

Sequestrational carbonation of recycled aggregate – the path to circularity and improved concrete quality

Karbonatyzacja sekwestracyjna kruszywa z recyklingu – droga do cyrkularności i lepszej jakości betonu

DOI: 10.15199/33.2025.05.03

Abstract: For about a decade, the carbonation of concrete has been viewed as a way to enable the sequestration of carbon dioxide, previously emitted in cement production processes. CO₂ sequestration can be intensified by subjecting recycled aggregate to carbonation. The use of such aggregate in the realization of warm foundation slabs, which are a solution in passive and zero-energy houses, contributes not only to one of the principles of sustainable construction, which is the circularity of building materials, but also to the improvement of the properties of concrete, such as obtaining greater strength comparing to the use of aggregate not subjected to carbonation. The study shows that the strength increased by an average of about 16% and was comparable to that of concrete with natural aggregate. At the same time, the concrete's water absorption decreased (13 to as much as 30%) as well as the degree of strength loss in the frost resistance test.

Keywords: sustainable construction; insulated foundation slab; recycled aggregate concrete; concrete carbonation.

The increase in global average temperature observed in recent years is an undeniable fact, confirming the dynamic changes in the Earth's climate. It is associated with an increase in the concentration of carbon dioxide in the atmosphere [1], which is largely contributed to by the production of cement and concrete. Human activity in the construction industry results in approx. 37% of global CO₂ emissions [2], of which essentially only 11% is embodied carbon emission [3].

The further development of civilization, leading to an increase in living standards, is accompanied by a growing problem in the relationship between humankind and the environment. It is therefore not surprising that today the first challenge of the construction industry is to reduce anthropoppression no longer only by reducing waste, but also by finding solutions aimed at lowering the carbon footprint at each stage of the construction life cycle. In the case of Poland, with as much as 666 kg of CO₂ emissions required to produce 1 MWh of energy [4] compared to the EU average of 251 kg CO₂/MWh, actions focused on reducing energy consumption during the operation of buildings will be very important.

Streszczenie: Od prawie dekady karbonatyzację betonu postrzega się jako sposób umożliwiający sekwestrację dwutlenku węgla, wyemitowanego wcześniej w procesach produkcji cementu. Sekwestrację CO₂ można zintensyfikować, poddając karbonatyzacji kruszywo z recyklingu. Zastosowanie takiego kruszywa w realizacji ciepłych płyt fundamentowych, stanowiących rozwiązanie w domach pasywnych i zeroenergetycznych, przyczynia się nie tylko do realizacji jednego z założeń budownictwa zrównoważonego, jakim jest cyrkularność materiałów budowlanych, ale również do poprawy właściwości betonu, m.in. uzyskania większej wytrzymałości niż w przypadku zastosowania kruszywa niepoddanego karbonatyzacji. Z przeprowadzonych badań wynika, że wytrzymałość zwiększyła się średnio ok. 16% i była porównywalna z wytrzymałością betonu z kruszywem naturalnym. Jednocześnie zmniejszeniu uległa nasiąkliwość betonu (13 do nawet 30%) oraz stopień utraty wytrzymałości w badaniu mrozoodporności.

Słowa kluczowe: budownictwo zrównoważone; ciepła płyta fundamentowa; beton recyklingowy; karbonatyzacja betonu.

Zwiększenie średniej globalnej temperatury obserwowane w ostatnich latach jest niezaprzeczalnym faktem, potwierdzającym dynamiczne zmiany klimatu Ziemi. Wiąże się je ze wzrostem stężenia dwutlenku węgla w atmosferze [1], do którego w znacznym stopniu przyczynia się produkcja cementu i betonu. Efektem aktywności człowieka w przemyśle budowlanym jest ok. 37% globalnej emisji CO₂ [2], z czego w zasadzie tylko 11% stanowi emisja wbudowana [3].

Dalszemu rozwojowi cywilizacji, prowadzącemu do wzrostu standardu życia, towarzyszy coraz większy problem w relacji między człowiekiem a środowiskiem naturalnym. Nie dziwi więc, że obecnie pierwszym wyzwaniem budownictwa staje się ograniczanie antropopresji już nie tylko przez zmniejszanie ilości odpadów, ale też poszukiwanie sposobów na zmniejszanie śladu węglowego na każdym etapie cyklu życia. W przypadku naszego kraju, ze względu na wynoszącą aż 666 kg emisję CO₂ niezbędną dla uzyskania 1 MWh energii [4] wobec średniej 251 kg CO₂/MWh w UE, bardzo istotne będą działania skoncentrowane na zmniejszaniu zużycia energii podczas użytkowania budynków.

Niezależnie od uzasadnienia klimatycznego, rozwój budownictwa w dalszych dekadach XXI wieku powinien być realizowany w sposób przyjazny dla środowiska naturalnego, a mó-

¹⁾ Uniwersytet im. Adama Mickiewicza w Poznaniu, Wydział Nauk Geograficznych i Geologicznych; daniel.zawal@amu.edu.pl

Regardless of the climate-related motivation, construction development in the next decades of the 21st century should be carried out in an environmentally friendly manner, and more widely, in a sustainable manner, that is, by promoting not only the minimization of anthropopression, but also other issues identified by the UN in 2003 [5] and increasingly emphasized in later years [6]. By definition, sustainable development refers to the three dimensions of the human living environment, i.e. the relationship with nature and the economy and the social dimension. Thus, it is not only focused on attention to nature, but also on human well-being in the wide sense. In the construction industry, such perceived development should be realized not only by reducing greenhouse gas emissions and conserving natural resources, but also by, among other things, conserving water, emphasizing circularity, reducing building maintenance costs and increasing the comfort of the building and its surrounding for users. The concept of the passive house, proposed by the Passivhaus Institut in the late 20th century, can undoubtedly be considered as the beginning of the sustainable approach in construction. The requirement for passive houses is not to exceed a specific annual energy consumption of 15 kWh/m²/yr. One of the measures to achieve this effect is the elimination of thermal bridges in the structure.

Foundation slab as a circular element

Thermal bridge problem can be solved by using insulated foundation slab. In addition to the beneficial distribution of loads and reduction of settlement [7], this approach has been proposed as an antidote to the observed increase of ground freezing depths in Poland [8]. However, an additional advantage of foundation slabs, which is to maximize the degree of circularity of the product, is poorly emphasized in the literature. With regard to concrete, this can be realized in two ways – by reusing and recycling, which means:

- direct reusing of concrete elements in other applications;
- foundation slab recycling and using obtained material in new concrete.

Regarding the first option, the concept of “Piecewise Reuse of Extracted Concrete in new Structures” (PRECS), which involves demounting and then reusing concrete elements in other structures, is discussed [9]. 77 cases from Europe and the US from 1967–2002 were analyzed, and seven of the most advanced initiatives were identified, such as in the Swedish “Udden” project. 1850 tons of precast elements from two demolished structures in Finspång were cut and installed in a new residential building in Linköping, 64 km away. In addition, for more than a dozen other examples, an estimated reduction in CO₂ emissions (versus if a new element had been produced in place of the reusing) of 46% to as much as 90% is given. Use of elements in non-structural elements, for example in the protection of flood embankment slopes, is also indicated.

