M.A. Kazmi, L.V.P. Meesaraganda, Cement Wapno Beton, 28(6) (2023), 364-374
doi: https://doi.org/10.32047/CWB.2023.28.6.1

Karbonatyzacja betonu produkowanego z użyciem CO_2 jako domieszki

Carbonation behavior of concrete produced using CO_2 as an admixture

Md Athar Kazmi[1], Lakshmi Vara Prasad Meesaraganda[1,*]

[1] Department of Civil Engineering, National Institute of Technology Silchar, India

*Corresponding author: L. V. P. Meesaraganda, e-mail: mlvprasad@civil.nits.ac.in

Streszczenie

W istniejącej praktyce CO_2 wprowadzany jest do betonu głównie poprzez przyspieszoną karbonatyzację, która ma wiele ograniczeń, takich jak mała szybkość dyfuzji i wymaganie dużej szczelnej komory, co ogranicza ją tylko do elementów prefabrykowanych. Aby pokonać te ograniczenia, niniejsza praca prezentuje nowatorskie wykorzystanie CO_2 w produkcji betonu poprzez mineralizację z użyciem CO_2. CO_2 jest sekwestrowane do zawiesiny materiału cementowego bogatego w wapń w pierwszym etapie tego procesu, a następnie mieszany z pozostałymi materiałami, aby w drugim etapie wytworzyć beton. Dwuetapowy proces mineralizacji w niniejszej pracy upraszcza wprowadzenie CO_2 do betonu i pozwala na uzyskanie 99% efektywności wykorzystania stosowanego CO_2. CO_2 reaguje z materiałami cementowymi bogatymi w wapń, tworząc korzystnie wpływający na hydratację betonu węglan wapnia w nano-skali. Analiza mikrostrukturalna sugeruje, że węglany rozpoczynają hydratację i przyczyniają się do rozwoju silniejszej mikrostruktury. Z tych powodów odporność na karbonatyzację utwardzonego betonu i wytrzymałość na ściskanie są poprawione. Wyniki opisywanych badań doświadczalnych pokazują, że optymalna ilość CO_2 wprowadzona do betonu poprawia wytrzymałość na ściskanie o 18,2%, 18,8% i o 17,9% zmniejsza karbonatyzacje po 180 dniach testów. Ponadto główny gaz cieplarniany, CO_2, może być wykorzystywany, przyczyniając się do zrównoważonej i przyjaznej dla środowiska produkcji betonu i praktyk budowlanych

Słowa kluczowe: hydratacja cementu, węglan wapnia, karbonatyzacja, zagospodarowanie CO_2, zrównoważony rozwój

Summary

In the existing practice, CO_2 is mainly added to concrete through accelerated carbonation, which has many limitations, such as a low diffusion rate and the requirement of a large airtight chamber, which applies to pre-cast elements only. To overcome these limitations, this paper presents a novel beneficial use of CO_2 in concrete production through the mineralization of CO_2. CO_2 is sequestered into a slurry of calcium-rich cementitious material in the first step of this process and then blended with the remaining materials to make concrete in the second step. The two-step mineralization process in the present work simplifies the CO_2 mineralization into concrete and reaches 99% efficiency of applied CO_2. The CO_2 reacts with calcium-rich cementitious materials to form nano-scale calcium carbonate beneficially impacted concrete hydration. Microstructural analysis suggests that the carbonates seed the hydration and contribute to developing a stronger microstructure. For these reasons, the carbonation resistance of hardened concrete and the compressive strength is improved. The finding of the experimental investigation of the present research shows that an optimum amount of CO_2 mineralization into concrete improves compressive strength by 18.2%, 18.8%, and 17.9% less carbonation at 180 days of testing. Furthermore, the major greenhouse gas, CO_2, can be utilized, contributing towards sustainable and environmentally friendly production of concrete and construction practices.

Keywords: hydration of cement, calcium carbonate, carbonation, CO_2 utilization, sustainability

1. Wprowadzenie

Wychwytywanie dwutlenku węgla i jego użyteczne wykorzystanie w budownictwie może potencjalnie kontrolować problem antropo-

1. Introduction

CO_2 capture and beneficial utilization in the construction industry can potentially control the issue of anthropogenic greenhouse

genicznej emisji gazów cieplarnianych (1, 2). W tym procesie CO_2 jest przechwytywane ze źródła emisji, sprężane i przechowywane w postaci skroplonej, a następnie transportowane tam, gdzie ma być wykorzystywane (3-5). W ten sposób uzyskuje się podwójną korzyść, najpierw ograniczając emisję CO_2 i trwale go sekwestrując, a po drugie, używając go do produkcji wartościowych produktów (6, 7).

CO_2 jest wykorzystywane w przemyśle budowlanym w procesie utwardzania elementów prefabrykowych przez karbonatyzację, obróbki kruszywa z recyklingu w celu poprawy właściwości związanej z kruszywem starej zaprawy i jako domieszka podczas mieszania betonu (8-11). Utwardzanie przez karbonatyzację jest ograniczone wyłącznie do elementów prefabrykowanych, które wymagają dużej komory, ponadto obróbka kruszywa pochodzącego z recyklingu jest ograniczone tylko do betonu z kruszywem z recyklingu (12-14). Jednakże uproszczona dwuetapowa metoda mineralizacji CO_2 używana w niniejszym badaniu podczas mieszania może być stosowana w prefabrykacji i betonie wylewanym na miejscu.

W trakcie eksploatacji konstrukcji, CO_2 uwolniony podczas kalcynacji klinkieru jest ponownie absorbowany przez beton poprzez naturalną karbonatyzację (15, 16). Proces ten jest jednak niezwykle powolny i może trwać setki lat. Dodatkowo, zdolność betonu do pasywacji stali jest zmniejszana przez spontaniczną karbonatyzację, co również sprawia, że zbrojenie staje się bardziej podatne na korozję (17). Z kolei karbonatyzacja na wczesnym etapu nie wykazuje tej tendencji. Dwutlenek węgla łączy się z produktami hydratacji, tworząc równomiernie rozprowadzony węglan wapnia, który zagęszcza mikrostrukturę betonu i zwiększa jego gęstość i wytrzymałość (18, 19).

W latach 70. Uniwersytet w Illinois badał karbonatyzację świeżo uwodnionego cementu (20). Zgodnie z równaniami [1] i [2], reakcja między fazami krzemianu trójwapniowego [C_3S] i krzemianu dwuwapniowego [C_2S] w cemencie oraz CO_2 prowadzi do powstania $CaCO_3$ i fazy C-S-H (20).

$$C_3S + (3\text{-}x)CO_2 + yH \rightarrow C_xSH_y + (3\text{-}x)CaCO_3 \qquad [1]$$

$$C_2S + (2\text{-}x)CO_2 + yH \rightarrow C_xSH_y + (2\text{-}x)CaCO_3 \qquad [2]$$

Ponadto, jak pokazano w równaniu [3], wodorotlenek wapnia obecny w zaczynie cementowym reaguje z CO_2 (18):

$$CO_2 + Ca(OH)_2 \rightarrow CaCO_3 + H_2O \qquad [3]$$

Ponadto reakcja [1] i [2] jest egzotermiczna i wymaga wody, dlatego mineralizacja CO_2 daje dobre wyniki. Mineralizacja z użyciem małych dawek CO_2 w stosunku do masy cementu, jako domieszka w produkcji betonu, poprawia jego wytrzymałość i trwałość (21, 22). W niniejszej pracy badawczej przyjęto uproszczony dwuetapowy proces mineralizacji, który znacznie eliminuje problemy związane z mineralizacją CO_2 i poprawia efektywność. Celem niniejszej pracy jest zbadanie wpływu wczesnej karbonatyzacji poprzez mineralizację CO_2 na proces karbonatyzacji betonu dojrzałego. Zbadano urabialność, wytrzymałość na ściskanie, głębokość karbonatyzacji i mikrostrukturę betonu.

gas emissions (1, 2). In this process, CO_2 is captured from the emitting source, compressed and stored in liquefied form, and then transported to where it is utilized (3-5). In this way, a double-fold benefit is gained, first controlling CO_2 emission and permanently sequestrating it and, secondly, using it to produce valuable products (6, 7).

