

## **WYTRZYMAŁOŚĆ BETONU Z DUŻĄ ZAWARTOŚCIĄ BETONOWEGO KRUSZYWA Z RECYKLINGU**

Daniel Zawal, Anna M. Grabiec, Bogdan J. Wosiewicz

Uniwersytet Przyrodniczy w Poznaniu

**Streszczenie.** W pracy przedstawiono rezultaty badań wytrzymałości na ściskanie oraz stopnia utraty wytrzymałości na ściskanie po przeprowadzeniu 34 cykli zamrażania-odmrażania uzyskane dla betonu recyklingowego, w którego składzie 75% objętości kruszyw stanowiło kruszywo pozyskane poprzez kruszenie betonu zwykłego wytworzonego laboratoryjnie (tzw. beton pierwotny). Otrzymane wyniki wskazują na możliwość wykonania wysokiej jakości betonu, porównywalnego nawet do podobnego składem betonu zwykłego, przy czym lepsze efekty uzyskano, stosując kruszywo recyklingowe poddane uprzednio procesowi karbonatyzacji. Końcowa wytrzymałość betonu z modyfikowanym w ten sposób kruszywem była dla większości serii większa o 16–23% od betonu z kruszywem recyklingowym niepoddanym modyfikacji. Mrozoodporność betonu, wyrażona stopniem utraty wytrzymałości, okazała się również wyższa w seriach wykonanych z kruszywem modyfikowanym – stwierdzono w tym przypadku utratę w zakresie 13–21%, wobec 26–44% w seriach kontrolnych.

**Słowa kluczowe:** beton recyklingowy, kruszywo recyklingowe, wytrzymałość na ściskanie, mrozoodporność, karbonatyzacja

### **WSTĘP**

Jednym z najistotniejszych wyzwań współczesnego budownictwa jest poszukiwanie i wdrażanie takich technologii, które realizując założenia przyjęte w projekcie architektoniczno-konstrukcyjnym, zapewnią jednocześnie minimalizację negatywnego oddziaływania budynku lub budowli na środowisko naturalne. Niewątpliwie poszukiwanie tego typu rozwiązań jest nieodzowne w ustalaniu składu betonu, którego dwa podstawowe składniki kruszywo i cement przyczyniają się – na etapie ich pozyskiwania lub produkcji – do oddziaływań antropopresyjnych. Pozyskiwanie kruszyw wiąże się z degradacją krajobrazu, a często z innymi problemami, takimi jak na przykład obniżanie poziomu wód gruntowych. W przypadku cementu istotne znaczenie ma emisja ditlenku węgla, wyni-

---

Adres do korespondencji – Corresponding author: Anna M. Grabiec, Uniwersytet Przyrodniczy w Poznaniu, Instytut Budownictwa i Geoinżynierii, ul. Piątkowska 94E, 60-649 Poznań, e-mail: [agra@up.poznan.pl](mailto:agra@up.poznan.pl)

kająca z procesu dekalcytacji oraz ze spalania paliw wsadowych pieca klinkierowego. Według różnych szacunków (m.in. WBCSD [2009]) stanowi ona około 5% całkowitej emisji antropogenicznej. Chociaż trudno jest wyeliminować wymienione oddziaływania w sposób całkowity, to jednak istnieją sposoby ich ograniczania. Przykładem może być przynajmniej częściowe zastąpienie kruszyw naturalnych kruszywami z recyklingu. Dodatkowo kruszywa te mogą pochodzić z elementów konstrukcji, w których beton uległ powierzchniowej karbonatyzacji – procesowi przyczyniającego się do poprawy bilansu emisji CO<sub>2</sub>. Stopień karbonatyzacji można zwiększyć po skruszeniu betonu, co jest przedmiotem analiz m.in. Lagerblada [2005]. Karbonatyzację można zatem traktować jako drugi sposób ograniczania negatywnego oddziaływania konstrukcji z betonu na środowisko.

Technologia betonu recyklingowego, której początki sięgają okresu po II wojnie światowej, zyskuje obecnie ponownie na znaczeniu ze względu na wzmagającą się troskę o zachowanie dobrego stanu środowiska naturalnego. W ciągu ostatniej dekady systematycznie wzrasta liczba znaczących publikacji na ten temat, zwłaszcza w czasopismach z wysokim współczynnikiem IF. Tylko od 2000 roku opublikowano ponad 1200 prac (dane na podstawie bazy SCOPUS). Wciąż jednak istnieją obawy w kwestii stosowania kruszywa recyklingowego do betonu, chociaż w niektórych normach i wytycznych [DIN 4226-100, BS 8500-2, RILEM, za Wolską-Kotańską 2005] przedstawia się dopuszczalny stopień zastąpienia kruszyw naturalnych kruszywami z odzysku, zależnie od ich typu. Norma PN-EN 12620 „Kruszywa do betonu” dopuszcza zastosowanie kruszywa z recyklingu w betonie pod warunkiem spełnienia kryteriów dotyczących zawartości ewentualnych zanieczyszczeń mogących wpłynąć na jakość betonu i jednocześnie zaleca przeprowadzenie właściwych badań kruszyw w kontekście wymagań dotyczących późniejszego użytkowania betonu. W pracy zbiorowej „Beton według normy PN-EN 206-1 – komentarz” [2004], w rozdziale poświęconym kruszywom, zaakcentowano również otwierające się możliwości stosowania kruszyw z recyklingu i odpadów przemysłowych w technologii betonu. Jak podkreślają autorzy wspomnianego komentarza, przed wprowadzeniem normy PN-EN 206-1 jedynie kruszywo z żużla wielkopieczowego kawałkowanego można było stosować w betonach o ówczesnych klasach do B25. Kruszywo recyklingowe w praktyce jest jednak wciąż uznawane za potencjalnie niebezpieczne, co w konsekwencji powoduje jego postrzeganie jako materiału „ryzykownego”. Tymczasem okazuje się, że dzięki stosowaniu kruszyw recyklingowych można otrzymać lepsze parametry betonów, niż podpowiada to intuicja inżynierska. Aby uzyskać beton nieodbiegający jakością od jakości podobnego składem betonu zwykłego, nieodzowne jest jednak spełnienie kilku warunków, m.in.:

- zastosowanie kruszywa recyklingowego typu II (pochodzącego z betonu) lub III (z mieszaniny kruszywa recyklingowego i naturalnego) według RILEM (tabela 1, za Wolską-Kotańską [2005]),
- wykonanie analizy sitowej – w przypadku uzyskania kruszywa niemieszczącego się w krzywych dobrego uziarnienia konieczne jest przeprowadzenie zabiegu doziarnienia,
- dokładne określenie nasiąkliwości kruszyw i gęstości pozornej – niewłaściwy jest sposób polegający jedynie na wprowadzaniu mokrego kruszywa bez kontroli zawartości wody, gdyż może to znacząco zmienić wartość współczynnika woda-cement betonu,

- konieczność wprowadzenia zwiększonej zawartości zaczynu cementowego (zachowując ten sam współczynnik  $w/c$ ) w stosunku do wartości wyjściowej, wynikającej z ustalonej receptury betonu,
- zastosowanie zaproponowanej przez Tam i in. [2005] metody dwuetapowego dozowania wody w procesie mieszania składników,
- użycie wysokoefektywnego upłynniacza.

Nieodzwonne jest oczywiście wykonanie mieszanek testowych z różną zawartością kruszywa recyklingowego oraz, jak wskazano, ze zmienną ilością dodatkowego zaczynu. Dodatkowa objętość zaczynu wiąże się z koniecznością przeciwdziałania efektowi utraty konsystencji w wyniku stosowania kruszywa o zaokrąglonych krawędziach. Takie właściwości posiada kruszywo recyklingowe pochodzące z dobrej jakości betonu o niskim współczynniku  $w/c$  oraz niskim stopniu degradacji korozyjnej.

Tabela 1. Klasyfikacja kruszyw do betonu pochodzących z recyklingu według RILEM (za Wolską-Kotańską [2005])

Table 1. Classification of recycled concrete aggregates according to RILEM (by Wolska-Kotańska [2005])

Parametr Parameter	Jednostka Unit	Typ I Type I	Typ II Type II	Typ III Type III
Minimalna gęstość w stanie suchym Minimum value of density in dry state	kg·m <sup>-3</sup>	1500	2000	2400
Maksymalna nasiąkliwość Maximum value of water absorption	%	20	10	3
Maksymalna zawartość materiału o gęstości < 2200 kg·m <sup>-3</sup> Maximum content of material with density < 2200 kg·m <sup>-3</sup>	%	–	10	10
Maksymalna zawartość materiału o gęstości < 1800 kg·m <sup>-3</sup> Maximum content of material with density < 1800 kg·m <sup>-3</sup>	%	10	1	1
Maksymalna zawartość materiału o gęstości < 1000 kg·m <sup>-3</sup> Maximum content of material with density < 1000 kg·m <sup>-3</sup>	%	1	0,5	0,5
Maksymalna zawartość materiału wypełniaczy (poniżej 0,063 mm) Maximum content of binders (below 0,063 mm)	%	3	2	2
Maksymalna zawartość kruszywa drobnego (poniżej 4 mm) Maximum content of fine aggregate (below 4 mm)	%	5	5	5
Maksymalna zawartość materiałów obcych* Maximum content of foreign matter *	%	5	1	1
Maksymalna zawartość metali Maximum content of metals	%	1	1	1
Maksymalna zawartość materiału organicznego Maximum content of organic materials	%	1	0,5	0,5
Maksymalna zawartość rozpuszczalnych siarczanów** Maximum level of soluble sulphates**	%	1	1	1

\*Metal, szkło, materiały miękkie, bitumiczne \*\*Przeliczone na SO<sub>3</sub>.

\*Metal, glass, soft materials, bithumic materials. \*\*Calculated as SO<sub>3</sub>.

## SPOSOBY OGRANICZENIA NEGATYWNEGO ODDZIAŁYWANIA PRODUKCJI CEMENTU NA ŚRODOWISKO NATURALNE

Jak wspomniano we wstępie, coraz bardziej istotną kwestią w projektowaniu składu betonu jest ograniczanie jego negatywnego oddziaływania na środowisko naturalne. Według Damineli i in. [2010] jednym ze sposobów osiągnięcia tego celu jest uwzględnianie w ustalaniu receptury dwóch współczynników:

- $b_i$  – współczynnika intensywności spoiwa (*binder intensity index*), wyrażającego masę cementu (przypadającą na  $1 \text{ m}^3$  betonu), konieczną dla uzyskania wytrzymałości 1 MPa ( $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}/\text{MPa}$ ),
- $c_i$  – współczynnika emisji  $\text{CO}_2$  (*carbon dioxide index*), wyrażanego jako masę ditlenku węgla wyemitowanego w procesie produkcji takiej ilości cementu, która umożliwi uzyskanie wytrzymałości betonu o wartości 1 MPa ( $\text{kg}/\text{MPa}$ ).

Przyjmując tę koncepcję, optymalny projekt konstrukcji z betonu powinien być ukierunkowany na osiągnięcie jak największej trwałości, co jest powiązane z wytrzymałością betonu. Ważne jest również użycie cementów z dodatkami mineralnymi, zastępującymi klinkier. W ten sposób zmniejsza się wartości  $b_i$  i  $c_i$ , gdyż na jedną jednostkę wytrzymałości betonu (1 MPa) przypada mniejsza emisja  $\text{CO}_2$ . Ponadto wydłużeniu ulega okres użytkowania konstrukcji, co powoduje, że realna emisja na jednostkę wytrzymałości będzie jeszcze mniejsza („odroczy się” w czasie konieczność remontu lub rozbiórki budynku). W badaniach autorów koncepcji współczynników  $b_i$  i  $c_i$  najbardziej korzystne wartości współczynników osiągnięto dla cementów z dodatkami mineralnymi oraz w betonach o wytrzymałości powyżej 50 MPa. W warunkach laboratoryjnych [Damineli i in. 2010] uzyskano odpowiednio  $b_i = 4 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}/\text{MPa}$  oraz  $c_i = 2 \text{ kg}/\text{MPa}$ .