The second approach assumes recycling of concrete, or even multi-recycling (recycled concrete that has been made with previously recycled concrete). According to [10], multi-

wiąć szerzej – w sposób zrównoważony, czyli promujący nie tylko minimalizację antropopresji, ale również inne aspekty wskazane przez ONZ w 2003 r. [5] i coraz częściej podkreślane w późniejszych latach [6]. Z definicji, zrównoważony rozwój odnosi się do trzech wymiarów środowiska życia człowieka, tj. relacji z przyrodą i ekonomią oraz wymiarem społecznym. Nie jest zatem skupiony jedynie na trosce o przyrodę, ale również o szeroko pojęty dobrostan człowieka. W budownictwie tak postrzegany rozwój powinien być realizowany nie tylko przez ograniczanie emisji gazów cieplarnianych i ochronę zasobów naturalnych, ale również m.in. oszczędność wody, nacisk na gospodarkę cyrkularną, zmniejszenie kosztów utrzymania budynków i zwiększanie komfortu ich użytkowania oraz otoczenia dla użytkowników. Za początek podejścia zrównoważonego w budownictwie można niewątpliwie uznać koncepcję domu pasywnego zaproponowaną przez Passivhaus Institut pod koniec XX wieku. Wymaganiem dla domów pasywnych jest nieprzekroczenie jednostkowego rocznego zużycia energii na poziomie 15 kWh/m²/r. Jednym z działań zmierzających do osiągnięcia tego efektu jest eliminacja występowania mostków termicznych w konstrukcji.

Płyta fundamentowa jako element cyrkularny

Rozwiązaniem problemu mostków termicznych jest zastosowanie ciepłej płyty fundamentowej. Poza korzystnym rozłożeniem obciążeń i zmniejszeniem osiadania [7], stosowanie tego rozwiązania jest proponowane jako antidotum na obserwowane zwiększanie się głębokości przemarzania gruntów na terenie Polski [8]. W literaturze słabo akcentuje się jednak dodatkową zaletę płyt fundamentowych, którą jest maksymalizacja stopnia cyrkularności produktu. W odniesieniu do betonu można to zrealizować na dwa sposoby – przez reusing i recykling, co oznacza:

- ponowne wykorzystanie betonu w innych elementach;
- poddanie płyty fundamentowej recyklingowi i wykorzystanie uzyskanego materiału w nowym betonie.

W odniesieniu do pierwszej ścieżki dyskutuje się [9] koncepcję „Piecewise Reuse of Extracted Concrete in new Structures” (PRECS), polegającą na demontażu i ponownym wykorzystaniu elementów betonowych w innych konstrukcjach. Analizie poddano 77 przypadków z Europy i USA z lat 1967–2002. Wskazano na 7 najbardziej zaawansowanych inicjatyw, np. w szwedzkim projekcie „Udden” 1850 ton elementów prefabrykowanych z dwóch rozebranych konstrukcji w miejscowości Finspång pocięto i zamontowano w nowym budynku mieszkalnym w Linköping, oddalonym o 64 km. Ponadto w przypadku kilkunastu innych przykładów podano szacowaną redukcję emisji CO₂ (wobec sytuacji, gdyby w miejsce reusingu wytworzono nowy element) od 46% do nawet 90%. Wskazywane jest też wykorzystywanie elementów w elementach niekonstrukcyjnych, np. w zabezpieczeniu skarp wałów powodziowych.

Drugie ze wskazanych podejść zakłada recykling betonu, a nawet jego multirecykling (poddanie recyklingowi betonu, który został wykonany z użyciem uprzednio recyklingowanego). Badania [10] potwierdzają, że multirecykling (wykonanie betonu z kruszywem recyklingowym pozyskanym z po-

-recycling (making concrete with recycled aggregate from the previous generation of concrete) does not so much deteriorate the strength of the concrete (at least up to 3–4 cycles), but rather predominantly other properties, such as density, modulus of elasticity, water absorption and susceptibility to carbonation. In addition, still the determining factor deciding the quality of recycled aggregate concrete (RAC), primarily the strength, is the quality of the parent concrete from which the recycled aggregate used in the new concrete comes. On this basis, it can be concluded that, at least for foundation slabs, deterioration of the indicated properties does not cause a significant threat in the case of concrete durability from the environment, since they are shielded by insulation or other layers. Examples of the use of recycled concrete in passive houses are presented in [11], while [12] emphasizes that the lower density of RAC, compared to ordinary concrete, contributes to a reduction in the thermal conductivity of concrete.

However, it should be emphasized that if we consider the reduction of CO₂ emissions in the construction industry as the main goal (still not forgetting waste management), concrete recycling cannot take place without subjecting the recycled aggregate to the carbonation process. It fits into the principles of the “5C approach” of the European Cement Association CEMBUREAU, summed up in five words: clinker, cement, concrete, construction & built environment and (re) carbonation [13]. CEMBUREAU estimates that already by 2030, carbonation would lower CO₂ emissions by 71 kg per ton of cement (Figure 1). Surface carbonation can be intensified after crushing concrete due to the fact that the reaction surface between atmospheric CO₂ and cement stone is multiplied. This is one of the paths highlighted in the fifth step of the “5C approach” concept. Moreover, studies indicate that recycled aggregate subjected to carbonation yields better performance of RAC than recycled aggregate used directly or shortly after crushing of parent concrete. The explanation provided for this phenomenon is not only the physical effect of tightening the microstructure of recycled grains by calcium carbonate precipitation, resulting in a reduction in porosity and grain saturation [14], but also due to the effect of calcite on cement hydration, leading to improved tightness at the micro level, highlighted by many research results [15, 16]. It is also worth mentioning that carbonation can occur without water, since the C-S-H phase, can adsorb CO₂ molecules, reacting with them without a dissociation step. On the other hand, a study by Haselbach [17] found that in addition to the carbonation reaction, an additional 5% of CO₂ is bound to the mortar grains by physical adsorption, which is due to the fact that the calcite produced during carbonation, which has a high surface energy of 750–982 erg/cm², forms a complex with CO₂ molecules in the presence of moisture (as adsorbed water) [18].

przedniej generacji betonu) nie tyle pogarsza wytrzymałość betonu (przynajmniej do 3–4 cykli), co przede wszystkim inne właściwości, takie jak gęstość, moduł sprężystości, nasiąkliwość i podatność na karbonatyzację. Ponadto wciąż czynnikiem decydującym o jakości betonu recyklingowego (przede wszystkim wytrzymałości) jest jakość betonu pierwotnego, z którego pochodzi przekrusz użyty w nowym betonie. Można na tej podstawie stwierdzić, że przynajmniej w odniesieniu do płyt fundamentowych, pogorszenie wskazanych właściwości nie powoduje istotnego zagrożenia w przypadku trwałości betonu ze strony środowiska, gdyż są one osłonięte izolacją lub innymi warstwami. Przykłady wykorzystania betonu recyklingowego w domach pasywnych przedstawiono w [11], natomiast w [12] podkreślono, że mniejsza gęstość betonu recyklingowego, w porównaniu z betonem zwykłym, przyczynia się do zmniejszenia przewodności cieplnej betonu.

