadku wyników 28-dniowych odnotowano niewielki spadek wytrzymałości na ściskanie, nieprzekraczający 13% przy zastosowaniu kruszywa RCA w ilości 100% kruszywa grubego. W późniejszym okresie dojrzewania tj. 56 i 90 dni, stwierdzono zmniejszoną różnicę pomiędzy wynikami wytrzymałości betonu referencyjnego i betonu z kruszywem RCA, co może być tłumaczone efektem wewnętrznej pielęgnacji betonu.

Odporność betonu na karbonatyzację określono metodą przyspieszoną zgodnie z normą PN-EN 12390-12 [26]. Badanie wykonano na próbkach dojrzewających w wodzie przez 56 dni (czas równoważny), następnie przez 14 dni w warunkach laboratoryjnych. Pomiar głębokości karbonatyzacji przeprowadzono po 28 i 70 dniach przechowywania próbek w komorze, gdzie koncentracja dwutlenku węgla wynosiła $3\pm 0,5\% \text{CO}_2$, uśrednione wyniki głębokości karbonatyzacji zamieszczono w tabeli 8.

Tabela 8. Głębokość karbonatyzacji

Oznaczenie	Średnia głębokość karbonatyzacji [mm]	
	28 dni	70 dni
REF	3	5
RCA 30	4	7
RCA 50	5	8
RCA 80	5	9
RCA 100	9	10

Betony zawierające kruszywo grube z recyklingu charakteryzują się wyższą głębokością karbonatyzacji w porównaniu do betonu referencyjnego, przy czym stopień zastąpienia kruszywa naturalnego nie jest czynnikiem jednoznacznie determinującym odporność betonu na karbonatyzację. Wzrost udziału RCA (od 30% do 100%) wiąże się z proporcjonalnym wzrostem głębokości karbonatyzacji, szczególnie po 70 dniach. Jednocześnie, różnice między poszczególnymi betonami, np. RCA 30 – RCA 50 mieszczą się w zakresie powtarzalności metody. Jedynie w przypadku pełnej substytucji kruszywem z recyklingu (RCA 100) można zaobserwować jednoznaczny wpływ na zwiększenie głębokości karbonatyzacji względem betonu referencyjnego. Dla wszystkich analizowanych kompozycji składu głębokość karbonatyzacji jest mniejsza niż 10 mm (tabela 8), co wskazuje na dobrą odporność betonu na karbonatyzację.

5. Podsumowanie

Stosowanie składnika cyrkularnego (kruszywa z recyklingu RCA) jako częściowego i/lub całkowitego substytutu naturalnego kruszywa grubego w betonie, jest możliwym i korzystnym rozwiązaniem technologiczno-materiałowym, co więcej wydaje się nieuniknione, z uwagi na aspekty ekologiczne i ekonomiczne. Powstanie Zakładu Recyklingu Betonu Heidelberg Materials Polska w Dąbrowie Górniczej jest przykładem aktywnego działania na rzecz wdrażania rozwiązań gospodarki obiegu zamkniętego i stosowania w szerszym zakresie i większym potencjałem technologicznym betonowego gruzu budowlanego. Zastosowana technologia wieloetapowego kruszenia i separacji, pozwala na uzyskanie produktów, które można ponownie stosować, zapewniając przy tym ich wysoką jakość.

Projektowanie betonu ze składnikiem cyrkularnym wymaga w pierwszym etapie określenia gęstości oraz nasiąkliwości kruszywa z recyklingu. Należy mieć również na względzie, że koniecznym jest wstępne nasycanie kruszywa. Ponadto, szczególnie istotna jest bieżąca kontrola produkcji oraz dotrzymanie reżimu technologicznego.

Na podstawie uzyskanych wyników badań stwierdzono, iż poprzez zastąpienie naturalnego kruszywa grubego kruszywem z recyklingu (RCA) możliwe jest uzyskanie korzystnych właściwości reologicznych mieszanki betonowej, szczególnie zachowania urabialności w czasie. Wytrzymałość na ściskanie betonów zawierających składnik cyrkularny, względem betonu referencyjnego jest na porównywalnym poziomie – najbardziej zbliżone wytrzymałości na ściskanie uzyskano dla betonów, w których stopień zastąpienia kruszywa naturalnego wynosił 30%. Ponadto, uzyskanie niskiej głębokości karbonatyzacji (< 10 mm) wskazuje na wysoką odporność na karbonatyzację.

Wyniki te wskazują, że beton z udziałem RCA można bezpiecznie projektować i stosować w konstrukcjach, pod warunkiem przestrzegania zasad związanych z nasycaniem kruszywa i kontrolą procesu produkcyjnego. Nadchodzące zmiany normalizacyjne, dopuszczające do 100 % kruszywa grubego z recyklingu, znajdują solidne oparcie w przedstawionych danych eksperymentalnych, torując drogę do szerokiego wdrożenia gospodarki o obiegu zamkniętym w budownictwie betonowym.