Drugim aspektem związanym ściśle z koncepcją budownictwa ekologicznego jest dbałość o ograniczanie eksploatacji zasobów naturalnych oraz zmniejszenie ilości odpadów. Zastosowanie kruszywa recyklingowego jest dobrym sposobem realizacji obu celów. Jednakże kruszywo z recyklingu, w odniesieniu do kruszywa naturalnych, charakteryzuje się m.in. [Wolska-Kotańska 2005]:

- mniejszą o 10–30% wytrzymałością na ściskanie oraz o 10% wytrzymałością na rozciąganie,
- niższym o 10–40% modułem sprężystości,
- nawet o 55% zwiększonym skurczem.

Stosowanie tego typu kruszyw może więc spowodować pogorszenie cech wytrzymałościowych, a w jeszcze większym stopniu – cech trwałościowych betonu, skutkując odejściem od pierwotnej idei współczynników  $b_i$  oraz  $c_i$ , polegającej na otrzymaniu jak najmniejszym kosztem (dla środowiska naturalnego) betonu o dużej wytrzymałości, a zatem bardziej trwałego. Istotnym czynnikiem przyczyniającym się do zmniejszenia tego efektu jest ograniczenie przepuszczalności kruszyw, której miarą może być nasiąkliwość betonu. Istnieją oczywiście sposoby modyfikacji kruszyw, ukierunkowane bądź to na ograniczenie zawartości zaprawy wokół naturalnych ziaren kruszywa, bądź na zmniejszanie nasiąkliwości kruszyw. Do pierwszej grupy można zaliczyć metodę termiczną HRM (*Heating and Rubbing Method*), do drugiej – metodę doszczelniania kruszywa. Obie opisano w pracy Ajdukiewiczza i Kliszczewicz [2009]. Inna z metod [Zhu i in. 2013] polega na aplikacji związków silanowych lub siloksanowych na powierzchnię kruszywa

z recyklingu. Wadą wszystkich z wymienionych sposobów modyfikacji jest jednak osiągnięcie zamierzonego celu w konflikcie z koncepcją rozwoju zrównoważonego.

Jak już wspomniano, w koncepcji współczynników  $b_i$  i  $c_i$  istotne jest nie tyle samo zwiększanie wytrzymałości betonu, co ograniczanie jednostkowej emisji  $\text{CO}_2$ . Stosowanie betonowych kruszyw recyklingowych, chociaż z pozoru wydaje się być niekorzystne, może poprawić bilans emisyjny ditlenku węgla. Dzieje się tak ze względu na to, że elementy betonowe, z których wytwarzane jest kruszywo recyklingowe ulegają w czasie użytkowania karbonatyzacji. Nawet jeśli będzie to karbonatyzacja częściowa, przyczyni się ona do pochłaniania ditlenku węgla z powietrza, do którego został on wyemitowany przede wszystkim w procesach produkcji cementu. Stopień karbonatyzacji można jednak zwiększyć po skruszeniu betonu. Wówczas karbonatyzacja (traktowana jako metoda sekwestracji ditlenku węgla) w przypadku kruszyw recyklingowych staje się jeszcze bardziej efektywna, gdyż co najmniej o kilka rzędów wartości zwiększeniu ulega powierzchnia właściwa (w odniesieniu do wyjściowej powierzchni elementu betonowego) betonowych ziaren kruszywa. Dzięki temu w przypadku kruszywa recyklingowego można osiągnąć wysoki stopień karbonatyzacji, a więc wysoki stopień sekwestracji wyemitowanego wcześniej  $\text{CO}_2$ . Teoretycznie wartość ta wynika ze wzoru [Pade i in. 2007]:

$$\text{Sekw}_{\text{CO}_2} = 0,75 \cdot C \cdot \text{CaO} \cdot \frac{M_{\text{CO}_2}}{M_{\text{CaO}}} = 0,59 \cdot C \cdot \text{CaO} \quad [\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}] \quad (1)$$

gdzie:  $C$  – zawartość cementu [ $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ ],

$\text{CaO}$  – zawartość tlenku wapnia w cemencie (–),

$M_{\text{CO}_2}$  – masa molowa ditlenku węgla ( $44 \text{ kg} \cdot \text{kmol}^{-1}$ ),

$M_{\text{CaO}}$  – masa molowa tlenku wapnia ( $56 \text{ kg} \cdot \text{kmol}^{-1}$ ).

Koncepcję pochłaniania ditlenku węgla przez kruszywo z recyklingu opisali m.in.: Lagerblad [2005], Haselbach i Ma [2008] oraz Kou i in. [2014]. Teoretycznie masa pochłoniętego  $\text{CO}_2$  może wynieść nawet ponad  $100 \text{ kg CO}_2 \cdot \text{m}^{-3}$  betonu. Zakładając, że w składzie betonu będzie  $350 \text{ kg}$  cementu o zawartości tlenku wapnia  $60\%$ , otrzymamy:

$$\text{Sekw}_{\text{CO}_2} = 0,59 \cdot 350 \cdot 0,60 = 124 \text{ kgCO}_2 \quad (2)$$

Przy założeniu zawartości cementu  $280 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$  natomiast:

$$\text{Sekw}_{\text{CO}_2} = 0,59 \cdot 280 \cdot 0,60 = 99 \text{ kgCO}_2 \quad (3)$$

Współczynnik jednostkowej emisji  $\text{CO}_2$  na tonę wyprodukowanego cementu w warunkach polskich wynosi w przybliżeniu  $630 \text{ kg} \cdot \text{t}^{-1}$  [Deja i in. 2010]. A zatem, gdy kruszywo recyklingowe otrzymane z betonu, który uległ karbonatyzacji w  $75\%$ , będzie stanowić około  $30\text{--}40\%$  objętości nowego betonu (ok.  $50\%$  objętości kruszyw), to przyjmując zawartość cementu  $350 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$  oraz ilość uwolnionego do atmosfery w czasie jego produkcji  $220 \text{ kg CO}_2$ , można stwierdzić, że rzeczywista emisja ditlenku węgla przypadająca na jeden metr sześcienny betonu dla podanych warunków wyniesie około  $180\text{--}190 \text{ kg}$ . Będzie więc ona około  $15\%$  mniejsza niż w sytuacji podstawowej (użycia kruszyw recyklingowych z betonu, który nie uległ karbonatyzacji), bez uwzględniania karbonatyzacji kruszywa recyklingowego. Jest to oczywiście część emisji związana

jedynie z produkcją cementu, bez uwzględniania pozostałych źródeł z całego cyklu produkcji betonu. Ponadto w założeniu kruszywo pochodzi z elementów betonowych, do których wytworzenia wykorzystano cement portlandzki bez dodatków (CEM I).