CO_2 is used in the construction industry in carbonation curing the pre-cast element, carbon conditioning of recycled aggregate to enhance the properties of adhered old mortars, and as an admixture while mixing concrete (8-11). The carbonation curing is limited to the pre-cast element only, which also needs a large chamber; furthermore, conditioning of recycled aggregate is limited to only recycled aggregate concrete (12-14). However, a simplified two-step CO_2 mineralization method used in this research work during the mixing can be used in pre-cast and cast-in-situ.

During the service life of the structure, CO_2 released during the calcination of clinker is naturally reabsorbed by the concrete by natural carbonation (15, 16). The process, however, is extremely sluggish and can take hundreds of years. Additionally, the concrete's passivity is decreased by spontaneous carbonation, which also makes the reinforcement more corrosive (17). Early-age carbonation, on the other hand, does not exhibit this tendency; instead, it combines with hydration products to generate uniformly distributed calcium carbonate, or CaCO3, which densifies the concrete and increases its density and strength (18, 19).

In the 1970s, the University of Illinois investigated the carbonation of freshly hydrated cement (20). According to equations [1] and [2], the reaction between the tricalcium silicate [C_3S] and dicalcium silicate [C_2S] phases in cement and CO_2 results in the formation of $CaCO_3$ and calcium silicate hydrate [C-S-H] gel (20).

$$C_3S + (3\text{-}x)CO_2 + yH \rightarrow C_xSH_y + (3\text{-}x)CaCO_3 \qquad [1]$$

$$C_2S + (2\text{-}x)CO_2 + yH \rightarrow C_xSH_y + (2\text{-}x)CaCO_3 \qquad [2]$$

Additionally, as demonstrated in equation [3], the calcium hydroxide present in cement paste will react with CO_2 (18):

$$CO_2 + Ca(OH)_2 \rightarrow CaCO_3 + H_2O \qquad [3]$$

Furthermore, reactions [1] and [2] are exothermic and consume water, so mineralization with CO_2 gives good results. Mineralization with the use of small doses of CO_2 by the cement mass, as an admixture in concrete production, improved its strength and durability (21, 22). In the present research work, a simplified two-step mineralization process is adopted that considerably overcomes the problems of CO_2 mineralization and improves efficiency. The present work aims to examine the course of later-age carbonation due to early-age carbonation through CO_2 mineralization of concrete. Workability, compressive strength, carbonation depth, and microstructure of concrete were investigated.

2. Program doświadczalny

2.1. Materiały i skład

Wykorzystany został cement portlandzki klasy 53 [OPC], zgodny z normą ASTM C150/C150M-16 (23). Właściwości fizyczne cementu przedstawiono w tablicy 1. Jako kruszywo grube użyto naturalnego kruszywa łamanego o wielkości 10 i 20 mm, o gęstości właściwej 2,74 g/cm^3 i module miałkości 7,08. W badaniach wykorzystano drobne kruszywo z pobliskich źródeł rzecznych, zgodne z IS 383: 2016 (24) i należące do strefy II. Gęstość właściwa i moduł miałkości drobnego kruszywa wynosiły odpowiednio 2,64 i 2,88. Wykorzystano krzemionkowy popiół lotny typu F o gęstości właściwej 2,2 g/cm^3, pochodzący z pobliskiej elektrowni cieplnej, zgodnie z normą ASTM C618-15 (25). CO_2 używany w tym projekcie jako domieszka był w 100% czysty; CO_2 został wyprodukowany w fabryce etanolu i dostarczony w postaci skroplonej.

W niniejszej pracy badawczej użyto superplastyfikatora Sunanda Polytancrete N.G.T., wyprodukowanego przez Sunanda Speciality Coating PVT. L.T.D. Beton używany w eksperymencie sporządzono z wody pitnej zgodnej z normą ASTM C 1602/C 1602M-04 (26). Skład chemiczny cementu i popiołu lotnego przedstawiono w tablicy 2.

Projektowanie mieszanki betonowej przeprowadzono dla każdej mieszanki zgodnie z normą ACI 211.1-91 (27). W niniejszym badaniu uwzględniono beton bez CO_2 oraz trzy różne ilości dodanego do betonu dwutlenku węgla: konwencjonalny beton bez CO_2 [CC], beton z 0,1% CO_2 w stosunku do masy cementu [CMC-I], beton

Tablica 1 / Table 1

WŁAŚCIWOŚCI CEMENTU

PROPERTIES OF CEMENT

Właściwości fizyczne / Physical properties	Test result
Powierzchnia właściwa / Fineness, m^2/kg	302
Gęstość właściwa / Specific gravity, g/cm^3	3.13
Pozostałość na sicie 75 µm / The residue on 75 µm, %	4.6
Wodożądność / Consistency, %	30
Czas wiązania / Setting time, min.	
Początek / Initial	190
Koniec / Final	295
Wytrzymałość na ściskanie / Compressive strength, MPa	
7 dni / days	35.5
28 dni / days	66.0

2. Experimental program

2.1. Materials and mixture proportioning

The cement used was grade 53, ordinarily Portland cement [OPC], confirming ASTM C150/C150M-16 (23). The physical properties of the cement are presented in Table 1. Naturally occurring crushed aggregate of size 10 and 20 mm with a specific gravity of 2.74 and fineness modulus of 7.08 was used as a coarse aggregate. Fine aggregate from nearby river sources confirming to IS 383: 2016 (24) and belonging to zone-II was used in the present research. The specific gravity and fineness modulus of the fine aggregate are 2.64 and 2.88, respectively. Low calcium type F fly ash with a specific gravity of 2.2, obtained from a nearby thermal power plant confirming to ASTM C618-15 (25), was used. The CO_2 used in this project as an admixture was 100% pure; the CO_2 was captured from an ethanol factory. The captured CO_2 from industrial emissions is available in a liquefied form for industrial uses.

A superplasticizer named Sunanda Polytancrete N.G.T. from Sunanda speciality coating PVT. L.T.D. has been used in this present experimental work. The present experimental work used potable drinking water conforming to ASTM C 1602/C 1602M-04 (26). The chemical compositions of the OPC and fly ash are presented in Table 2.

Concrete mix design was carried out for each mix as per ACI 211.1-91 (27). One without CO_2 and three varying amounts of CO_2 mineralized concrete mix are considered in this study: conventional concrete having zero CO_2 [CC], concrete with 0.1% CO_2 by the mass of cement used [CMC-I], concrete with 0.2% CO_2 by the mass of cement used [CMC-II], concrete with 0.3% CO_2 by the mass of cement used [CMC-III]. The mass of each ingredient per unit volume of concrete is presented in Table 3.