Należy jednak podkreślić, że jeśli za główny cel uznamy redukcję emisji CO₂ w budownictwie (wciąż nie zapominając o zagospodarowaniu odpadów), recykling betonu nie będzie się mógł odbywać bez poddania procesowi karbonatyzacji uzyskanego kruszywa recyklingowego. Wpisuje się ona w założenia „5C approach” Europejskiego Stowarzyszenia Przemysłu Cementowego CEMBUREAU, zawierającego się w pięciu słowach: klinkier; cement; beton; konstrukcja i (re) karbonatyzacja (clinker, cement, concrete, construction & built environment and (re)carbonation) [13]. CEMBUREAU ocenia, że już do 2030 r. karbonatyzacja pozwoli obniżyć jednostkową emisję CO₂ przypadającą na tonę cementu o 71 kg (rysunek 1). Powierzchniowa karbonatyzacja może zostać zintensyfikowana po skruszeniu betonu dzięki temu, że powierzchnia reakcji atmosferycznego CO₂ z kamieniem cementowym ulega zwielokrotnieniu. Jest to jednym ze sposobów wskazywanym w piątym kroku koncepcji „5C approach”. Co więcej, badania wskazują na to, że kruszywo

recyklingowe poddane karbonatyzacji pozwala uzyskać lepsze parametry betonu recyklingowego niż kruszywo recyklingowe użyte bezpośrednio lub w krótkim czasie po skruszeniu betonu. Uzasadnieniem tego zjawiska jest nie tylko fizyczny efekt doszczelnienia mikrostruktury ziaren recyklingowych przez wytrącenie węglanu wapnia, skutkujący obniżeniem porowatości i nasiąkliwości ziaren [14], ale również wiele wyników badań z wcześniejszych lat, świadczących o wpływie kalcytu na hydratację cementu, prowadzącą do poprawy szczelności również na poziomie mikro [15, 16]. Warto też dodać, że karbonatyzacja może następować bez udziału wody,

gdyż faza C-S-H, adsorbując cząsteczki CO₂, reaguje z nimi z pominięciem etapu dysocjacji. Z kolei w badaniach Haselbach [17] stwierdzono, iż poza reakcją karbonatyzacji dodatkowe 5% CO₂ zostaje związane z ziarnami zaprawy w wyniku adsorpcji fizycznej, co wynika z faktu, że wytworzony podczas karbonatyzacji kalcyt, mający dużą energię powierzchniową o wartości 750–982 erg/cm² tworzy w obecności wilgoci (jako wody zaadsorbowanej) kompleks z cząsteczkami CO₂ [18].

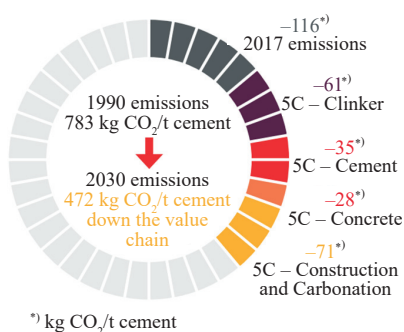


Fig. 1. Limiting emission of CO₂/t of cement according to the “5C approach” [13]

Rys. 1. Ograniczenie emisji CO₂/t cementu wg założeń „5c approach” [13]

Research procedure

The study was divided into 5 stages:

- preparation of parent concrete and its treatment for 60 days;
- crushing the parent concrete and dividing the obtained aggregate into fractions;
- accelerated carbonation of part of the recycled aggregate in the carbonation chamber;
- production of recycled aggregate concrete series;
- testing of the recycled concrete.

The recipes and compressive strengths results of parent concrete are shown in Table 1. It consisted of CEM I 42.5 N-HSR/NA cement and an aggregate composition composed of sand and gravel. Parent concrete was fully crushed into recycled aggregate after 60 days. Five groups of recycled aggregate were prepared and each was divided into three subgroups, labeled as A, C and K. Each of them immediately after crushing was divided into seven fractions of 0/1, 1/2, 2/4, 4/6, 6/8, 8/12 and 12/16 mm. Subgroup A was protected from carbonization, while subgroups C and K were subjected to accelerated carbonization in a chamber with a CO₂ concentration of 7%. The difference between subgroups C and K was due to the average relative humidity of the air in the chamber. For subgroup C it was 55%, and for subgroup K it was about 80% (humidity was controlled with an air dryer). The assumed duration of accelerated carbonation of 6 weeks was intended to simulate an approximate 18-month period of carbonation under natural conditions, as indicated by relation (1):

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

where:

a – the degree of acceleration of the carbonation process,

c_{1,acc} – carbon dioxide concentration in the carbonation chamber [%];

c_{1,env} – carbon dioxide concentration under natural conditions [0.04%]

The grain composition of individual aggregate fractions (natural and recycled) in recycled aggregate concrete was determined using the curve of ideal grain size according to Fuller. The relative proportions of the individual fractions (including smaller fractions) were assumed according to the relation given by Fuller in 1907 [19].

$$P = \left(\frac{d}{D_{max}} \right)^n \quad (2)$$

where:

P – share of aggregate grains including smaller than d (–),

d – maximum grain size of aggregate of a given fraction (mm),

D_{max} – maximum grain size of all aggregate fractions (mm),

n – gradation factor, for which the value of 0.5 (–) was assumed.

In the recycled aggregate concrete, the aggregate of subgroups A, C and K accounted for 75% of the volumetric com-

Procedura badawcza

Badania podzielono na 5 etapów:

- przygotowanie betonu pierwotnego i jego pielęgnacja przez 60 dni;
- skruszenie betonu pierwotnego i podział uzyskanego kruszywa na frakcje;
- przyspieszona karbonatyzacja części kruszywa recyklingowego w komorze karbonatyzacji;
- wykonanie betonu recyklingowego;
- badania betonu recyklingowego.

Receptury i wytrzymałość betonu pierwotnego przedstawiono w tabeli 1. W jego składzie znajdował się cement CEM I 42,5 N-HSR/NA oraz kompozycja kruszyw złożona z piasku i żwiru otoczkowego.

Beton pierwotny po sześćdziesięciu dniach od wykonania poddano w całości przekruszeniu do postaci kruszywa recyklingowego. Przygotowano 5 grup kruszywa z recyklingu i podzielono

każdą na trzy podgrupy, oznaczone symbolami A, C i K. Każda z nich bezpośrednio po kruszeniu została poddana przesianiu na siedem frakcji 0/1, 1/2, 2/4, 4/6, 6/8, 8/12 i 12/16 mm. Podgrupę A zabezpieczono przed karbonatyzacją, natomiast podgrupy C i K poddano przyspieszonej karbonatyzacji w komorze, w której stężenie CO₂ wynosiło 7%. Różnica między podgrupami C i K wynikała ze średniej wilgotności względnej powietrza w komorze. W przypadku podgrupy C wynosiła ona 55%, a podgrupy K ok. 80% (wilgotność kontrolowano za pomocą osuszacza powietrza). Przyjęty czas trwania przyspieszonej karbonatyzacji, wynoszący 6 tygodni, miał symulować ok. osiemnastomiesięczny okres karbonatyzacji w warunkach naturalnych, co wynika z zależności (1):

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

gdzie:

a – stopień przyspieszenia procesu karbonatyzacji,

c_{1,acc} – stężenie dwutlenku węgla w komorze karbonatyzacyjnej [%];

c_{1,env} – stężenie dwutlenku węgla dla warunków naturalnych [0,04%].