Analogiczne przeliczenie dla dwóch cementów produkowanych w jednej z cementowni (podano wartość średnią z rocznych uśrednionych emisji z ostatnich kilku lat) w Polsce przedstawiono w tabeli 2.

Tabela 2. Symulacja ograniczenia emisji CO<sub>2</sub> w wyniku zastosowania kruszywa recyklingowego poddanego karbonatyzacji

Table 2. Simulation of CO<sub>2</sub> emission reduction as a result of implementation of recycled concrete aggregate subjected to carbonation process

Rodzaj cementu Cement type	Współczynnik emisji jednostkowej Emission factor [kg·t <sup>-1</sup> cem.]	Emisja rzeczywista Real state emission [kg·m <sup>-3</sup> **]	Emisja zredukowana Reduced emission [kg·m <sup>-3</sup> ***]	Stopień ograniczenia Reduction rate [%]
CEM I 42,5R	751	263	220–230	12–16
CEM II B-V 32,5R	526	184	140–150	19–24

\* kg CO<sub>2</sub> w 1 m<sup>3</sup> betonu, przy założeniu receptury z zawartością cementu 350 kg/m<sup>3</sup>, \*\* kg CO<sub>2</sub> w 1 m<sup>3</sup> betonu, przy założeniu ok. 50% objętości udziału kruszywa z recyklingu w składzie kruszyw.

\* kg of CO<sub>2</sub> per cubic meter of concrete with cement at the level of 350 kg/m<sup>3</sup>, \*\* kg of CO<sub>2</sub> per cubic meter of concrete with 50% volume of recycled concrete aggregate in whole aggregate composition.

## MATERIAŁ I METODY

Realizacja eksperymentu przebiegła następująco:

1. Wykonanie betonu pierwotnego z kruszywem naturalnym (receptury wraz z wynikami wytrzymałości na ściskanie dla 5 serii o zróżnicowanym współczynniku *w/c* przedstawiono w tabeli 3).

Tabela 3. Receptury i wyniki badań wytrzymałości na ściskanie betonu pierwotnego

Table 3. Recipes and results of compressive strength tests of parent concrete

Oznaczenie serii betonu Designation of concrete series	Współczynnik woda-cement Water-cement ratio [-]	Cement Cement [kg·m <sup>-3</sup> ]	Woda Water [kg·m <sup>-3</sup> ]	Kruszywo Aggregate [kg·m <sup>-3</sup> ]	Wytrzymałość na ściskanie Compressive strength	
					28-dniowa after 28 days [MPa]	60-dniowa after 60 days [MPa]
BP_0.38	0,38	358	137	1973	73,3	77,2
BP_0.45	0,45	327	147	1975	55,3	61,8
BP_0.55	0,55	282	155	1990	40,6	45,2
BP_0.65	0,65	237	154	2018	33,0	36,8
BP_0.72	0,72	206	148	2046	28,8	31,1

2. Kruszenie betonu pierwotnego i podział na frakcje uzyskanych kruszyw (6 frakcji: 1/2, 2/4, 4/6, 6/8, 8/12 i 12/16 mm).

3. Modyfikacja części kruszyw recyklingowych w komorze przyspieszonej karbonatyzacji w warunkach średniej wilgotności względnej powietrza 55%, temperatury

20–24°C oraz stężenia objętościowego CO<sub>2</sub> na poziomie 7%. Czas karbonatyzacji ustalono na 6 tygodni. Zgodnie ze wzorem Ściślewskiego [1999]:

$$\sqrt{\frac{c_{1,acc}}{c_{1,env}}} = a \quad (4)$$

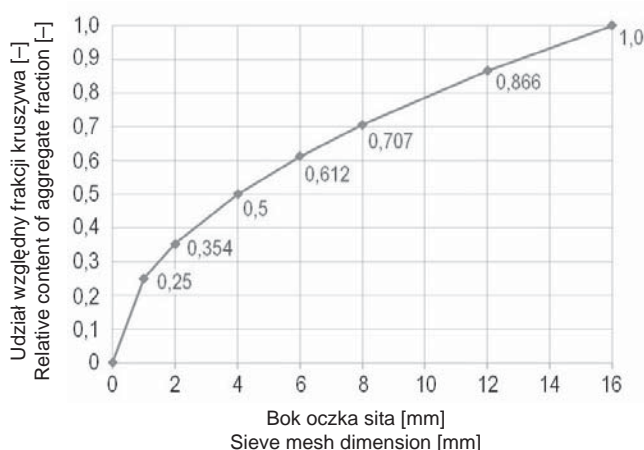
gdzie:  $a$  – stopień przyspieszenia procesu karbonatyzacji,

$c_{1,acc}$  – stężenie ditlenku węgla w komorze karbonatyzacyjnej [%],

$c_{1,env}$  – stężenie ditlenku węgla dla warunków naturalnych (0,04%),

odpowiada to okresowi około 18-miesięcznej karbonatyzacji w warunkach naturalnych.

4. Przygotowanie mieszanki kruszyw na podstawie krzywej idealnego uziarnienia według Fullera (rys. 1) i założenie, że w składzie betonu 75% objętości kruszywa będzie stanowił kruszywo recyklingowe o uziarnieniu 1/16 mm, natomiast 25% – kruszywo naturalne o uziarnieniu 0/2 mm.



Rys. 1. Krzywa idealnego uziarnienia według Fullera

Fig. 1. Ideal aggregate composition curve presented by Fuller

5. Badanie nasiąkliwości kruszyw, zgodnie z procedurą przedstawioną w normie PN-EN 1097-6, wartość końcowa stanowi średnią z trzech wyników będących z kolei średnią ważoną nasiąkliwości każdej odrębnej frakcji kruszywa (końcowe wyniki w tym zakresie przedstawiono w tabeli 4).

6. Wykonanie betonu recyklingowego według receptur przedstawionych w tabeli 5.

7. Badania parametrów mieszanek betonowych (konsystencji metodą Vebe oraz zawartości powietrza).

8. Badania betonu recyklingowego: wytrzymałość na ściskanie po 28 i 56 dniach twardnienia oraz wytrzymałość na ściskanie po przeprowadzeniu 34 cykli zamrażania i odmrażania. Decyzja o badaniu wytrzymałości próbek po przeprowadzeniu 34 cykli zamrażania i odmrażania wynikała z zaobserwowania po tym okresie badań poważnych uszkodzeń powierzchniowej jednej z próbek w serii RC\_0.45A.