Wyniki badań opisane w niniejszym artykule uzyskano w ramach realizowanej agendy badawczej projektu współfinansowanego ze środków Unii Europejskiej na podstawie umowy nr POIR. 02.01.00-00-0058/20-00

6. Literatura

- [1] United Nations, Department of Economic and Social Affairs, Population Division. World Population Prospects 2024: Summary of Results. New York: United Nations; 2024. Available from: [https://population.un.org/wpp/summary of Results](https://population.un.org/wpp/summary%20of%20Results). New York: United Nations; 2024. Available from: <https://population.un.org/wpp/>
- [2] Population Connection. New United Nations Population Estimates and Projections [Internet]. Washington (DC): Population Connection; 2022 Jul 11 [cited 2025 May 26]. Available from: <https://populationconnection.org/article/new-united-nations-population-estimates-and-projections/>
- [3] Begg D, Fischer S, Dornbusch R. *Makroekonomia*. Warszawa: PWE; 2014
- [4] Gruchman B, red. *Ekonomia społeczna i gospodarka rynkowa*. Warszawa: PWN; 2002
- [5] Boulding KE. The economics of the coming spaceship Earth. In: Jarrett H, editor. *Environmental Quality in a Growing Economy*. Baltimore: Johns Hopkins University Press; 1966. p. 3–14
- [6] European Commission. Closing the loop – An EU action plan for the Circular Economy. Brussels: European Commission; 2015.
- [7] Eurostat. Waste statistics - Statistics Explained. 2024. Dostępne na: https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php/Waste_statistics
- [8] Bank Światowy (2018), What a Waste 2.0: A Global Snapshot of Solid Waste Management to 2050
- [9] European Commission. A new Circular Economy Action Plan – For a cleaner and more competitive Europe. Brussels: European Commission; 2020.

- [10] European Circular Economy Stakeholder Platform. Circularity in the Built Environment: A Reading Guide. Brussels: ECESP; 2025. Available from: <https://circulareconomy.europa.eu/platform/en/knowledge/circularity-built-environment-reading-guide>
- [11] European Union. Directive (EU) 2018/851 of the European Parliament and of the Council of 30 May 2018 amending Directive 2008/98/EC on waste. Off J Eur Union. 2018 Jun 14;L150:109-140.
- [12] Ashby, M.F. Materials and the Environment: Eco-Informed Material Choice, 2nd ed.; Elsevier/Butterworth-Heinemann: Waltham, MA, USA, 2013.
- [13] Joseph, H.S.; Pachiappan, T.; Avudaiappan, S.; Maureira-Carsalade, N.; Roco-Videla, Á.; Guindos, P.; Parra, P.F. A Comprehensive Review on Recycling of Construction Demolition Waste in Concrete. Sustainability 2023, 15, 4932. [CrossRef]
- [14] Shaban, W.M.; Yang, J.; Su, H.; Mo, K.H.; Li, L.; Xie, J. Quality improvement techniques for recycled concrete aggregate: A review. J. Adv. Concr. Technol. 2019, 17, 151–167. [CrossRef]
- [15] Zajac M, Skocek J, Durdzinski P, Bullerjahn F, Skibsted J, Ben Haha M. Effect of carbonated cement paste on composite cement hydration and performance. Cem Concr Res. 2020;134:106090. doi:10.1016/j.cemconres.2020.106090
- [16] HeidelbergMaterials. Annual and sustainability report 2023. Heidelberg: Heidelberg Materials AG; 2024 [cited 2025 May 27]. Available from: <https://www.heidelbergmaterials.com/annual-report-2023>
- [17] Skocek J, Ouzia A, Vargas Serrano E, Pato N. Recycled sand and aggregates for structural concrete: toward the industrial production of high-quality recycled materials with low water absorption. Sustainability. absorption. Sustainability 2024;16(2):814. doi:10.3390/su16020814
- [18] Akram A, Słowik M. Wpływ uziarnienia i współczynnika miażdżenia kruszywa na właściwości stwardniałego betonu. Materiały Budowlane. 2023;615(11):41-45. doi:10.15199/33.2023.11.09
- [19] PN-EN 197-1:2012 Cement - Część 1: Skład, wymagania i kryteria zgodności dotyczące cementów powszechnego użytku
- [20] PN-EN 12620+A1:2010 Kruszywa do betonu
- [21] PN-EN 206+A2:2021-08 Beton - Wymagania, właściwości użytkowe, produkcja i zgodność
- [22] prPN-B-06265
- [23] PN-EN 12350-2:2019-07 Badania mieszanki betonowej - Część 2: Badanie konsystencji metodą opadu stożka
- [24] PN-EN 12350-7:2019-08 Badania mieszanki betonowej - Część 7: Zawartość powietrza – Metody ciśnieniowe
- [25] PN-EN 12390-3:2019-07 Badania betonu - Część 3: Wytrzymałość na ściskanie próbek do badań
- [26] PN-EN 12390-12:2020-06 Badania betonu - Część 12: Oznaczanie odporności betonu na karbonatyzację – Przyspieszona metoda karbonatyzacji
- [27] Silva RV, de Brito J, Dhir RK. Fresh-state performance of recycled aggregate concrete: a review. Constr Build Mater. 2018;178:19-31. doi:10.1016/j.conbuildmat.2018.05.149.
- [28] Kou SC, Poon CS, Agrela F. Comparisons of natural and recycled aggregate concretes prepared with the addition of different mineral admixtures. Cem Concr Compos. 2011;33(8):788-795. doi:10.1016/j.cemconcomp.2011.05.0w 09.