Skład ziarnowy poszczególnych frakcji kruszyw (naturalnego i recyklingowego) w betonie recyklingowym ustalono, wykorzystując krzywą idealnego uziarnienia wg Fullera. Względny udział poszczególnych frakcji (wraz z mniejszymi) przyjęto zgodnie z zależnością podaną przez Fullera w 1907 r. [19].

$$P = \left(\frac{d}{D_{max}} \right)^n \quad (2)$$

gdzie:

P – udział ziaren kruszywa wraz z mniejszymi niż d (–),

d – maksymalny wymiar ziaren kruszywa danej frakcji (mm),

D_{max} – maksymalny wymiar ziaren wszystkich frakcji kruszywa (mm),

n – współczynnik gradacji, dla którego przyjęto wartość 0,5 (–).

position. The only fraction of natural aggregate was 0/2 mm sand (Table 2). Table 2 presents the composition of the two reference series (with natural aggregate) and the overall of RAC series. In all RAC series, the amount of mortar was increased (compared to that adopted in the initial formulation) due to the irregular structure of the recycled grains. The amount was 7% higher than in the NAT_A series. In the NAT_B series, an analogous adjustment was applied. An additional ingredient was a plasticizer (4th generation). Supplementary information on the composition of the mixtures, i.e. the amount of excess water, resulting from water absorption of all groups and subgroups of recycled concrete aggregate, is presented in Table 3. Water absorption, as well as the estimation of the density of recycled aggregate, was determined in accordance with PN-EN 1097-6:2002 [20]. The determined density was found to be 2.22– 2.34 kg/dm³.

The ingredients of each RAC series were mixed using the Two Stage Mixing Approach (TSMA) [21–24]. Half the amount of formulation water, along with the excess water (resulting from the absorbability of the recycled aggregate), was mixed for 1 min with the aggregate only, and then for 10 min, stopping the mixer and protecting aggregate from water evaporation. The remaining water and superplasticizer were applied after adding cement. The exceptions to this rule were the reference series (NAT_A and NAT_B), composed only of natural aggregate (with a grain size analogous to the composition of RAC series). It has been proven [25] that the use of the traditional method of mixing ingredients of RAC results in the presence of a large number of portlandite crystals in the ITZ (interfacial transition zone between cement paste and aggregate), while TSMA method reduces both the size and the number of portlandite crystals in this zone [24]. Testing of the mixtures

W betonie recyklingowym kruszywo podgrup A, C i K stanowiło 75% składu objętościowego. Jediną frakcją kruszywa naturalnego był piasek 0/2 mm (tabela 2). W tabeli 2 podano skład dwóch serii referencyjnych (z kruszywem naturalnym) i ogólny recyklingowych. W betonach recyklingowych zastosowano zasadę zwiększenia ilości zaczynu (w stosunku do przyjętej w wyjściowej recepturze, co wynika z nieregularnej struktury ziaren recyklingowych. Ilość ta była o 7% większa niż w serii NAT_A. W serii NAT_B zastosowano analogiczną zmianę. Dodatkowym składnikiem był upłynniacz (superplastyfikator IV generacji). Uzupełnienie informacji o składzie mieszanek, tj. ilości wody nadmiarowej, wynikającej z nasiąkliwości wszystkich grup i podgrup kruszywa recyklingowego, przedstawiono w tabeli 3. Nasiąkliwość, jak również oszacowanie gęstości kruszywa recyklingowego, określono zgodnie z normą PN-EN 1097-6:2002 [20]. Oznaczona gęstość wynosiła 2,22– 2,34 kg/dm³.

Składniki każdej z serii recyklingowych mieszano z zastosowaniem metody dwukrotnego dozowania wody (ang. TSMA – Two Stage Mixing Approach) [21–24]. Połowę ilości wody recepturowej wraz z wodą nadmiarową (wynikającą z nasiąkliwości kruszywa recyklingowego) mieszano przez 1 min tylko z kruszywem, a następnie na 10 min, zatrzymując mieszarkę i kruszywo przed odparowaniem wody. Pozostałą ilość wody i upłynniacz aplikowano po dodaniu cementu. Wyjątkiem od tej zasady były serie referencyjne (NAT_A i NAT_B), złożone tylko z kruszywa naturalnego (o uziarnieniu analogicznym do składu betonów recyklingowych). Udowodniono [25], że zastosowanie tradycyjnej metody mieszania składników w betonie recyklingowym skutkuje obecnością dużej liczby kryształów portlandytu w strefie kontaktowej kruszywo-zaczyn, podczas gdy metoda TSMA redukuje zarówno wielkość, jak i liczbę portlandytu w tej strefie [24], a badania mieszanek objęły okre-

Table 2. Receipt of recycled aggregate concrete and reference concrete [kg/m³]

Tabela 2. Receptury betonu recyklingowego i referencyjnego [kg/m³]

Ingredient	NAT_A	NAT_B	RC_xxY
CEM I 42,5 R	384	404	404
Water	154	162	162
Additional water	–	–	Tab. 3
Superplasticizer	1.93 (0.5%)	1.62 (0.4%)	2.02 (0.5%)
Aggregate (total):	1915	1879	1693
– Sand 0/2 mm (natural)	478	469	469
– Gravel 1/16 mm (total):	natural 1437	natural 1410	RCA 1224
1/2 mm	198	194	168
2/4 mm	281	276	240
4/6 mm	215	210	182
6/8 mm	181	177	154
8/12 mm	305	300	260
12/16 mm	257	253	220

Table 3. Water absorption of recycled concrete aggregate and additional water content

Tabela 3. Nasiąkliwość kruszywa recyklingowego i wynikająca z niej zawartość wody ponadrecepturowej

w/c of parent concrete [–]	Modification method [–]	Water absorption of RCA [%]	Designation of series with RCA [–]	Additional water content [kg/m ³]
0.38	A	2.74	RC_38A	35.4
	C	2.31	RC_38C	29.8
0.45	A	3.48	RC_45A	45.0
	C	2.20	RC_45C	28.4
0.55	K	2.88	RC_45K	37.2
	A	4.11	RC_55A	53.1
0.65	C	2.74	RC_55C	35.4
	K	3.12	RC_55K	40.3
0.72	A	4.00	RC_65A	51.7
	C	2.95	RC_65C	38.1
0.72	K	3.33	RC_65K	43.0
	A	3.40	RC_72A	43.9
	C	3.00	RC_72C	38.8

included the determination of slump and air content. Tests on hardened concrete included:

- compressive strength after 28 and 56 days; 5 and 8 samples within each series were tested, respectively;
- strength loss due to cycles of freezing and thawing in water – 34 cycles were carried out, and the end of the test was considered to be the observation of the first cracks in the weakest series of concrete; a test of selected series was carried out on three concrete samples (two samples were tested from the series in which the first damage was observed);
- saturation and sorption after 24 hours conducted on five cylindrical samples with a diameter of 100 mm and a height of 50 mm.

