

Julia Amelia Pietrzyk (julia.pietrzyk@student.pk.edu.pl)

 <https://orcid.org/0009-0003-3782-2454>

Studentka, Politechnika Krakowska im. Tadeusza Kościuszki, Wydział Architektury

Joanna Białkiewicz (joanna.bialkiewicz@pk.edu.pl)

 <https://orcid.org/0000-0002-8827-9397>

Politechnika Krakowska im. Tadeusza Kościuszki, Wydział Architektury

Materiały przyszłości. Ekologiczne alternatywy dla tradycyjnego betonu w budownictwie i architekturze

Materials of the future. Ecological alternatives to traditional concrete in architectural construction and architecture

Streszczenie

Aktualnie branża architektoniczna i budowlana związana jest z dużą emisją dwutlenku węgla, zatem poszukuje się materiałów przyjaznych środowisku naturalnemu oraz nowych metod ich aplikacji. Celem artykułu jest porównanie ekologicznych alternatyw do powszechnie stosowanego, jakimi są m.in.: CO₂-SUICOM, biobeton z cyjanobakteriami, beton samonaprawialny oraz beton konopny. Omówione zostaną także metody druku 3D wychwytyjącego i pochłaniającego CO₂.

Słowa kluczowe: architektura, CO₂-SUICOM, biobeton, beton konopny, druk 3D

Abstract

The architecture and construction industry is associated with high carbon emissions, so low-carbon materials and new methods of application are being sought. The aim of this paper is to compare eco-friendly alternatives to commonly used concrete, in particular CO₂-SUICOM, bioconcrete with cyanobacteria, self-repairing concrete and hempcrete. CO₂-capturing and absorbing 3D printing methods will also be discussed.

Keywords: architecture, CO₂-SUICOM, bio-concrete, hemp concrete, 3D printing

1. WSTĘP

Beton jest jednym z najpowszechniej wykorzystywanych materiałów w budownictwie i architekturze. Odgrywa istotną rolę zarówno w inżynierii lądowej, jak i w realizacji konstrukcji architektonicznych. Stosuje się go do wytwarzania elementów o niewielkich wymiarach oraz do budowy obiektów inżynierskich o dużej powierzchni. Pełni również funkcję podstawowego materiału konstrukcyjnego w procesie wznoszenia budynków, zapewniając im odpowiednią trwałość i stabilność. Popularność betonu wynika z jego wysokiej wytrzymałości na ściskanie, odporności na czynniki atmosferyczne oraz łatwej dostępności surowców niezbędnych do produkcji. Dodatkowym atutem jest relatywnie niski koszt wytwarzania i obróbki, co sprawia, że beton stanowi materiał ekonomiczny i powszechnie stosowany w nowoczesnym budownictwie. Cement, kluczowy komponent betonu, ma negatywny wpływ na klimat, ponieważ jego produkcja wiąże się z emisją znacznych ilości dwutlenku węgla. W trosce o środowisko naturalne trwają badania nad modyfikacjami materiałów budowlanych, jak na przykład betonu w celu zmniejszenia śladu węglowego w atmosferze. Badania dowiodły, że możliwe jest wyprodukowanie różnych odmian betonu absorbującego CO₂, co w znacznym stopniu przyczyniłoby się do ochrony planety przed szkodliwymi emisjami (Torichigai, 2022; Fraunhofer Institut, 2025; Beściak, Śmiszek-Lindert, Lewicka, 2018). Są to rozwiązania niezwykle innowacyjne, które w przyszłości mogą stać się popularne na skalę światową. Dowodem na duży potencjał tego typu materiałów są badania porównawcze ekologicznych alternatyw betonu i samego betonu.

Celem artykułu jest wykazanie, dlaczego tak istotne jest dostrzeżenie zamienników zwykłego betonu i zwrócenie uwagi, w jakich aspektach nowoczesne materiały przyszłości przeważają nad tymi tradycyjnymi. Ekologiczne i innowacyjne zamienniki tradycyjnego betonu, a także technologie druku 3D wykorzystujące materiały o właściwościach pochłaniania dwutlenku węgla, stanowią perspektywiczną alternatywę dla konwencjonalnych rozwiązań betonowych. Ich zastosowanie może znacząco ograniczyć negatywny wpływ sektora budowlanego na środowisko naturalne poprzez redukcję emisji CO₂, przy jednoczesnym zachowaniu wymaganych parametrów technicznych i użytkowych materiałów konstrukcyjnych. Porównanie ekologicznych alternatyw betonu z tradycyjnym poszerza świadomość projektantów na temat zrównoważonego projektowania.