2.2. CO_2 mineralization

The sequestration of CO_2 with the hydration products of cementitious materials is carried out separately, as separate process, that easing the process and increasing the CO_2 use efficiency to 99%, as found practically that the decrease in the mass of CO_2 is equal to the mass gains by the slurry cylinder after CO_2 sequestrating and opening of its top cap. The procedure used for CO_2 mineralization in cementitious materials can be summarized as follow. Cement slurry was prepared in the cylinder, and it was closed with the bolts placing a rubber between the cap and cylinder to make it airtight. Then it was placed on the weighing balance and

Tablica 2 / Table 2

SKŁAD CHEMICZNY CEMENTU PORTLANDZKIEGO I POPIOŁU LOTNEGO

CHEMICAL COMPOSITIONS OF OPC AND flY ASH

	SiO_2	Fe_2O_3	Al_2O_3	CaO	MgO	K_2O	Na_2O	SO_3	LOI*
	% masowy / % by mass								
Cement	19.62	2.87	4.86	62.57	0.90	0.58	0.17	2.21	2.35
Popiół lotny / Fly ash	47.87	4.65	31.39	4.78	2.43	1.54	0.65	0.69	9.05

*Straty prażenia / Loss on ignition

Tablica 3 / Table 3

SKŁAD MIESZANEK BETONOWYCH

MIX PROPOTIONS OF INVESTIGATED CONCRETE

Składnik / Ingredient	CC	CMC-I	CMC-II	CMC-III
Cement, kg	388	388	388	388
Popiół lotny / Fly ash, kg	97	97	97	97
Woda / Water, kg	175	175	175	175
Upłynniacz / Superplasticizer, kg	3.05	3.1	3.15	3.2
Woda/Spoiwo / Water/binder, -	0.36	0.36	0.36	0.36
Kruszywo grube / Coarse aggregate, kg	1048	1048	1048	1048
Drobne kruszywo / Fine aggregate, kg	702	702	702	702
CO_2,g	-	395	790	1185

z 0,2% CO_2 w stosunku do masy cementu [CMC-II], beton z 0,3% CO_2 w stosunku do masy cementu [CMC-III]. Masa każdego składnika na jednostkę objętości betonu przedstawiona jest w tablicy 3.

2.2. Mineralizacja z użyciem CO_2

Sekwestracja CO_2 w produktach hydratacji materiałów cementowych odbywa się oddzielnie, jako osoby etap, co ułatwia proces i zwiększa efektywność wykorzystania CO_2 do 99%. Ustalono to badając, że zmniejszenie masy CO_2 jest równe zwiększeniu masy zawiesinę po sekwestracji CO_2 i otwarciu pokrywy. Zastosowany proces karbonatyzacji materiałów cementowych można podsumować następująco. Zawiesinę cementową przygotowano w pojemniku i zamknięto śrubami, umieszczając uszczelkę gumową pomiędzy pokrywą a cylindrem, aby układ był szczelny. Następnie umieszczono go na wadze i połączono z butlą magazynującą CO_2, a następnie wtłoczono założoną ilość CO_2. Ilość wtłoczonego CO_2 odczytano na wadze. Następnie zamknięto zawór dolotowy butli i pojemnik wstrząsano dokładnie przez minutę. W drugim kroku, uzyskaną mieszaninę połączono z resztą składników betonu, aby uzyskać beton karbonatyzowany. Schematyczny diagram używanego wyposażenia do karbonatyzacji materiałów cementowych przedstawiono na rys. 1.

2.3. Metody

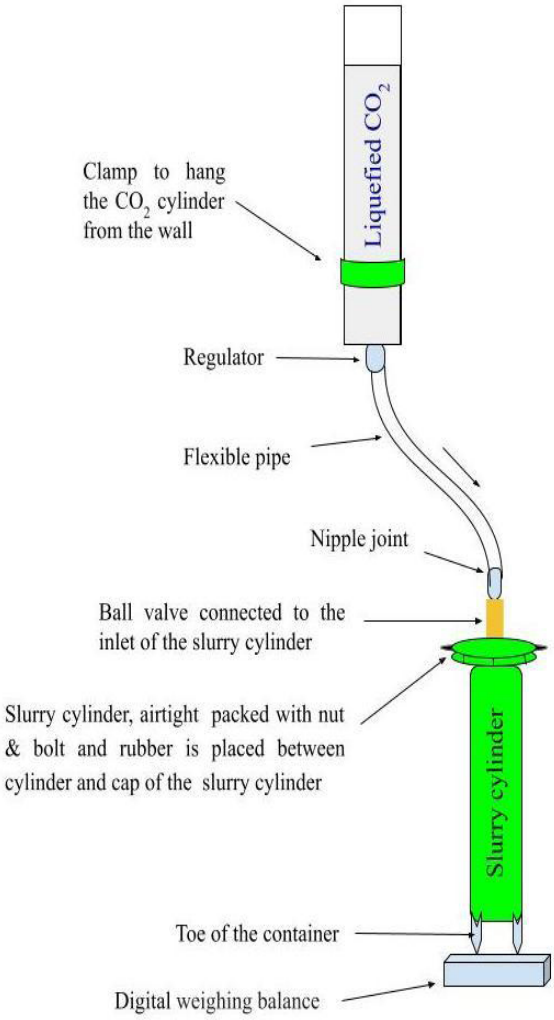
Badanie metodą opadu stożka jest stosowane do oceny urabialności mieszanki betonowej zgodnie z normą IS 1199 [Część-1]: 2018 (28). Większe wartości opadu stożka wskazują, że mieszanka betonowa ma większą urabialność. Sześcienne próbki betonu [150 mm] zostały zaformowane zgodnie z normą IS 1199 [Część-5]: 2018 (29), aby przeprowadzić test jednoosiowego ściskania na utwardzonym betonie po 7, 28 i 56 dniach utwardzania w wodzie. Wytrzymałość na ściskanie jest obliczana zgodnie z zaleceniami normy IS 516 [Część-1/Sekcja-1]: 2021 (30), jako maksymalnie obciążenie podzielone przez pole przekroju poprzecznego sześcianu.

Badanie szybkości postępu karbonatyzacji przeprowadzono zgodnie z normą IS 516 [Część-2/Sekcja-4]: 2021 (31). Beleczki dojrzewały w wodzie przez 28 dni, a następnie w powietrzu w temperaturze 27 °C i wilgotności względnej 65 ± 5% przez 28 dni. Następnie górną, dolną i dwie przeciwległe ściany pokryto

connected with the CO_2 storage cylinder, and the required amount of CO_2 was applied. The applied amount of the CO_2 will appear on the weighing balance. After that, the inlet valve of the cylinder is closed and shaken thoroughly for one minute. Finally, in the second step, it is mixed with the rest ingredients of the concrete to produce CO_2 mineralized concrete. The schematic diagram of the equipment used for the mineralization of CO_2 in cementitious materials is shown in Fig.1.

2.3. Methods

The slump test was used to evaluate the workability of the fresh concrete as per IS 1199 [Part-1]: 2018 (28). The larger slump values indicate that the fresh concrete has higher workability. Concrete cube specimens [150 mm] were cast as per IS 1199 [Part-5]: 2018 (29) to perform a uniaxial compression test on hardened concrete at 7, 28, and 56 days of water curing. The compressive strength was carried out following the specifications by IS 516 [Part-1/Sec-1]: 2021 (30).