Tabela 4. Średnia nasiąkliwość mieszanki kruszyw recyklingowych  
Table 4. Mean values of water absorption of recycled concrete aggregate mix

Oznaczenie kruszywa Aggregate series designation	Kruszywo niemodyfikowane Unmodified aggregate [%]	Kruszywo modyfikowane Modified aggregate [%]	Zmniejszenie Reduction rate [%]
KR_0.38	2,7	2,3	15
KR_0.45	3,5	2,2	37
KR_0.55	4,1	2,7	34
KR_0.65	4,0	2,9	28
KR_0.72	3,4	3,0	12

Tabela 5. Receptury betonu recyklingowego  
Table 5. Recipes of recycled aggregate concrete

Oznaczenie serii betonu Designation of concrete series	Współ- czynnik w/c betonu Water- cement ratio [-]	Oznaczenie użytego kruszywa Designation of used aggregate	Cement Cement content [kg·m <sup>-3</sup> ]	Woda zarobowa Mix water [kg·m <sup>-3</sup> ]	Woda dodatkowa* Additional water* [kg·m <sup>-3</sup> ]	Kruszywo naturalne Natural aggregate [kg·m <sup>-3</sup> ]	Kruszywo recyklin- gowe Recycled aggregate [kg·m <sup>-3</sup> ]
RC_0.38A RC_0.38C	0,40	KR_0.38	404	162	34,7 29,2	469	1224
RC_0.45A RC_0.45C	0,40	KR_0.45	404	162	44,1 27,9	469	1224
RC_0.55A RC_0.55C	0,40	KR_0.55	404	162	52,0 34,7	469	1224
RC_0.65A RC_0.65C	0,40	KR_0.65	404	162	50,6 37,3	469	1224
RC_0.72A RC_0.72C	0,40	KR_0.72	404	162	43,0 38,0	469	1224

\*Zawartość wody dodatkowej wynika z nasiąkliwości kruszyw – jako pierwszą podano zawartość dla kruszyw niemodyfikowanych, jako drugą – dla kruszyw poddanych karbonatyzacji.

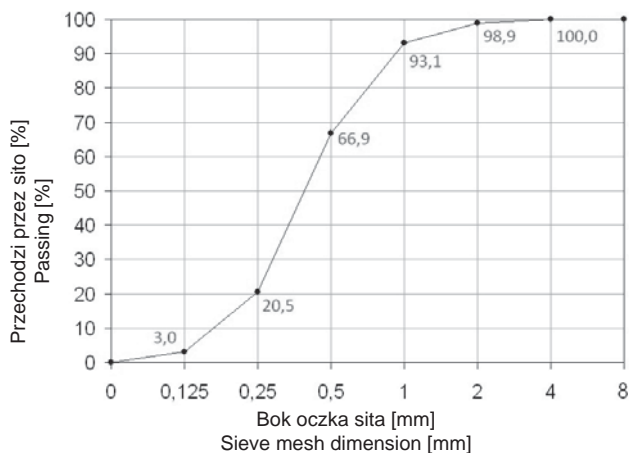
\*Additional water content is due to aggregate water absorption – as the first the value for unmodified aggregate is given and as the latter – for carbonated aggregate.

Do wykonywania betonów (zarówno betonu pierwotnego, jak i recyklingowego) zastosowano następujące składniki:

- cement CEM I 42,5 R,
- piasek naturalny o gęstości pozornej 2,65 kg·dm<sup>-3</sup> i uziarnieniu przedstawionym na rysunku 2,
- żwir z kruszyw otczakowych dwóch frakcji 2/8 mm i 8/16 mm o gęstości pozornej 2,65 kg·dm<sup>-3</sup> (w przypadku betonu pierwotnego),
- superplastyfikator VISCOCRETE 3,
- wodę wodociągową z sieci wodociągów poznańskich.

W trakcie mieszania składników betonu recyklingowego zastosowano metodę dwu-etapowego dozowania wody, zaproponowaną przez Tam i in. [2005]. Badania mieszanki betonowej prowadzono w czasie około 25 minut od pierwszego dozowania wody (do-





Rys. 2. Krzywa uziarnienia piasku zastosowanego do wykonania betonów recyklingowych  
 Fig. 2. Grading curve of sand used in recycled concrete

zowanie na kruszywo). Badania wytrzymałości na ściskanie przeprowadzono po 28 i 56 dniach twardnienia betonu, natomiast dla próbek po 34 cyklach zamrażania-odmrażania po upływie 12 miesięcy od momentu wykonania mieszanek betonowych. Dodatkowe wyniki z badań wytrzymałości na ściskanie betonu recyklingowego odniesiono do kilku wyników uzyskanych przez innych autorów dla betonu zwykłego o podobnym składzie (rodzaj i zawartość cementu oraz wartość współczynnika  $w/c$ ).

Badania wytrzymałości na ściskanie betonu recyklingowego, zarówno po 28 jak i 56 dniach twardnienia, poddano analizie statystycznej w programie *Statistica* (licencja nr JGNP 105B037825 AR-A). Przeprowadzono jednoczynnikową analizę wariancji oraz, dla ustalenia wielkości efektów, porównania zaplanowane (analiza kontrastów) pomiędzy parami serii zawierającymi w składzie kruszywa pochodzące z tego samego betonu pierwotnego (czyli np. RC\_0.55A porównywano z RC\_0.55C). W prezentacji wyników badań wytrzymałości na wykresach słupki błędów oznaczają 95-procentowe przedziały ufności.