The strength tests were carried out on 100×100×100 mm specimens, but the final results were converted to the strength of 150×150×150 mm specimens, using the conversion factor of 0.9. The tests of compressive strength after 56 days and soaking and sorption after 24 h were subjected to ANOVA (analysis of variance). Due to the small number of repetitions, it was not implemented for strength loss tests after freeze-thaw cycles.

Results and analysis

The properties of the fresh concrete and the results of the compressive strength of the hardened concrete tested after 28 and 60 days as well as its water absorption (tested at 75 and 105°C on 56-day samples) are shown in Table 4 (result with standard deviation). With the increase of w/c ratio, there was a deterioration of the properties of the series. As a result, a difference between the extreme series was observed during crushing – in the series with lower w/c, the presence of mortar on natural grains was more noticeable. The results of compressive strength of RAC and reference series after 28 days of curing (along with the values of standard deviations) are shown in Table 5, while after 56 days in Figure 2 (vertical dashes indicate the values obtained for NAT reference series).

The results indicate that in almost all groups of RAC (according to the w/c criterion of parent concrete), the carbonation of divided into fraction recycled concrete aggregate contributed to an improvement in the compressive strength of RAC. Moreover, the compressive

ślenie opadu stożka i zawartości powietrza. Badania betonu stwardniałego dotyczyły:

- wytrzymałości na ściskanie po 28 i 56 dniach; zbadano 5 i 8 próbek w obrębie każdej serii;
- utraty wytrzymałości w wyniku naprzemiennych cykli zamrażania i rozmrażania metodą klasyczną (w wodzie) – przeprowadzono 34 cykle, a za koniec badania uznano zaobserwowanie pierwszych spękań w najsłabszej serii betonu; przeprowadzono badanie wybranych serii na trzech próbkach betonu (z serii, w której zaobserwowano pierwsze uszkodzenie, zbadano dwie próbki);
- nasiąkliwości i sorpcji po 24 h przeprowadzonej na pięciu próbkach walcowych o średnicy 100 mm i wysokości 5 cm.

Badania wytrzymałości przeprowadzono na próbkach o wymiarach 100×100×100 mm, ale końcowe wyniki przeliczono na wytrzymałość próbek 150×150×150 mm, stosując standardową w tej sytuacji wartość przelicznika 0,9. Badania wytrzymałości na ściskanie po 56 dniach oraz nasiąkliwości i sorpcji po 24 h poddano analizie wariancji. Ze względu na małą liczbę powtórzeń nie zrealizowano jej w przypadku badań utraty wytrzymałości po cyklach zamrażania i rozmrażania.

Wyniki i analiza

Właściwości mieszanki betonowej oraz wyniki wytrzymałości na ściskanie betonu stwardniałego zbadanej po 28 i 60 dniach i jego nasiąkliwości (zbadanej w temperaturze 75 i 105°C na próbkach 56-dniowych) przedstawiono w tabeli 4 (wynik wraz z odchyleniem standardowym). Wraz ze wzrostem współczynnika w/c następowało pogorszenie właściwości danej serii. W efekcie podczas kruszenia zaobserwowano różnicę między skrajnymi seriami – w seriach o mniejszym w/c bardziej zauważalna była obecność zaprawy na ziarnach

naturalnych. Wyniki wytrzymałości na ściskanie po 28 dniach dojrzewania (wraz z wartościami odchylen standardowych) przedstawiono w tabeli 5, natomiast po 56 dniach na rysunku 2 (pionowymi kreskami zaznaczono wartości uzyskane w przypadku serii referencyjnych NAT). Wyniki wskazują, że prawie we wszystkich grupach betonu recyklingowego (wg kryterium w/c betonu pierwotnego) poddanie karbona-

Table 4. Fresh and hardened properties of parent concrete

Tabela 4. Właściwości mieszanek i betonów pierwotnych

Series	Fresh concrete		Hardened concrete			
	Slump [mm]	Air content [%]	Compressive strength		Water absorption	
			28-d [MPa]	60-d [MPa]	t = 75°C [%]	t = 105°C [%]
P_38	40	1.1	73.3±1.6	77.0±2.8	2.8±0.1	4.0±0.1
P_45	25	2.6	55.3±2.0	61.8±2.6	3.8±0.1	4.6±0.2
P_55	5	2.4	40.5±1.6	45.2±2.0	4.5±0.1	5.4±0.1
P_65	3	2.6	33.1±1.6	36.8±2.0	4.9±0.2	5.5±0.2
P_72	0	2.0	28.8±2.1	31.1±2.2	4.5±0.1	5.1±0.1

Table 5. Results of 28-d compressive strength of concrete [MPa]

Tabela 5. Wyniki 28-dniowej wytrzymałości na ściskanie betonu [MPa]

Group	NAT_A	NAT_B	RC_38	RC_45	RC_55	RC_65	RC_72
NAT	62.3±1.5	56.1±1.9					
A			71.6±1.1	56.9±3.0	53.4±2.3	52.2±3.9	57.2±0.5
C			65.7±4.4	71.0±4.6	66.1±1.0	64.7±3.1	70.1±3.2
K				65.8±0.4	65.9±1.2	59.4±1.6	

strength of RAC was found to be lower than that of reference concrete in only a few cases (NAT_A series). This observation was valid for the series with recycled aggregate not subjected to carbonation (A), and the exception to this rule was the RC_65K series. In addition, it was found that as the w/c of the parent concrete decreased, the strength of concrete deteriorated. The exception is the series with recycled aggregate extracted from the weakest P_72 concrete, which can be explained by the poor quality of the mortar in the parent concrete, removed in the largest amount (compared to other series) in the crushing process.

Figure 3 shows the results of compressive strength results of selected concrete series after 34 cycles of freezing and thawing, along with a comparison with the result of concrete strength after 56 days of hardening shown in Figure 2. The loss of strength in relation to the results of untested series was noticeably greater for RAC with non-carbonated aggregate (A) – by about 1.7–2.1 times compared to the series with carbonated aggregate (C). The

tyzacji rozfrakcjonowanego przekruszu betonowego przyczyniło się do poprawy wytrzymałości na ściskanie betonu. Co więcej, wytrzymałość na ściskanie betonu recyklingowego jedynie w kilku przypadkach okazała się mniejsza od wytrzymałości betonu zwykłego (seria NAT_A). Dotyczyło to serii z kruszywem recyklingowym niepoddanym karbonatyzacji, a wyjątkiem od tej reguły była seria RC_65K. Ponadto stwierdzono, że wraz z obniżaniem w/c betonu pierwotnego, pogorszeniu ulegała wytrzymałość betonu. Wyjątkiem jest seria z kruszywem recyklingowym pozyskanym z najsłabszego betonu P_72, co można wytłumaczyć słabą jakością zaprawy w betonie pierwotnym, usuniętej w największym stopniu (porównując do innych serii) podczas kruszenia betonu.