Rys. 1. Schemat ideowy urządzenia do mineralizacji materiału cementowego dwutlenkiem węgla

Fig. 1. Schematic diagram of the equipment for CO_2 mineralization into the cementitious material

roztopioną parafiną w trzech równych warstwach, nakładając każdą warstwę w regularnych odstępach tak, aby poprzednia warstwa utwardziła się na powierzchni betonu, za pomocą pędzla na wszystkich, oprócz dwóch przeciwległych ścian. Następnie beleczki były umieszczane w komorze karbonatyzacyjnej o stężeniu CO_2 wynoszącym 3,0 ± 0,5% objętościowo, temperaturze 27 ± 2°C i wilgotnością względnej 65 ± 5%. Komora przyspieszonej karbonatyzacji jest aktywnie kontrolowana pod względem CO_2, wilgotności względnej i temperatury z precyzją ± 2,0%, ± 0,5°C i ± 0,1% [objętościowo] odpowiednio. Materiały i zestaw narzędzi używane do pomiaru głębokości karbonatyzacji składają się z fenoloftaleiny, parafiny, pędzla, suwmiarki, lupy, dłuta i młotka. Beleczki były przechowywane w komorze do badania przyspieszonej karbonatyzacji przez 70, 120 i 180 dni, tak aby dwie niezaklejone ściany były pionowo wystawione na powietrze krążące we wnętrzu komory, umożliwiając swobodną cyrkulację powietrza wokół dwóch ścian wystawionych na warunki przyspieszonej karbonatyzacji.

Kawałek próbki o grubości około 50 mm został odłamany za pomocą młotka i dłuta po każdym okresie ekspozycji, tj. 70, 120 i 180 dni testowania. Pęknięta powierzchnia na pozostałej beleczce została ponownie uszczelniona, aby zapobiec wzdłużnej karbonatyzacji. Niekarbonatyzowana część próbki po spryskaniu roztworem fenoloftaleiny zmieniała kolor na różowy z powodu pH większego niż 8,2. Część, która pozostała niezmieniona, uległa karbonatyzacji. Po każdym okresie ekspozycji dla każdej beleczki zmierzono głębokości karbonatyzacji w dziesięciu punktach, po pięć na obu odsłoniętych powierzchniach. Korekty dla gęstego kruszywa lub pęcherzyków powietrza na pękniętej powierzchni zostały zastosowane zgodnie z normą IS 516 [Część-5/Sekcja-3]: 2021 (32).

Analiza mikrostruktury z użyciem skaningowej mikroskopii elektronowej [SEM] została przeprowadzona zgodnie z normą ASTM C1723-10 (33) przy użyciu mikroskopu elektronowego Hitachi S-4800 [Hitachi High Technologies Corporation, Tegama, Fukuoka, Japonia]. Jedna próbka każdej mieszanki została zbadana za pomocą SEM po 180 dniach utwardzania przez karbonatyzację. Po delikatnym rozdrobnieniu próbek do wielkości około 5 mm, próbki nasączono acetonem, aby zahamować hydratację i karbonatyzację. Przed przeprowadzeniem testów próbki suszono w komorze próżniowej przez 24 godziny. Do zamocowania próbek na 12 mm metalowych podstawkach użyto dwustronnej taśmy węglowej. Napięcie przyspieszające wynosiło 15 kV, odległość robocza 15 mm z użyciem detektorów BSE, a powiększenie wynosiło 500x.

3. Wyniki i dyskusja

3.1. Badanie metodą opadu stożka

Wartość opadu stożka świeżego betonu przedstawiona jest w tablicy 4. Widać, że wartość opadu stożka mieszanek betonowych z CO_2 mieści się w dopuszczalnym limicie, biorąc pod uwagę zanotowaną różnicę w stosunku do mieszanki wzorcowej. Wielkość zmiany opadu stożka jest wystarczająco mała w każdym

The compressive strength was calculated as the maximum applied load recorded divided by the cross-sectional area of the cube.

The carbonation test was carried out as per IS 516 [Part-2/Sec-4]: 2021 (31). The prisms were water cured for 28 days and then conditioned in the air environment at a temperature of 27 °C and relative humidity of 65 ± 5% for 28 days prior to sealing the top, bottom, and two opposite side faces by melting paraffin wax and applying it in three equal layers, applying each layer at a regular interval such that preceding layer set on the concrete surface, with a paintbrush of all but two faces. The prisms are then placed in the accelerated carbonation chamber with CO_2 concentration at 3.0 ± 0.5% by volume, temperature at 27 ± 2 °C, and relative humidity at 65 ± 5%. The accelerated carbonation chamber has active control on CO_2, relative humidity, and temperature with a precision of ± 2.0%, ± 0. 5 °C and ± 0.1% [by volume], respectively. The materials and the toolkit used to measure carbonation depth consist of a phenolphthalein indicator, paraffin wax, brush, Vernier caliper, magnifying glass, chisel and hammer. The prisms are incubated in the accelerated carbonation chamber for 70, 120, and 180 days such that the two unsealed faces are vertically exposed to circulated air from the inside accelerated carbonation chamber, permitting air to circulate freely around the two faces that are exposed to accelerated carbonation conditions.

A slice approximately 50 mm thick was broken off with the help of a hammer and chisel after each exposure period of testing 70, 120, and 180 days. The split surface on the remaining prism was resealed to prevent longitudinal carbonation. The noncarbonated part changed into pink color upon spraying the phenolphthalein indicator solution due to a pH higher than 8.2. The portion which remains unchanged represented the carbonated part of the prisms. Ten single-point carbonation depths [dk, point], five on each side of both faces exposed after splitting, are measured after each exposure period on each prism. The corrections for dense aggregate or air voids on the broken face were applied as per IS 516 [Part-5/Sec-3]: 2021 (32).

Scanning electron microscope [SEM] analysis was carried out following ASTM C1723-10 (33) utilizing a Hitachi S-4800 [Hitachi High Technologies Corporation, Tegama, Fukuoka, Japan] to identify the specific morphological properties of all the concrete mixtures. One sample of each mixture was examined using a SEM after 180 days of carbonation curing. After gently crushing the samples to a size of about 5 mm, the specimens were soaked in acetone to inhibit hydration and carbonation. Prior to testing, the samples were dried in a vacuum desiccator for 24 hours. Two-sided carbon tape was used to secure the specimens to 12 mm metal stubs. An acceleration voltage of 15 kV, 15 mm of working distance using BSE detectors, and a magnification of 500 was used to observe the micro-structural differences between the mixes.

3. Results and discussions

3.1. Slump test

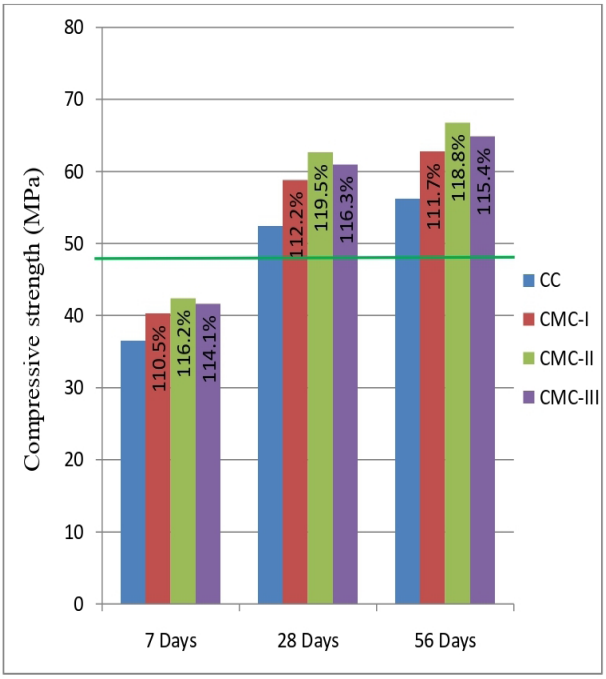
przypadku, aby beton z mineralizowanym CO_2 można było uznać za zachowujący się podobnie do CC. Ze względu na to, że ilość CO_2 jest mała, niewielka ilość wody była związana przez wczesną reakcję karbonatyzacji; dlatego CO_2 nie zmienia znacząco właściwości mieszanki betonowej. To samo zachowanie zostało również zgłoszone przez innych badaczy (11, 34).