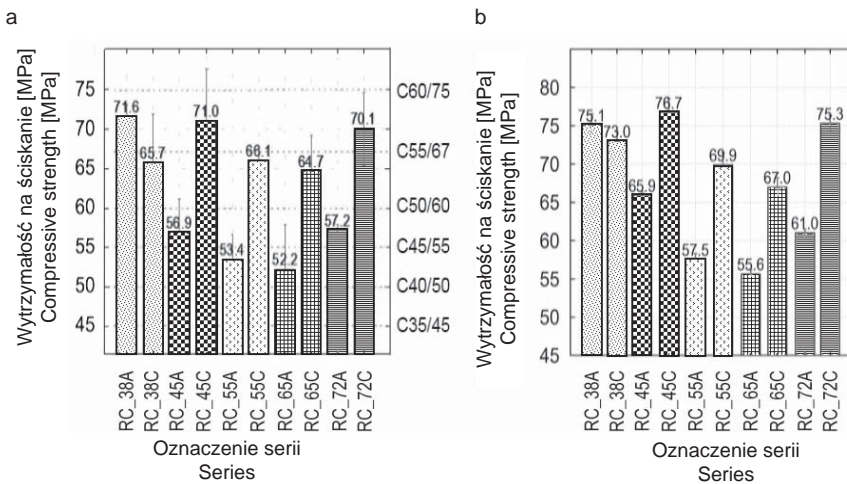
## WYNIKI I ICH OMÓWIENIE

W badaniach mieszanek betonowych określono konsystencję bezpośrednio po zakończeniu mieszania składników i po 60 minutach od momentu wprowadzenia pierwszej porcji wody (woda „na kruszywo”). Przeprowadzono również badania zawartości powietrza. Wyniki zaprezentowano w tabeli 6.

W badaniu wytrzymałości na ściskanie zarówno po 28, jak i po 56 dniach twardnienia betonu (rys. 3a oraz 3b) lepsze efekty uzyskano, stosując kruszywo poddane karbo- natyzacji (serie oznaczone jako RC\_xxC) w miejsce kruszywa niepoddanego modyfikacji (serie RC\_xxA). Jedynie w przypadku serii betonów z kruszywem pochodzącym z najlepszego jakościowo betonu pierwotnego (o współczynniku  $w/c = 0,38$ ) w badaniu stwierdzono mniejszą wartość wytrzymałości betonu z kruszywem nieskarbonatyzowa-

Tabela 6. Wyniki badań konsystencji i zawartości powietrza mieszanek betonu recyklingowego  
Table 6. Results of consistency and air content measurements of fresh recycled aggregate concrete

Oznaczenie serii betonu Designation of concrete series	Czas Vebe początkowy Vebe initial time [s]	Klasa Vebe (początkowa) Vebe class (initial)	Czas Vebe po 60 min Vebe time after 60 min [s]	Klasa Vebe (po 60 min) Vebe class (after 60 min)	Wydłużenie czasu Vebe Vebe time increase [s]	Zawartość powietrza Air content [%]
RC_0.38A	7	V3	21	V1	14	3,8
RC_0.38C	3	V4	13	V2	10	2,4
RC_0.45A	4	V4	26	V1	22	2,6
RC_0.45C	3	V4	15	V2	12	2,6
RC_0.55A	5,5	V3/V4	25,5	V1	20	2,9
RC_0.55C	4	V4	22	V1	18	2,8
RC_0.65A	5	V4	28	V1	23	3,1
RC_0.65C	3,5	V4	20	V2	16,5	3,6
RC_0.72A	11	V2	25	V1	14	3,1
RC_0.72C	3	V4	17	V2	14	3,4



Rys. 3. Wyniki badań wytrzymałości na ściskanie betonu recyklingowego: a – po 28 dniach twardnienia, b – po 56 dniach twardnienia (pionowe słupki oznaczają 95% poziom ufności)

Fig. 3. Results of compressive strength examination for recycled concrete: a – after 28 days of hardening, b – after 56 days of hardening (vertical lines present 95% confidence level)

nym, przy czym analiza statystyczna nie wykazała istotnego zróżnicowania pomiędzy seriami stanowiącymi parę RC\_0.38 (wersja RC\_0.38A z kruszywem niemodyfikowanym i RC\_0.38C z kruszywem poddanym karbonatyzacji).

W tabeli 7 przedstawiono porównanie rezultatów wytrzymałości 28-dniowej z wynikami uzyskanymi przez innych autorów dla betonu zwykłego o podobnym składzie. W tabeli tej podano najważniejsze dane dotyczące receptury betonu. Kursywą zaznaczono przypadki, w których wytrzymałość betonu zwykłego okazała się nie mniejsza niż wytrzymałość betonu recyklingowego z prezentowanych w niniejszym artykule badań.

Tabela 7. Porównanie wyników wytrzymałości na ściskanie uzyskanych w badaniach z wynikami innych autorów dla betonu zwykłego o podobnym składzie

Table 7. Comparison of compressive strength results obtained in experiment to those presented by other authors for ordinary concrete with similar concrete mix composition

Oznaczenie serii lub źródło* Designation of series or source *	Typ cementu Cement type	Zawartość cementu Cement quantity [kg·m <sup>-3</sup> ]	Współczynnik w/c Water-cement ratio [-]	Wytrzymałość na ściskanie** Compressive strength** [MPa]	Wytrzymałość względna*** Relative compressive strength*** [%]
RC_0.38A/_0.38C	CEM I 42,5	404	0,4	71,6/65,7	–
RC_0.45 A/_0.45C	CEM I 42,5	404	0,4	56,9/71,0	–
RC_0.55 A/_0.55C	CEM I 42,5	404	0,4	53,4/66,1	–
RC_0.65 A/_0.65C	CEM I 42,5	404	0,4	52,2/64,7	–
RC_0.72 A/_0.72C	CEM I 42,5	404	0,4	57,2/70,1	–
Wartości średnie Mean values	CEM I 42,5	404	0,4	58,3(54,9)/67,5	100
Abosrra i in. [2011]	PC	415	0,45	45	77(82)/67
Atiş i in. [2005]****	OPC	400	0,40	61,1 (dry) 65,3 (wet)	105(112)/90 112(119)/97
Hariharan i in. [2013]	OPC	400	0,40	50	86(91)/74
Chang i in. [2005]	LSPC*****	425	0,40	53,8 57,9	92(98)/80 99(105)/86
Memon i in. [2002]	OPC	425	0,40	55	94(100)/81
Liu i in. [2012]	CEM I 42,5	420	0,35	49,7	85(90)/74

\*Źródła podano dla wyników uzyskanych przez innych autorów.

\*Sources are given for results presented by other authors.