1.1. METODYKA BADAŃ

W ramach badań dokonano przeglądu literatury naukowej dotyczącej ekologicznych, innowacyjnych zamienników tradycyjnego betonu. Na podstawie dostępnych danych opracowano tabele porównawcze, uwzględniające jego charakterystykę oraz właściwości materiałów takich jak CO₂-SUICOM, biobeton i beton konopny. Ponadto przeprowadzono porównanie technologii druku 3D z wykorzystaniem betonu pochłaniającego dwutlenek węgla z jej konwencjonalnym odpowiednikiem. Przeanalizowano próby doświadczalne naukowców z Nanyang Technological University (NTU) w Singapurze, zajmujących się badaniami nad innowacyjnym

drukiem 3D. NTU wspiera także centrum badań Singapore Center for 3D Printing (SC3DP), aktywne od 2014 roku. Naukowcy z SC3DP wykorzystują specjalny sprzęt i technologie do eksperymentów, przeprowadzają kontrole materiałów z użyciem sztucznej inteligencji oraz zbioru danych w celu optymalizacji procesów (SC3DP, NTU, b.r.). Uzyskane wyniki pozwoliły na ocenę potencjalnych korzyści i ograniczeń badanych rozwiązań, co zostało ujęte we wnioskach. Przeprowadzone analizy, których wyniki zaprezentowano w tabelach porównawczych, umożliwiły sformułowanie wniosków dotyczących potencjalnych korzyści i ograniczeń badanych rozwiązań. Badania miały charakter przeglądowy i analityczny, opierały się głównie na dostępnej literaturze naukowej oraz wynikach eksperymentalnych ośrodków badawczych.

2. ANALIZA PORÓWNAWCZA MATERIAŁÓW BUDOWLANYCH

2.1. CO₂-SUICOM

2.1.1. BADANIA NAUKOWE

Naukowcy z japońskiej firmy Kajima, The Chugoku Electric Power Co., Denka i Landes Co. opracowali pierwszy na świecie beton wychwytyjący i pochłaniający dwutlenek węgla (Torichigai, 2022). Za cel postawili sobie osiągnięcie neutralności pod względem emisji dwutlenku węgla do atmosfery, co określa się mianem *carbon-neutral society* (neutralności węglowej). W produkowanym materiale CO₂-SUICOM (CO₂-Storage and Utilization for Infrastructure by Concrete Materials) ponad połowa cementu zostaje zastąpiona bardziej przyjaznym dla środowiska substytutem γ -2CaOSiO₂ (odmiana γ krzemianu dwuwapniowego). Już w starożytności wykorzystywano technikę karbonatyzacji. W XX w. na stanowisku Dadiwan w Xi'an w Chinach odkryto betonową konstrukcję, której wiek określono na około 5000 lat (Kajima Corp., 2012). Badania dowiodły, że obiekt jest niezwykle trwały dzięki nasyceniu dwutlenkiem węgla. Powierzchnia starożytnego betonu wytwarzanego z popiołu wulkanicznego i wapna okazała się być niezwykle gęsta dzięki długotrwałej reakcji chemicznej z naturalnym CO₂. Zapobiegło to erozji spowodowanej przez wodę i czynniki atmosferyczne. Proces wychwytywania i pochłaniania dwutlenku węgla przez CO₂-SUICOM porównywany jest z wychwytywaniem go przez drzewa z atmosfery. Innowacyjny substytut γ -2CaOSiO₂ zastępujący cement twardnieje, absorbując duże ilości dwutlenku węgla (Torichigai i in., 2009). Wykorzystywane są przy tym reakcje chemiczne. Substancją utwardzającą w tym procesie jest dwutlenek węgla, w przypadku zwykłego betonu jest to woda. Podczas produkcji CO₂-SUICOM zachodzi reakcja karbonatyzacji dwutlenku węgla i specjalnej domieszki oraz – tak jak w procesie produkcji zwykłego betonu – reakcja hydratacji wody i cementu. Po zmieszaniu materiałów potrzebnych do produkcji CO₂-SUICOM beton można umieścić w miejscu o wysokim stężeniu dwutlenku węgla, aby mógł go wychwycić i stwardnieć. Przykładowo doskonale wychwytuje i pochłania duże ilości CO₂ zawarte w spalinach z elektrowni ciepłych. Próbkę

takiego betonu można umieścić w komorze sekwestracji dwutlenku węgla. Tego typu badania prowadzono w elektrowni MISUMI – elektrowni ciepłej opalanej węglem (Yoshioka i in., 2013). Od 2009 r. spaliny generowane w elektrowni zasysane są do komory utwardzania, a dwutlenek węgla zawarty w spalinach absorbowany jest przez beton. Następnie spaliny wracają do pierwotnego ciągu z komory i są odprowadzane przez komin.