3.2. Wytrzymałość na ściskanie

Tablica 5 przedstawia wytrzymałości na ściskanie betonów CC, CMC-I, CMC-II i CMC-III po 7, 28 i 56 dniach. Wytrzymałość na ściskanie, przy 0,2% dodatku CO_2 w stosunku do masy cementu, daje najwyższą wytrzymałość we wszystkich okresach testowania. Dodatek CO_2 większy niż 0,2% zmniejsza wytrzymałość. Wszystkie betony osiągnęły docelową wytrzymałość na ściskanie wynoszącą 48,3 MPa po 28 dniach dojrzewania. Wytrzymałości na ściskanie CMC-II są o 16,2%, 19,5% i 18,8% większe niż w przypadku CC po odpowiednio 7, 28 i 56 dniach, procentowy wzrost wytrzymałości na ściskanie jest przedstawiony na rys. 2.

Przyczyną zwiększenia wytrzymałości na ściskanie jest zwiększenie objętości produktów hydratacji cementu powodowana przez mineralizację z użyciem CO_2. Wieksza ilość nano- do submikronowych cząstek $CaCO_3$ wypełniających drobne pory, to również powód wzrostu wytrzymałości (18, 35). Większe dodatki CO_2 wiążą więcej wody z matrycy betonowej i mogą powodować zaburzenie hydratacji, dlatego nie zanotowano wzrostu wytrzymałości po zwiększeniu dodatku CO_2 powyżej 0,2% w stosunku do masy użytego cementu.

3.3. Głębokość karbonatyzacji



Rys. 2. Procentowy wzrost wytrzymałości na ściskanie w wyniku mineralizacji z użyciem CO_2

Fig. 2. Percentage increase in compressive strength due to CO_2 mineralization

Tablica 4 / Table 4

OPAD STOŻKA MIESZANEK BETONOWYCH Z I BEZ DODATKU DWUTLENKU WĘGLA

SLUMP VALUE OF CONVENTIONAL AND CO_2 MINERALIZED CONCRETE

Mieszanka / Mix Id	Opad stożka / Slump value, mm
CC	110
CMC-I	107
CMC-II	105
CMC-III	97

The slump value of the fresh concrete is presented in Table 4. It can be seen that the slump value of CO_2 mineralized concrete is within acceptable limit, given the observed difference from the CC. The magnitude of change in a slump is small enough in each case that the CO_2-mineralized concrete can be regarded as to perform similar to the CC. As the amount of CO_2 mineralized is small, a small amount of water was used by the early carbonation reaction; hence CO_2 does not alter the fresh properties of concrete significantly. The same behavior was also reported by other researchers (11, 34).

3.2. Compressive strength

Table 5. Presents the compressive strengths of the concrete mixes CC, CMC-I, CMC-II, and CMC-III at 7, 28, and 56. The compressive strength, at 0.2% of CO_2 mineralization by the mass of cement gives the highest strength in all ages of testing. A higher dose of CO_2 than 0.2% decreases strength. All the concrete mix achieved the target strength of 48.3 MPa at 28 days of curing. CMC-II compressive strengths are 16.2%, 19.5%, and 18.8% more than the CC at 7, 28, and 56 days, respectively, percentage increase in compressive strength is depicted in Fig. 2.

The reason for the increase in compressive strength is the increase in the volume of cement hydration products caused by mineralization with CO_2. A larger amount of nano- to submicron $CaCO_3$ particles filling the fine pores is also the reason for the increase in strength (18, 35). Larger CO_2 additions bind more water from the concrete matrix and may influence the hydration of cement, therefore no increase in strength was noted after increasing the CO_2 addition above 0.2% in relation to the mass of the cement used.

3.3. Carbonation depth

The carbonation depth of all the concrete mixes at 180 days of testing is well lower than the minimum nominal cover requirement, to meet the durability requirement in mild exposure condition value of 20 mm (36).

Table 5 presents the result of carbonation test, it can be observed that the CO_2 mineralized concrete performs superior to CC. 18%, 19%, and 18% less carbonation were observed in CMC-II compared to CC at 70, 120, and 180 days of carbonation testing, respectively. Percentage decrease in the depth of carbonation due to the CO_2 mineralization is shown in Fig. 3.This is due to the

Tablica 5 / Table 5

WYTRZYMAŁOŚĆ NA ŚCISKANIE BETONU WZORCOWEGO ORAZ BETONU Z DODATKIEM DWUTLENKU WĘGLA

COMPRESSIVE STRENGTH OF CONVENTIONAL AND CO_2 MINERALIZED CONCRETE

Czas dojrzewania Curing period	Wytrzymałość na ściskanie Compressive strength, MPa			
	CC	CMC-I	CMC-II	CMC-III
7 Dni / Days	36.5	40.3	42.4	41.7
28 Dni / Days	52.4	58.8	62.6	61.0
56 Dni / Days	56.2	62.8	66.8	64.9

Tablica 6 / Table 6

GŁĘBOKOŚĆ KARBONATYZACJI PO 70, 120 I 180 DNIACH PRZYSPIESZONEJ KARBONATYZACJI

DEPTH OF CARBONATION (MM) AT 70, 120, AND 180 DAYS OF ACCELERATED CARBONATION

Czas przyspieszonej karbonatyzacji / Accelerated carbonation period	Głębokość karbonatyzacji Carbonation depth, mm			
	CC	CMC-I	CMC-II	CMC-III
70 Dni / Days	5.5	5.0	4.5	5.0
120 Dni / Days	8.0	7.5	6.5	7.0
180 Dni / Days	14.0	13.0	11.5	12.5

Głębokość karbonatyzacji wszystkich mieszanek betonowych po 180 dniach ekspozycji jest znacznie mniejsza niż minimalne wymagania dotyczące grubości otuliny zbrojenia, aby spełnić wymogi trwałości w warunkach eksploatacji w warunkach łagodnego narażenia na karbonatyzację [20 mm] (36).

Tablica 5 przedstawia wyniki badania głębokości karbonatyzacji. Można zauważyć, że beton z dodatkiem CO_2 zachowuje się lepiej niż beton wzorcowy. Zanotowano odpowiednio o 18%, 19% i 18% mniejszą karbonatyzację w przypadku CMC-II w porównaniu do CC odpowiednio po 70, 120 i 180 dniach ekspozycji na przyspieszoną karbonatyzacę. Procentowy spadek głębokości karbonatyzacji z powodu mineralizacji CO_2 jest przedstawiony na rys. 3. Jest to spowodowane powstawaniem nano-cząstek $CaCO_3$ oraz większą ilością żelu C-S-H po mineralizacji CO_2 (37, 38).

Rys. 4. [a] pokazuje betony CC, CMC-I, CMC-II i CMC-III spryskany 1% roztworem fenoloftaleiny po 28 dniach utwardzania w wodzie. Ze względu na to, że próbki były utwardzane w wodzie, gdzie karbonatyzacja nie występowała, głębokość karbonatyzacji na tym etapie jest pomijalna i niezauważalna nawet przy użyciu lupy. Rys. 4 [b], [c] i [d] pokazuje próbki poddane odpowiednio 70, 120 i 180 dniom przyspieszonej karbonatyzacji.