Na rysunku 3 przedstawiono wyniki badania wytrzymałości na ściskanie wybranych serii betonu po 34 cyklach zamrażania i rozmrażania betonu wraz z odniesieniem do wyniku wytrzymałości betonu po 56 dniach twardnienia przedstawionej

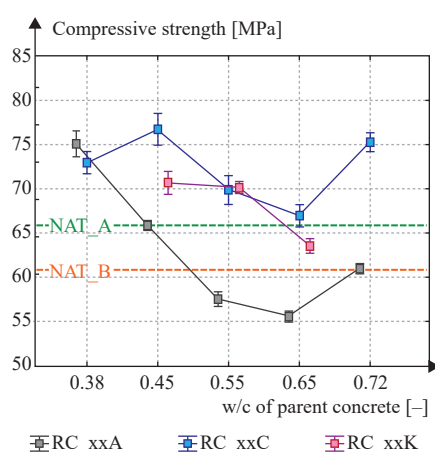


Fig. 2. Results of 56-d compressive strength of recycled aggregate and reference concrete
Rys. 2. Wyniki 56-dniowej wytrzymałości na ściskanie betonu recyklingowego i referencyjnego

loss of strength of the C group turned out to be less than that of plain concrete. It should be noted that the frost resistance test was of a comparative nature – there was no air-entraining admixture in the composition of RAC and NAT concrete.

The results of a water absorption capacity of concrete (Figure 4) also show a tendency to improve this property in the series that used carbonated aggregate. The exception is the RC_38 group, in which this trend was not observed. Referring back to earlier considerations regarding compressive strength after 56 days of hardening, the lack of difference between RC_38A and RC_38C can be justified by the very good quality of P_38 parent concrete aggregate, which inherently has low water absorption. In the other A-C pairs, the difference between the series is statistically significant and very clear, as it is within 10–20%. This may be related to the fact that the aggregate from P_55 concrete has a fairly good internal structure, so that the mortar content surrounding the grains of natural aggregate is higher than that of recycled aggregate from P_65 and P_72 parent concrete.

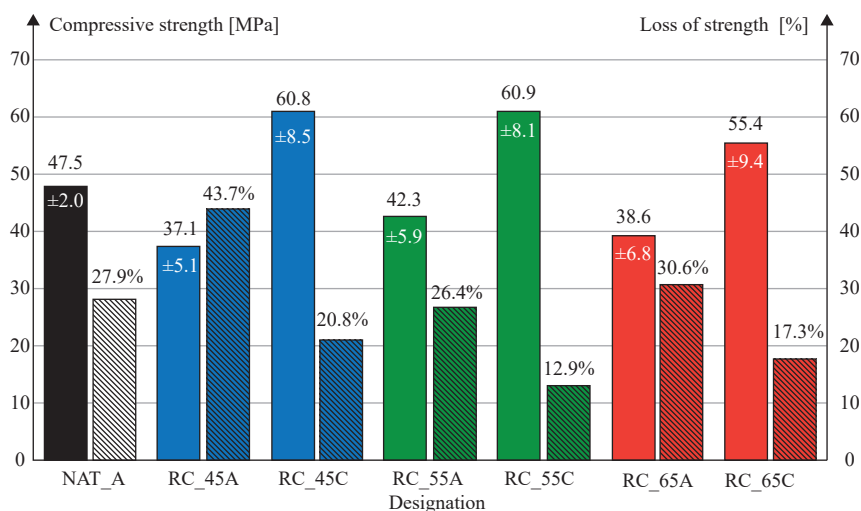


Fig. 3. Compressive strength results [MPa] after freeze-thaw cycles in relation to 56-day strength results [%]

Rys. 3. Wyniki wytrzymałości na ściskanie [MPa] po badaniu mrozoodporności wraz z odniesieniem do wyników wytrzymałości 56-dniowej [%]

na rysunku 2. Utrata wytrzymałości w odniesieniu do wyników betonu niepoddanego testowi była zauważalnie większa w przypadku serii z kruszywem nieskarbonatyzowanym (A) – o ok. 1,7–2,1-krotnie w porównaniu z serią z kruszywem skarbonatyzowanym (C). Utrata wytrzymałości serii C okazała się mniejsza niż w przypadku betonu zwykłego. Należy zaznaczyć, że test mrozoodporności miał charakter porównawczy – w składzie betonów nie było domieszki napowietrzającej.

Rezultaty badania nasiąkliwości betonu (rysunek 4) również wskazują na tendencję do poprawy tej właściwości w seriach, w których zastosowano kruszywo poddane karbonatyzacji. Wyjątkiem jest grupa RC_38, w której nie zaobserwowano tej tendencji. Odwołując się do wcześniejszych rozważań, dotyczących wytrzymałości na ściskanie po 56 dniach twardnienia, brak różnicy między RC_38A a RC_38C można uzasadnić bardzo dobrą jakością kruszywa z betonu pierwotnego P_38, które z natury ma małą nasiąkliwość. W pozostałych parach A–C różnica między seriami jest istotna statystycznie i bardzo wyraźna, gdyż mieści się w granicach 10–20%. Może mieć to związek