\*\*W nawiasie podano średnią obliczoną z wyłączeniem odstającej wartości wytrzymałości (wynik z serii RC\_0.38A) dla betonu z kruszywa niemodyfikowanego.

\*\*In parenthesis mean value calculated for all series with modified recycled aggregate (except for outliers RC\_0.38A) is given.

\*\*\*Wartości odniesione do średniej wytrzymałości betonu uzyskanej w badaniach dla wszystkich serii z kruszywem niemodyfikowanym – pierwsza oraz druga wartość (druga w nawiasie, zgodnie z zasadą w opisie przedstawionym w \*\*) i poddanej karbonatyzacji – trzecia wartość.

\*\*\*The values are given in relation to mean value calculated for all examined series with unmodified aggregate – first and second value (second in parenthesis is according to \*\*) and carbonated aggregate – third value.

\*\*\*\*Podano sposób pielęgnacji próbek: dry – sucha, wet – mokra.

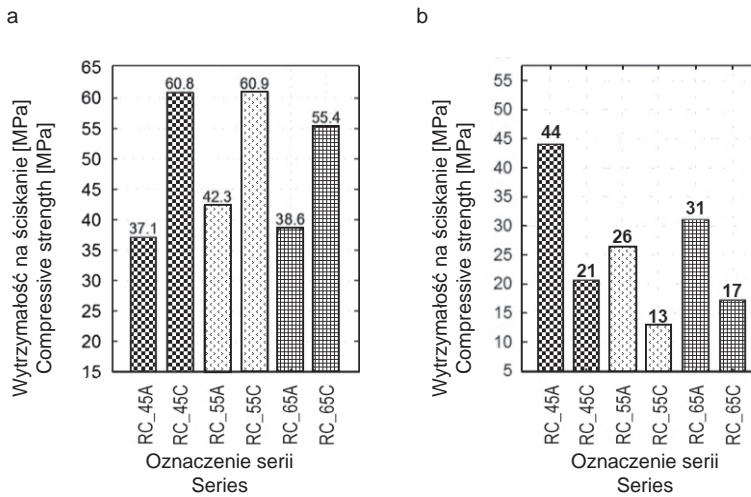
\*\*\*\*Way of concrete curing is presented (dry or wet).

\*\*\*\*\*Cement o skompensowanym skurczu.

\*\*\*\*\*Low Shrinkage Portland Cement.

Wytrzymałość na ściskanie betonu recyklingowego po 34 cyklach zamrażania-odmrażania przedstawiono na rysunku 4a. Na rysunku 4b zaprezentowano stopień utraty wytrzymałości w odniesieniu do wyników uzyskanych po 56 dniach twardnienia betonu (wyniki z rysunku 3b).

Beton recyklingowy, przygotowany zgodnie z procedurą dwuetapowego dozowania wody, osiągnął wytrzymałość zbliżoną do wytrzymałości betonów zwykłych z podobnym rodzajem i zawartością cementu w składzie. Wyniki dla serii, w których zastosowano kruszywo recyklingowe poddane przyspieszonej karbonatyzacji (mającej symulować



Rys. 4. Wyniki badań betonu recyklingowego po przeprowadzeniu testu mrozoodporności: a – wytrzymałość na ściskanie po 34 cyklach zamrażania-odmrażania, b – utrata wytrzymałości na ściskanie po 34 cyklach zamrażania-odmrażania (wartości odniesione do wytrzymałości 56-dniowej)

Fig. 4. Results of examinations of recycled aggregate concrete after 34 freeze-thaw cycles: a – compressive strength, b – loss of strength (values related to 56-day compressive strength)

karbonatyzację w warunkach naturalnych), w zasadzie nie różniły się od wspomnianych wyników dla betonu zwykłego. Karbonatyzacja kruszywa recyklingowego okazała się więc skutecznym sposobem uzyskania jeszcze lepszego betonu z recyklingu. Przyczyniła się ona do uzyskania betonu o wytrzymałości o 16–23% większej w porównaniu z wytrzymałością betonu z kruszywa niemodyfikowanego. Niewątpliwie wpływ na ten wynik miała lepsza retencja wody wewnątrz ziaren recyklingowych poddanych modyfikacji, co nie miało miejsca w ziarnach niemodyfikowanych. Ich obecność w składzie betonu przyczyniała się do występowania efektu wysysania wody z zaczynu przez kruszywo niemodyfikowane.

Wpływ modyfikacji kruszywa na mrozoodporność betonu recyklingowego okazał się również istotny. Utrata wytrzymałości betonu recyklingowego po przeprowadzeniu 34 cykli zamrażania-odmrażania zawierała się w przedziale 13–21% dla serii z kruszywem poddanych karbonatyzacji, natomiast dla serii z kruszywem niemodyfikowanym wynosiła 26% – do nawet 44%.

Wyniki badań umożliwiają spojrzeć z optymizmem na wykorzystanie kruszyw z recyklingu w betonach, nawet pomimo dużego ich udziału (75%) w objętościowym składzie wszystkich kruszyw. Dotyczy to oczywiście kruszyw, które spełniają wymagania jakościowe zalecane m.in. przez wytyczne RILEM oraz odpowiednie normy krajowe i europejskie.

## PODSUMOWANIE

Dzięki zastosowaniu dobrej jakości kruszywa recyklingowego oraz przyjęciu odpowiedniego reżimu technologicznego, zakładającego dokładne określenie nasiąkliwości kruszywa recyklingowego oraz użycie metody dwuetapowego dozowania wody, możliwe jest uzyskanie betonu jakościowo niewiele różniącego się od betonu zwykłego. Wyniki badań wytrzymałości na ściskanie betonu recyklingowego w świetle rezultatów osiągniętych przez innych autorów dla betonu zwykłego o zbliżonej zawartości cementu i podobnej wartości współczynnika  $w/c$  (0,40) wskazują na możliwość osiągnięcia podobnych klas wytrzymałości, pomimo dużego udziału objętościowego (75%) w kruszywie frakcji piaskowych (1/2 mm) i żwirowych (2/16 mm) z recyklingu. Dodatkowy, korzystny wpływ na wytrzymałość betonu ma zastosowanie kruszywa recyklingowego poddane karbonatyzacji. Mrozoodporność betonu recyklingowego, zawierającego w składzie kruszywo poddane karbonatyzacji, również może być wyższa od mrozoodporności betonu z kruszywem niemodyfikowanym.