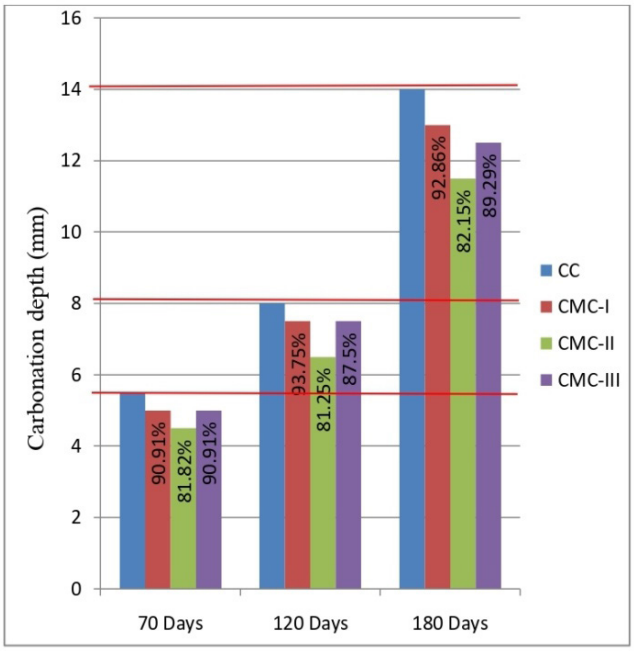
Można również stwierdzić na podstawie głębokości karbonatyzacji betonu wzorcowego i betonów z dodatkiem CO_2 zgodnie z tablicą 5, że odporność betonu CMC-II jest najlepsza po wszystkich okresach dojrzewania. Przyczyny tego mogą być związane z dodatkiem CO_2 w tej mieszance, optymalizującej żel C-S-H z obu reakcji, tj. reakcji karbonatyzacji między cementem a CO_2 oraz późniejszej hydratacji cementu. Im więcej fazy C-S-H i im gęstsza mikrostruktura betonu, tym mniej jest on podatny na działanie środowiska zewnętrznego. Odporność na wnikanie zewnętrznych czynników do matrycy betonu jest również powodem najlepszej odporności betonu CMC-II w warunkach karbonatyzacji (39).

3.4. Mikrostruktura

Rys. 5 przedstawia obrazy mikroskopowe mikrostruktury betonu wzorcowego i z dodatkiem CO_2. Mikrostruktura betonu zagęszcza się wraz z dodatkiem niewielkiej ilości CO_2, jak obserwowano na obrazach SEM. Powierzchnia betonu wzorcowego była bardziej luźna i porowata w porównaniu do powierzchni betonu z dodatkiem CO_2. Zauważono W betonie z dodatkiem CO_2 znaleziono więcej formation of $CaCO_3$ nano particles and more C-S-H gel upon CO_2 mineralization of concrete (37, 38).

Fig 4. [a] shows the CC, CMC-I, CMC-II, and CMC-III spray with 1% phenolphthalein solution at 28 days of water curing. As the samples were water cured, where carbonation did not occur for 28 days of water curing, the carbonation depth at this stage is negligible and not noticeable even with a magnifier. Fig.4 [b], [c] and [d] shows the carbonated samples at 70, 120, and 180 days of accelerated carbonation condition, respectively.

It can also be noticed from the carbonation depth of CC and CO_2 mineralized concrete present in Table 5, that CMC-II performance is best on all the testing days. The reasons behind this could be the dose of CO_2 mineralized in this mix, optimized C-S-H gel from both the reactions, namely freshly carbonation reaction between cementitious materials and CO_2 and the hydration of the cementitious materials. Therefore higher the C-S-H gel and the denser the concrete, the less vulnerable to environmental effects. This resistance developed towards the ingress of the external agent into



Rys. 3. Zmiana głębokości karbonatyzacji na skutek mineralizacji CO_2

Fig. 3. Change in carbonation depth due to CO_2 mineralization

a) Zero days

b) 70 days

c) 120 days

d) 180 days

Rys. 4. Przyspieszona karbonatyzacja betonu wzorcowego i mineralizowanego CO_2

Fig. 4. Accelerated carbonation of conventional and CO_2 mineralized concrete

produktów o morfologii wydłużonej i sflokulowanej, takich jak ettringit i faza C-S-H. Morfologia powierzchni betonu z dodatkiem CO_2 jest gładka, bardziej zwarta niż w betonie wzorcowym, zgodnie z porównaniem między rys. 5 [a] [b], [c] i [d]. Wynika to z faktu, że $CaCO_3$, wytrąca się na powierzchni betonu w wyniku karbonatyzacji produktów hydratacji. Można pokazać, że zastosowany w betonie CMC-II dodatek dwutlenku węgla zoptymalizował dwie reakcje w betonie tj. wczesną reakcję karbonatyzacji i hydratację materiałów cementowych, i dał najlepszy wynik. Tamet i in. (40) i Monkmanet i in. (41) również opisali dokładną morfologię betonu zmineralizowanego CO_2.

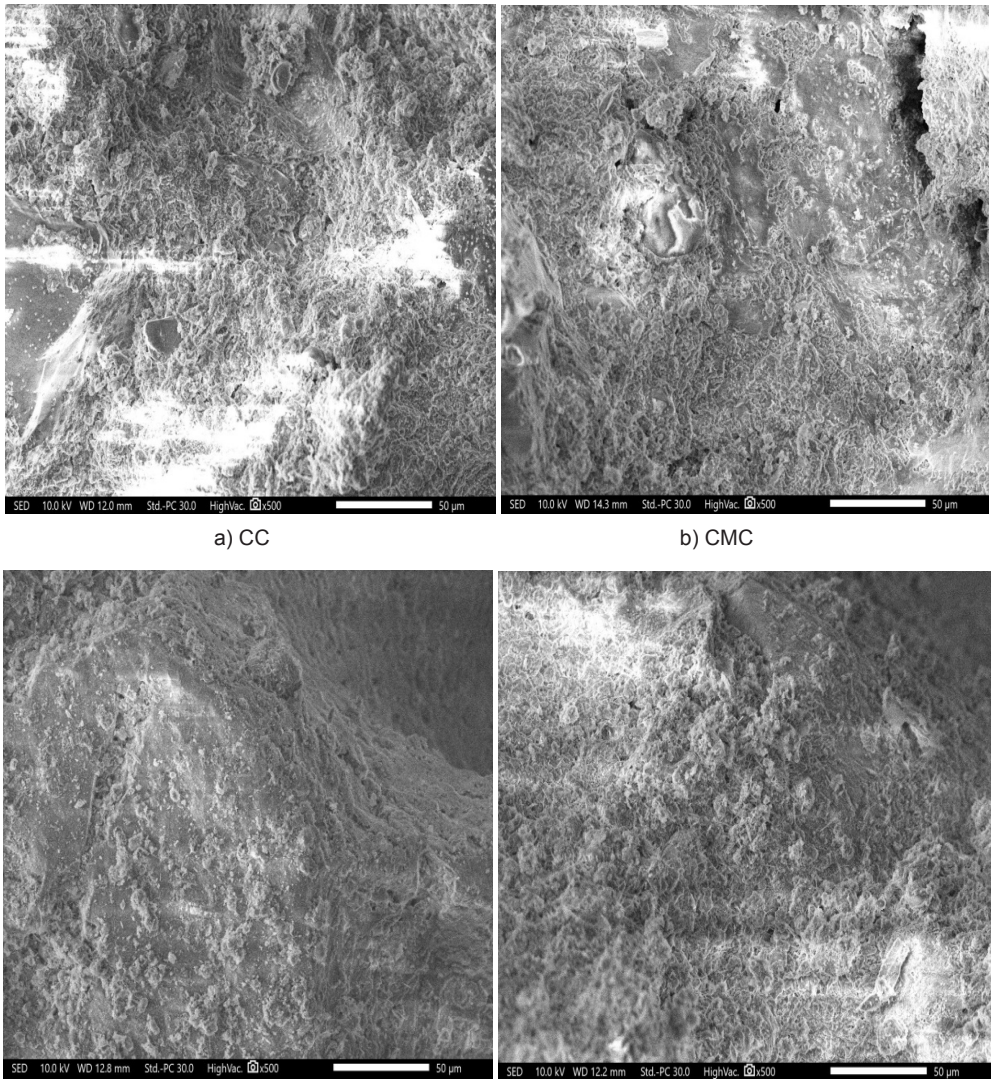
4. Wnioski

Niniejszy artykuł prezentuje wyniki zastosowania dwutlenku węgla, jako domieszki w celu poprawy właściwości betonu. Wnioski