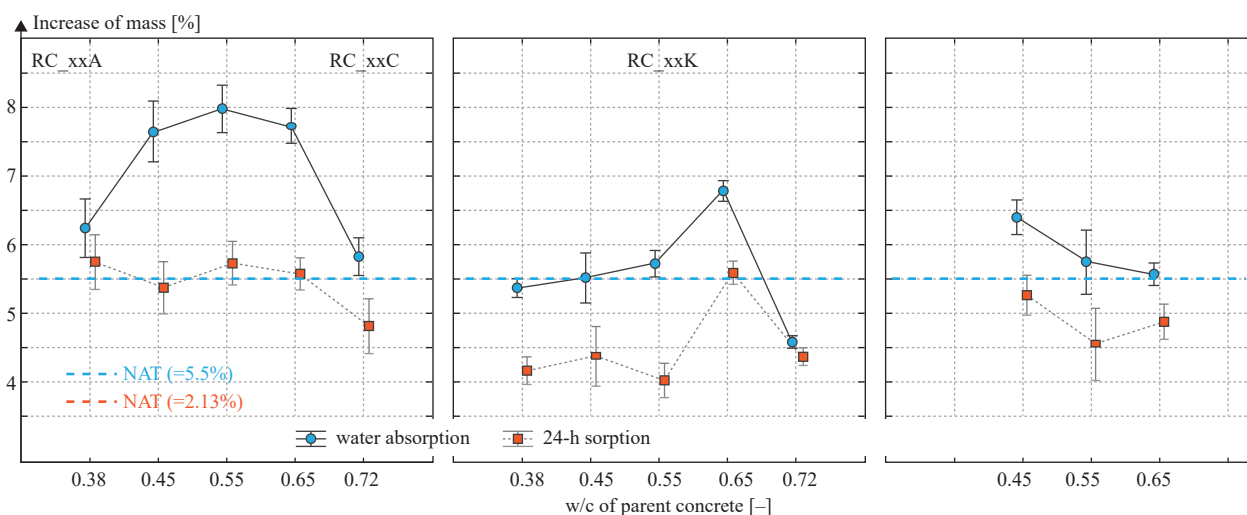


Fig. 4. Results of 24-h sorption and water absorption of concrete

Rys. 4. Wyniki sorpcji 24-godzinnej i nasiąkliwości betonu

The results confirm the benefits from the use of carbonated recycled aggregate observed by other researchers. Great importance, however, is assigned to the humidity of the environment in which carbonation takes place [26]. Under favorable conditions (relative humidity <95%), a reduction in porosity and absorbability of 7% and frost resistance of as much as 77% was observed. On the other hand, another study [27] observed that the use of carbonated aggregate, even in the amount of 60% of the total aggregate content, did not adversely affect the strength of concrete, which was explained by the effect of achieving a better quality of ITZ, than when non-carbonated aggregate was used. Enhancement of the ITZ has also been observed in other studies [28, 29]. Moreover, concrete with carbonated aggregate achieved higher resistance to chloride penetration and lower drying shrinkage [30, 31]. An explanation of the effect of the presence of carbonated aggregate on the hydration process and, consequently, on the noticeable macrostructural effects is presented in the paper [32], while durability is focused on in the paper [33]. Combining the results of own research with the reports of other authors, it can be concluded that carbonation of recycled aggregate combined with the circularity approach can be a favorable symbiosis of environmentally friendly solutions for achieving a high degree of CO₂ sequestration in concrete technology [34], and consequently improving the emission balance in construction industry.

Conclusions

Basing on data from the literature and conducted self-study, it was found that:

- 1) The replacement of traditional bench foundations in both passive and zero-energy buildings by insulated foundation slabs is in line with the principles of sustainable construction. The foundation slab not only eliminates thermal bridges, reducing heat loss to the ground (especially in the ring zone of the building), but provides the potential to make concrete circularity easier – the reuse of the foundation slab (after building deconstruction) is more manageable than the removal of bench foundations.

z faktem, że w kruszywie pochodzącym z betonu P₅₅ mamy do czynienia z dość dobrą strukturą, dzięki czemu zawartość zaprawy otaczającej ziarna kruszywa naturalnego jest większa niż w przypadku kruszyw pochodzących z betonu P₆₅ i P₇₂.

Uzyskane wyniki potwierdzają zaobserwowaną przez innych badaczy korzyść z użycia karbonatyzowanego kruszywa recyklingowego. Duże znaczenie ma jednak wilgotność otoczenia, w której przebiega karbonatyzacja [26]. W warunkach korzystnych (wilgotność względna <95%) zaobserwowano zmniejszenie porowatości i nasiąkliwości o 7%, a mrozoodporności aż o 77%. Z kolei w innych badaniach [27] zaobserwowano, że użycie kruszywa skarbonatyzowanego nawet w ilości 60% nie wpłynęło negatywnie na wytrzymałość betonu, co wyjaśniono efektem uzyskania lepszej jakości strefy kontaktu kruszywo – zaczyn, ITZ (ang. Interfacial Transition Zone) niż przy użyciu kruszywa niesarbonatyzowanego. Wzmocnienie strefy ITZ zaobserwowano również w innych badaniach [28, 29]. Co więcej, beton z kruszywem skarbonatyzowanym uzyskał większą odporność na penetrację chlorków oraz mniejszy skurcz wysychania [30, 31]. Wyjaśnienie wpływu obecności kruszywa skarbonatyzowanego na proces hydratacji i w konsekwencji na zauważalne efekty makrostrukturalne przedstawiono w pracy [32], natomiast na trwałości skupiono się w artykule [33]. Zestawiając wyniki badań własnych z doniesieniami innych autorów, można stwierdzić, że karbonatyzacja kruszywa recyklingowego w połączeniu z podejściem cykularnym stanowić mogą korzystną symbiozę rozwiązań przyjaznych środowisku naturalnemu i umożliwiających uzyskanie dużego stopnia sekwestracji CO₂ w technologii betonu [34], a w konsekwencji poprawę bilansu emisyjnego w budownictwie.

Wnioski

Na podstawie danych z literatury i przeprowadzonych badań własnych, stwierdzono, że:

- 1) zastąpienie tradycyjnych fundamentów ławowych w budynkach pasywnych i zeroenergetycznych przez płyty fundamentowe wpisuje się w założenia budownictwa zrównoważo-

2) Circularity can be put into practice in two ways. One is the concept of PRECS (Piecwise Reuse of Extracted Concrete in new Structures), which involves direct use of the elements (or after cutting them into smaller pieces) in other structures. The second could be to carbonate recycled aggregate obtained from concrete from the foundation slab, thus maximizing CO₂ sequestration in the life cycle before its use in new concrete;

3) The need of sequestration carbonation of recycled aggregate is supported by the fact that it leads to aggregate with better parameters, reducing the negative impact of this type of aggregate on the properties of concrete, especially after a greater number of recycling cycles;

4) In the own research presented above, it was confirmed that the use of carbonated aggregate makes it possible to improve the properties of RAC, increasing its strength by 16% on average and at the same time lowering its absorption. The results concerned a modeled situation involving a share of recycled aggregate of 75% by volume, but they provide a presumption for using this method in real conditions (with a smaller share of recycled aggregate);

5) on the basis of own and other authors' studies, it was concluded that the beneficial effect of using carbonated aggregate can be explained by two mechanisms – the sealing effect of calcium carbonate precipitation in the pores and cracks of the mortar, and the chemical activity of calcium carbonate in reaction with cement.

Received: 20.01.2025

Revised: 10.03.2025

Published: 22.05.2025

nego. Płyta fundamentowa pozwala nie tylko wyeliminować mostki termiczne, redukując straty ciepła do gruntu (szczególnie w strefie obwodowej budynku), ale stanowi potencjał do ułatwienia cyrkularności betonu – ponowne wykorzystanie płyty fundamentowej (po rozbiórce budynku) jest łatwiejsze do przeprowadzenia niż usuwanie fundamentów ławowych.

2) cyrkularność może być w praktyce realizowana na dwa sposoby. Jednym z nich jest koncepcja PRECS (ang. Piecwise Reuse of Extracted Concrete in new Structures), polegająca na bezpośrednim wykorzystaniu elementów (lub po ich cięciu na mniejsze elementy) w innych konstrukcjach. Drugim może być poddawanie karbonatyzacji kruszywa recyklingowego, uzyskanego z betonu z płyty fundamentowej, maksymalizując w ten sposób sekwestrację CO₂ w cyklu życia przed jego wykorzystaniem w nowym betonie;

3) za karbonatyzacją sekwestracyjną kruszywa z recyklingu przemawia fakt, że prowadzi ona do uzyskania kruszywa recyklingowego o lepszych parametrach, ograniczając negatywny wpływ tego typu kruszywa na właściwości betonu, szczególnie po większej liczbie cykli recyklingu;

4) w badaniach własnych potwierdzono, że zastosowanie kruszywa poddanego karbonatyzacji pozwala poprawić właściwości betonu recyklingowego, zwiększając jego wytrzymałość średnio o 16% i jednocześnie zmniejszając nasiąkliwość. Wyniki dotyczyły modelowej sytuacji udziału kruszywa z recyklingu w ilości 75% objętościowo, ale stanowią one przesłankę do wykorzystywania tej metody w realnych warunkach (przy mniejszym udziale kruszywa recyklingowego);

5) na podstawie badań własnych i innych autorów stwierdzono, że korzystny efekt zastosowania kruszywa skarbonatyzowanego można wyjaśnić dwoma mechanizmami – uszczelniającym efektem wytrącania węglanu wapnia w porach i szczelinach zaprawy oraz chemiczną aktywnością węglanu wapnia w reakcji z cementem.