Wyniki badań wskazują na zasadność ich kontynuacji w ramach koncepcji zakładającej wykorzystanie betonowego kruszywa z recyklingu do sekwestracji atmosferycznego ditlenku węgla. Istotną przesłanką jest w tym przypadku fakt, że można w ten sposób osiągnąć nie tylko zadowalające efekty proekologiczne, ale również technologiczne. Stwarza to korzystną perspektywę wobec wymagań Dyrektywy 2008/98/WE [UE 2008], dotyczących osiągnięcia w 2020 roku co najmniej 70-procentowego stopnia recyklingu odpadów budowlanych w krajach UE.

## PIŚMIENNICTWO

- Abosra L., Ashour A.F., Youseffi M., 2011. Corrosion of steel reinforcement in concrete of different compressive strengths. *Construction and Building Materials* 25(10), 3915–3925.
- Ajdukiewicz A., Kliszczewicz A., 2009. Recykling betonu konstrukcyjnego. *Inżynier Budownictwa*, 2.
- Atiş C.D., Özcan F., Kilic A., Karahan O., Bilim C., Severcan M.H., 2005. Influence of dry and wet curing conditions on compressive strength of silica fume concrete. *Building and Environment* 40(12), 1678–1683.
- Beton według normy PN-EN 206-1 – Komentarz, 2004. Pod kier. Lecha Czarneckiego. Polski Cement, Kraków.
- BS 8500-2:2006 + A1:2012. Concrete. Complementary British Standard to BS EN 206-1. Specification for constituent materials and concrete.
- Chang Z.T., Song X.J., Munn R., Marosszeky M., 2005. Using limestone aggregates and different cements for enhancing resistance of concrete to sulphuric acid attack. *Cement and Concrete Research* 35(8), 1486–1494.
- Damineli B.L., Kemeid F.M., Aguiar P.S., John V.M., 2010. Measuring the eco-efficiency of cement use. *Cement and Concrete Composites* 32(8), 555–562.
- Deja J., Uliasz-Bochenczyk A., Mokrzycki E., 2010. CO<sub>2</sub> emissions from polish cement industry. *International Journal of Greenhouse Gas Control* 4(4), 583–588.
- DIN 4226-100:2002-02. Gesteinskörnungen für Beton und Mörtel – Teil 100: Rezyklierte Gesteinskörnungen.
- Hariharan A.R., Santhi A.S., Mohan Ganesh G., 2013. Statistical Correlation to Predict the Compressive Strength of Binary and Ternary Blended Concretes. *November Research Journal of Recent Sciences* 2(11), 20–28.

- Haselbach L.M., Ma S., 2008. Potential for carbon adsorption on concrete: Surface XPS analyses. *Environmental Science and Technology* 42(14), 5329–5334.
- Kou S.C., Zhan B.J., Poon C.S., 2014. Use of CO<sub>2</sub> curing step to improve the properties of concrete prepared with recycled aggregates. *Cement and Concrete Composites* 45, 22–28.
- Lagerblad B., 2005. Carbon dioxide uptake during concrete life cycle—State of the art. Swedish Cement and Concrete Research Institute, CBI, Sztokholm.
- Liu F., Chen G., Li L., Guo Y., 2012. Study of impact performance of rubber reinforced concrete. *Construction and Building Materials* 36, 604–616.
- Memon A.H., Radin S.S., Zain M.F. M., Trottier J.F. 2002. Effects of mineral and chemical admixtures on high-strength concrete in seawater. *Cement and Concrete Research* 32(3), 373–377.
- Pade C., Guimaraes M., Kjellsen K., Nilsson A., 2007. The CO<sub>2</sub> uptake of concrete in the perspective of life cycle inventory. *International Symposium on Sustainability in the Cement and Concrete Industry*. Lillehammer, Norway.
- PN-EN 206-1:2003. Beton – Część 1: Wymagania, właściwości, produkcja i zgodność.
- PN-EN 1097-6:2002. Badania mechanicznych i fizycznych właściwości kruszyw – Część 6: Oznaczanie gęstości ziarn i nasiakliwości.
- Ściślewski Z., 1999. *Ochrona konstrukcji żelbetowych*. Wydawnictwo Arkady, Warszawa.
- Tam V.W., Gao X.F., Tam C.M., 2005. Microstructural analysis of recycled aggregate concrete produced from two-stage mixing approach. *Cement and Concrete Research* 35(6), 1195–1203.
- UE, 2008. Dyrektywa 2008/98/WE z dnia 19 listopada 2008 r. w sprawie odpadów (<http://eur-lex.europa.eu/legal-content/PL/TXT/PDF/?uri=CELEX:32008L0098&rid=2>; dostęp: 24.01.2014).
- WBCSD, 2009. Cement technology roadmap 2009. Carbon emissions reduction up to 2050. IEA/WBCSD.
- Wolska-Kotańska Cz. 2005. Właściwości i zastosowanie kruszywa z recyklingu betonu. *Magazyn Autostrady* 3, 18–20.
- Zhu Y.G., Kou S.C., Poon C.S., Dai J.G., Li Q.Y., 2013. Influence of silane-based water repellent on the durability properties of recycled aggregate concrete. *Cement and Concrete Composites* 35(1), 32–38.

## STRENGTH OF CONCRETE WITH HIGH QUANTITY OF RECYCLED CONCRETE AGGREGATE

**Abstract.** The paper presents results of compressive strength examination and loss of compressive strength after 34 freezing-thawing cycles for concrete with 75% volumetric quantity of recycled concrete aggregate in whole aggregate composition. Recycled aggregate was prepared by crushing of parent concrete produced earlier in a laboratory. Results show that high quality of recycled concrete comparable to the quality of similar concretes made from natural aggregate can be achieved. However, better results are obtained when carbonated aggregate is used. Final compressive strength of concrete with such type of aggregate was higher at the level of 16–23% comparing to series with unmodified recycled aggregate. Freeze-thaw resistance, expressed as the compressive strength loss, was also better in series of concrete with carbonated aggregate. That type of concrete showed only 13–21% loss in compressive strength in contrast to 26–44% obtained for series with unmodified concrete aggregate.

**Key words:** recycled aggregate concrete, recycled concrete aggregate, compressive strength, freeze-thaw resistance, carbonation