the concrete matrix is also the reason behind the best performance of CMC-II under carbonation conditions (39).

3.4. SEM analysis

Fig. 5 shows scanning electron microscope images of CC and CO_2 mineralized concrete. The microstructure of the concrete densifies with the mineralization of a small quantity of CO_2, as observed from the SEM images. The surface of the CC concrete was more loose and porous compared to the surface of CO_2 mineralized concrete. More acicular and flocculated hydration products, such as ettringite and C-S-H gel, were present in CO_2 mineralized concrete. The surface morphology of the CO_2 mineralized concrete is smoother, denser, and more compact than CC, according to a comparison between Fig. 5 [a] [b], [c], and [d]. This is due to $CaCO_3$, which develops, precipitates, and converges on the surface of CO_2-mineralized concrete due to the carbonation of the hydration



a) CC b) CMC

c) CMC-II d) CMC-III

Rys. 5. Fotografie mikrostruktury badanych betonów wykonane z użyciem skaningowego mikroskopu elektronowego

Fig. 5. SEM image of control and CO_2 mineralized concrete

wyciągnięte z tej pracy nad betonem produkowanym przez użycie CO_2 jako domieszki są jak następuje.

1. W tej analizie wytrzymałość na ściskanie i odporność na karbonatyzację betonu została zwiększona poprzez dodatek CO_2. Uzyskano 16,2%, 19,5% i 18,8% wzrost wytrzymałości na ściskanie po 7, 28 i 56 dniach utwardzania w wodzie oraz 18%, 19% i 18% mniejszą karbonatyzację po 70, 120 i 180 dniach testu przyspieszonej karbonatyzacji w przypadku CMC-II niż w przypadku betonu wzorcowego. Wartość opadu stożka mieszanek z dodatkiem CO_2 uznano za akceptowalną z pomijalnym zmniejszeniem wraz ze zwiększaniem ilości CO_2.
2. W niniejszym badaniu najlepsze właściwości betonu pod względem wytrzymałości na ściskanie i odporności na karbonatyzację uzyskuje się, gdy jako domieszkę stosuje się niewielką ilość CO_2 w zakresie od 0,2 do 0,3% masy cementu.
3. Wyniki testu przyspieszonej karbonatyzacji ujawniają, że użycie CO_2 w produkcji betonu nie wpływa na wartość pH roztworu porowego i dodatkowe ryzyko korozji stali. CO_2 jest korzystnie

products. It can be shown that the addition of carbon dioxide used in CMC-II concrete optimized two reactions in concrete, i.e. early carbonation reaction and hydration of cementitious materials, and gave the best outcome. Tamet et al. (40) and Monkmanet et al. (41) also reported the exact morphology of CO_2-mineralized concrete.

4. Conclusions

This study presents an explanatory work on using CO_2 as an admixture to improve concrete properties. The conclusions drawn from this study of concrete produced by using CO_2 as an admixture are summarized as follows:

1. In this investigation, the compressive strength and resistance to carbonation of concrete was enhanced by mineralization with CO_2. A 16.2%, 19.5%, and 18.8% increase in compressive strength at 7, 28 and, 56 days of water curing and 18%, 19%, and 18% less carbonation at 70, 120 and, 180 days of accelerated carbonation test were found in CMC-II than in CC.

wykorzystywany w proponowanym rozwiązaniu. Dlatego CO_2 jest korzystną domieszką do poprawy wydajności betonu.

4. Badanie mikrostruktury wykazało, że dodatek CO_2 do betonu powoduje powstawanie cząstek $CaCO_3$ o wielkości submikronowej, które mogą stanowić zarodki krystalizacji dla hydratów cementu.

Literatura/ References

1. D. Xuan, B. Zhan, C. Sun, W. Zheng, Carbon dioxide sequestration of concrete slurry waste and its valorization in construction products. Constr. Build. Mater. **113**, 664–672 (2016). http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.03.109

2. Z. He, Y.Jia, S.Wang, M. Mahoutian, Y. Shao, Maximizing CO_2 sequestration in cement-bonded fiberboards through carbonation curing. Constr. Build. Mater. **213**, 51–60. (2019). https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.04.042

3. S. Gupta, A. Kashani, A.H. Mahmood, T. Han, Carbon sequestration in cementitious composites using biochar and fly ash – Effect on mechanical and durability properties. Constr. Build. Mater. **291**, 123363 (2021). https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.123363

4. S. Monkmana, P.A. Kenwardb, G. Dippleb, M. MacDonalda, M. Raudseppb, Activation of cement hydration with carbon dioxide. J. Sustain. Cem. Mater. **7**, 160–181 (2018). https://doi.org/10.1080/21650373.2018.1443854

5. D. Wang, J. Xiao, Z. Duan, Strategies to accelerate CO_2 sequestration of cement-based materials and their application prospects. Constr. Build. Mater. **314**, 125646 (2022). https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.125646

6. S. Gupta, H.W. Kua, C.Y. Low, Use of biochar as carbon sequestering additive in cement mortar. Cem. Concr. Compos. **87**, 110–129 (2018). https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2017.12.0 09

7. R. Kurda, J. De Brito, J.D. Silvestre, Carbonation of concrete made with high amount of fly ash and recycled concrete aggregates for utilization of CO_2. J. CO_2 Util. **29,** 12–19 (2018). https://doi.org/10.1016/j.jcou.2018.11.004

8. M. Lei, S. Deng, K. Huang, Z. Liu, F. Wang, S. Hu, Preparation and Characterization of a CO_2 Activated Aerated Concrete with Magnesium Slag as Carbonatable Binder. S.S.R.N. Electron. J. **353**, 129112 (2022). https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.129112

9. A.N. Junior, R.D.T. Filho, E.D.M.R. Fairbairn, J. Dweck, The effects of the early carbonation curing on the mechanical and porosity properties of high initial strength Portland cement pastes. Constr. Build. Mater. **77**, 448–454 (2015). http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.12.072

10. T. Chen, M. Bai, X. Gao, Carbonation curing of cement mortars incorporating carbonated fly ash for performance improvement and CO2 sequestration. J. CO_2 Util. **51**, 101633 (2021). https://doi.org/10.1016/j.jcou.2021.101633

11. S.C. Kou, B.J. Zhan, C.S. Poon, Use of a CO_2 curing step to improve the properties of concrete prepared with recycled aggregates. Cem. Concr. Compos. **45**, 22–28 (2014). http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2013.09.008

12. S. Geetha, K. Ramamurthy, Properties of geopolymerised low-calcium bottom ash aggregate cured at ambient temperature. Cem. Concr. Compos. **43**, 20-30 (2013).http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2013.06.007

The slump value due to the CO_2 mineralization was deemed to be acceptable with negligible reduction.