Artykuł wpłynął do redakcji: 20.01.2025 r.

Otrzymano poprawiony po recenzjach: 10.03.2025 r.

Opublikowano: 22.05.2025 r.

Literature

- [1] Average carbon dioxide (CO₂) levels in the atmosphere worldwide from 1959 to 2024. Statista.com.
- [2] <https://ourworldindata.org/emissions-by-sector>.
- [3] PN-EN 15978:2012 Zrównoważone obiekty budowlane.
- [4] Dusiło M. Transformacja energetyczna w Polsce. Edycja 2024. www.forum-energii.eu.
- [5] UNEP, United Nations Environment Programme. Sustainable building and construction: Facts and figures. Industry and Environment. 2003; p. 5).
- [6] Berardi U. Clarifying the new interpretations of the concept of sustainable building. Sustain Cities Soc. 2013; 8, 72–78.
- [7] Grodecki M. Load capacity of the mixed bench and slab foundation. Numerical simulations and analytical calculation model. Stud Geotech Mech. 2021; 43 (2), 135–141.
- [8] Godlewski T, Mazur Ł, Szlachetka O, Witowski M, Łukasik S, Koda E. Design of passive building foundations in the Polish climatic conditions. Energies, 2021; 14 (23), 7855.
- [9] K pfer C, Bastien-Masse M, Fivet C. Reuse of concrete components in new construction projects: Critical review of 77 circular precedents. J Clean Prod. 2023; 383:135235.
- [10] Silva S, Evangelista L, De Brito J. Durability and shrinkage performance of concrete made with coarse multi-recycled concrete aggregates. Constr Build Mater, 2021; 272, 121645.
- [11] Banjad Pe ur I,  tirmer N, Milovanovi  B. Recycled aggregate concrete for nearly zero-energy buildings. Mag Concr Res. 2015; 67 (11), 575–584.
- [12] Silva LS, Najjar MK, Stolz CM, Haddad AN, Amario M, Boer DT. Multiple dimensions of energy efficiency of recycled concrete: a systematic review. Energies. 2024; 17 (15), 3809.
- [13] lowcarboneconomy.cembureau.eu/carbon-neutrality/our-2050-roadmap-the-5c-approach-carbonation/.
- [14] Zhan BJ, Poon CS, Liu Q, Kou SC, Shi CJ. Experimental study on CO₂ curing for enhancement of recycled aggregate properties. Constr Build Mater. 2014; 67, pp. 3–7.

- [15] Ramachandran (1988) za Kurdowski W. Chemia cementu i betonu. Wydawnictwo Polski Cement/Wydawnictwo Naukowe PWN. Kraków; 2010.
- [16] Matschei T, Lothenbach B, Glasser FP. The role of calcium carbonate in cement hydration. *Cem Concr Res.* 2007; 37 (4), 551–558.
- [17] Haselbach LM, Ma S. Potential for carbon adsorption on concrete: Surface XPS analyses. *Environmental Science & technology*, 2008; 42 (14), 5329–5334
- [18] Bruno M, Massaro FR, Prencipe M. Theoretical structure and surface energy of the reconstructed {01.2} form of calcite (CaCO_3) crystal. *Surf Sci.* 2008; 602 (16), 2774–2782.
- [19] Malešev M, Radonjanin V, Marinković S. Recycled concrete as aggregate for structural concrete production. *Sustainability* 2010; 2 (5), 1204–1225.
- [20] PN-EN 1097–6:2002. Badania mechanicznych i fizycznych właściwości kruszyw – Oznaczanie gęstości ziarn i nasiąkliwości.
- [21] Singh PK, Rajhans P, Influence of treated recycled concrete aggregate and modified mixing approach on the mechanical properties of ternary blend geopolymer concrete: Experiments and machine learning algorithms. *J Clean Prod.* 2024; DOI: 10.1016/J.JCLEPRO.2024.141007.
- [22] Mandal R, Panda SK, and Nayak S. Evaluation of rheological properties of sustainable self-compacting recycled aggregate concrete produced by two-stage mixing approach. *J Build Eng.* 2024; DOI: 10.1016/J.JOBE.2024.109126.
- [23] Salas-Montoya A, Chung CW, and Mira-Rada BE. Interaction effect of recycled aggregate type, moisture state, and mixing process on the properties of high-performance concretes. *Case Stud Constr Mater.* 2023; DOI: 10.1016/J.CSCM.2023.E02208.
- [24] Tam VWY, Gao XF, Tam CM. Microstructural analysis of recycled aggregate concrete produced from two-stage mixing approach. *Cem Concr Res.* 2005; DOI: 10.1016/j.cemconres.2004.10.025
- [25] Li W, Xiao J, Sun Z, Kawashima S, and Shah SP. Interfacial transition zones in recycled aggregate concrete with different mixing approaches. *Constr Build Mater.* 2012; DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2012.06.022.
- [26] Gholizadeh-Vayghan A, Bellinkx A, Snellings R, Vandoren B, Quaghebeur M. The effects of carbonation conditions on the physical and microstructural properties of recycled concrete coarse aggregates. *Constr Build Mater.* 2020; DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2020.119486.
- [27] Xuan DX, BJ Zhan, Poon CS. Assessment of mechanical properties of concrete incorporating carbonated recycled concrete aggregates. *Cem Concr Compos.* 2016; 65, pp. 67–74
- [28] Qu D, Lian W, Fang X. Characterization of the interfacial transition zone between wet carbonated fine recycled aggregate and fresh cement paste. *Constr Build Mater.* 2025; 458, 139702.
- [29] Huang Y, Zhang J, Hu X, Wang Y, Drissi S, Shi C. Effect of early CO_2 curing and subsequent water curing on the interfacial transition zone between cement paste and aggregates. *Constr Build Mater.* 2025; 460, 139857.
- [30] Kou SC, Zhan BJ, Poon CS. Use of a CO_2 curing step to improve the properties of concrete prepared with recycled aggregates. *Cem Concr Compos.* 2014; 45, pp. 22–28
- [31] Zhang J, Shi C., Li Y, Pan X, Poon CS, Xie Z. Performance enhancement of recycled concrete aggregates through carbonation. *J. Mater. Civ. Eng.* 2015; 27 (11), p. 04015029
- [32] Zhang T, Chen M, Wang Y, Zhang M. Roles of carbonated recycled fines and aggregates in hydration, microstructure and mechanical properties of concrete: A critical review. *Cem Concr Compos.* 2023; 138, 104994.
- [33] Zhang T, Cui J, Chen M, Yang J, Yan Z, Zhang M. Durability of concrete containing carbonated recycled aggregates: A comprehensive review. *Cem Concr Compos.* 2024; 105865.
- [34] Monkman S., Shao Y. Integration of carbon sequestration into curing process of precast concrete. *Can J Civ Eng.* 2010; 37 (2), 302–310.