2. In the present investigation, the best performance of concrete, in terms of compressive strength and resistance to carbonation, is obtained when a small amount of CO_2 between 0.2 and 0.3% by the mass of the cement is used as a admixture.

3. The results of the accelerated carbonation test reveal that using CO_2 in concrete production does not affect the pH value and the additional risk of steel corrosion. CO_2 is beneficially used in the proposed strategy. Hence, CO_2 is a viable admixture to improve concrete performance.

4. The SEM study revealed that the mineralization of CO_2 into concrete produces $CaCO_3$ particles that range in size from nano to sub-microns, adding more heterogeneous nucleation sites for the hydration of OPC

13. M.E. Kumar, K. Ramamurthy, Influence of production on the strength, density and water absorption of aerated geopolymer paste and mortar using Class F fly ash. Constr. Build. Mater. **156,** 1137-1149 (2017). http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.08.153

14. L. Rosa, V. Becattini, P. Gabrielli, A. Andreotti, M. Mazzotti, Carbon dioxide mineralization in recycled concrete aggregates can contribute immediately to carbon-neutrality. Resour. Conserv. Recycl. **184**, 106436 (2022). https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2022.106436

15. Dixit, H. Du, S.D. Pang, Carbon capture in ultra-high performance concrete using pressurized CO_2 curing. Constr. Build. Mater. **288**, 123076 (2021).https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.123076

16. D. Sharma, S. Goyal, Accelerated carbonation curing of cement mortars containing cement kiln dust: An effective way of CO_2 sequestration and carbon footprint reduction. J. Clean. Prod. **192**, 844–854 (2018). https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.05.027

17. S. Monkman, Y. Shao, Assessing the Carbonation Behavior of Cementitious Materials. J. Mater. Civ. Eng. **18**, 768–776 (2006). DOI:10.1061/ASCE08991561200618:6768

18. N. Liyana, M. Kamal, Z. Itam, Y.Sivaganese, S. Beddu, Carbon dioxide sequestration in concrete and its effects on concrete compressive strength. Mater. Today Proc., **31**, A18–A21 (2020).https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.11.185.

19. D. Wang, T. Noguchi, T. Nozaki, Y. Higo, Investigation on the fast carbon dioxide sequestration speed of cement- based materials at 300 C–700 C. Constr. Build. Mater. **291**, 123392 (2021).https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.123392

20. S. Monkman, M. MacDonald, On carbon dioxide utilization as a means to improve the sustainability of ready-mixed concrete. J. Clean. Prod. **167**, 365–375 (2017). http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.08.194

21. X. Qian, J. Wang, Y. Fang, L. Wang, Carbon dioxide as an admixture for better performance of OPC-based concrete. J. CO_2 Util. **25**, 31–38 (2018). https://doi.org/10.1016/j.jcou.2018.03.007

22. R.B. Chokkalingam, M. Santhanam, Durability characteristics of high early strength concrete. Curr. Sci. **113**, 1568–1577 (2017). doi: 10.18520/cs/v113/i08/1568-1577

23. ASTM C150/C150M – 16: Standard Specification for Portland Cement. ASTM International, 100 Barr Harbor Drive, P.O. Box C700, West Conshohocken, PA 19428-2959. United States.

24. ASTM C33/C33M − 18 Standard Specification for Concrete Aggregates. ASTM International, 100 Barr Harbor Drive, P.O. Box C700, West Conshohocken, PA 19428-2959. United States.

25. ASTM C618-15: Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete. ASTM International, 100 Barr Harbor Drive, P.O. Box C700, West Conshohocken, PA 19428-2959. United States.

26. ASTM C 1602/C 1602M-04 - Standard Specification for Mixing Water Used in the Production of Hydraulic Cement Concrete. ASTM International, 100 Barr Harbor Drive, P.O. Box C700, West Conshohocken, PA 19428-2959. United States.

27. A.C.I. 211.1-91: Standard Practice for Selecting Proportions for Normal, Heavyweight, and Mass Concrete (Reapproved 2002). A.C.I. World Headquarters 38800 Country Club Dr. Farmington Hills, MI48331-3439 USA.

28. IS 1199-2018 (Part-1) Fresh Concrete — Sampling of Fresh Concrete. Bureau of Indian Standards, New Delhi, 2018.

29. IS 1199 (Part-5) Fresh Concrete — Making and Curing of Test Specimens. Bureau of Indian Standards, New Delhi, 2018.

30. IS 516 (Part-1/Sec-1) Hardened Concrete — Methods of Test, Compressive, Flexural and Split Tensile Strength. Bureau of Indian Standards, New Delhi, 2021.

31. IS 516 (Part-2/Sec-4) Hardened Concrete — Methods of Test, Determination of the Carbonation Resistance by Accelerated Carbonation Method. Bureau of Indian Standards, New Delhi, 2021.

32. IS 516 (Part-5/Sec-3) Hardened Concrete — Methods of Test, Carbonation Depth Test. Bureau of Indian Standards, New Delhi, 2021.

33. ASTM C 1723-10 Standard Guide for Examination of Hardened Concrete Using Scanning Electron Microscopy. ASTM International, 100 Barr Harbor Drive, P.O. Box C700, West Conshohocken, PA 19428-2959. United States.

34. S. Gupta, Carbon sequestration in cementitious matrix containing pyrogenic carbon from waste biomass: A comparison of external and internal carbonation approach. J. Build. Eng. **43**, 102910 (2021).https://doi.org/10.1016/j.jobe.2021.102910

35. R.G. Pillai, R. Gettu, M. Santhanam, Use of supplementary cementitious materials (S.C.M.s) in reinforced concrete systems – Benefits and limitations. Rev. ALCONPAT. **10**, 147–164 (2020). https://doi.org/10.21041/ra.v10i2.477

36. IS 456: 2000 (2021) Plain and reinforced concrete- Forth revision, Bureau of Indian Standards, Manak Bhavan, 9 Bahadur Shah Zafar Marg, New Delhi-110002.

37. Y. Wu, H. Mehdizadeh, K.H. Mo, T.C. Ling, High-temperature CO_2 for accelerating the carbonation of recycled concrete fines. J. Build. Eng. **52**, 104526 (2022).https://doi.org/10.1016/j.jobe.2022.104526

38. C. Liang, N. Lu, H. Ma, Z. Ma, Z. Duan, Carbonation behavior of recycled concrete with CO_2-curing recycled aggregate under various environments. Journal of J. CO_2Util. **39**, 1–13 (2020).https://doi.org/10.1016/j.jcou.2020.101185

39. V. Francioso, C. Moro, I. Martinez-Lage, M. Velay-Lizancos, Curing temperature: A key factor that changes the effect of TiO_2 nanoparticles on mechanical properties, calcium hydroxide formation and pore structure of cement mortars. Cem. Concr. Compos. **104,** 103374 (2019).https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2019.103374

40. V.W.Y. Tam, A. Butera, K.N. Le, Microstructure and chemical properties for CO_2 concrete. Constr. Build. Mater. **262**, (2020). https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120584

41. S. Monkman, B.E.J. Lee, K. Grandfield, M. MacDonald, L. Raki, The impacts of in-situ carbonate seeding on the early hydration of tricalcium silicate. Cem. Concr. Res. **136**, 106179 (2020).https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2020.106179 .