Podczas gdy proces produkcji standardowego betonu wytwarza około 288 kg/m^3 , liczba ta jest o około 197 kg/m^3 mniejsza w przypadku CO_2 -SUICOM, ponieważ ponad połowa cementu jest zastępowana produktami o niskiej emisji CO_2 i innymi materiałami. Ponadto sam beton może wychwycić i pochłonąć około 109 kg/m^3 . Daje to całkowitą redukcję emisji dwutlenku węgla o około 306 kg/m^3 , czyli całkowitą emisję -18 kg/m^3 (Torichigai, 2022).

Japonia postawiła sobie za cel zmniejszenie emisji ogromnych ilości dwutlenku węgla po przeanalizowaniu danych raportowych. Według danych z 2018 roku (Kardaś, 2018) Japonia okazała się być jednym z największych emitentów CO_2 na świecie, zajmując piąte miejsce za Chinami, Stanami Zjednoczonymi, Indiami i Rosją. Dane te zostały zebrane przez międzynarodowy zespół Global Carbon Project, który podsumował globalne i krajowe emisje gazów cieplarnianych (Le Quéré i in., 2018). W 2015 roku miała miejsce 21. konferencja stron Ramowej Konwencji Narodów Zjednoczonych w sprawie zmian klimatu (COP21), podczas której przyjęto porozumienie paryskie. Rząd Japonii wyznaczył cel redukcji emisji gazów cieplarnianych o 80% do 2050 roku (Yokokawa, Yokozecki, 2023). Określono szczegółowe wytyczne, które umożliwiają śledzenie postępów i ocenę skuteczności działań mających na celu łagodzenie zmian klimatycznych (Budziszewska, Kardaś, Bohdanowicz, 2021).

Według rocznego raportu z 2008 r. dotyczącego produkcji, opublikowanego przez Ministerstwo Gospodarki, Handlu i Przemysłu z Japonii (Statistics of Resources, Ceramics and Building Materials), w Japonii wyprodukowano około $3,5 \text{ mln m}^3$ produktów betonowych¹, takich jak elementy do budowy dróg. Gdyby wszystkie te produkty zostały zastąpione betonem CO_2 -SUICOM, redukcja emisji dwutlenku węgla wyniosłaby około 1 mln ton. Całkowita redukcja emisji w ciągu ostatnich czterech lat z 644 zarejestrowanych do tej pory projektów wynosi 2,51 mln ton, co wyraźnie pokazuje potencjał nowego betonu (Torichigai, 2022).

Dzięki przygotowanemu zestawieniu można dowiedzieć, że wytrzymałość CO_2 -SUICOM może być tak silna jak wytrzymałość zwykłego betonu. Ponadto zaobserwowano niskie wykwity na elewacjach, nowy materiał jest niezwykle odporny na zużycie. Zjawisko wybielania jest zauważalne na elementach wykonanych z klasycznego betonu. Są to złogi soli, które skrzystalizowały się z wody w betonie – mogą powstawać pod wpływem wilgoci czy ciągłych zmian warunków temperatury. Gdy woda z elewacji paruje, zawarta w niej sól krystalizuje się i zacieka. Niestety w związku z koniecznością stosowania specjalnych materiałów i nietypowych metod zawartych w procesie produkcyjnym, koszty produkcji CO_2 -SUICOM są większe niż

¹ Podana liczba może wynikać z oszacowania objętości elementów betonowych. W raporcie z 2008 r. liczba produktów betonowych wyrażona jest w tonach (Ministry of Economy, Trade and Industry of the Government of Japan, 2008: 38).

w przypadku tradycyjnego betonu. Trudno go także stosować do produktów zawierających zbrojoną stal. Zastosowanie CO₂-SUICOM dotychczas było ograniczone do stosunkowo niewielkich, niezbrojonych prefabrykatów. Wynika to z faktu, że powszechnie uważano, że użycie stalowych prętów zbrojeniowych mogłoby spowodować przedwczesną korozję w wyniku reakcji karbonatyzacji. Materiał jest potencjalnym środkiem mogącym powstrzymać globalne ocieplenie na całym świecie. Rocznie w Japonii wykorzystuje się 91 mln m³ betonu w budownictwie. Zastąpienie go betonem CO₂-SUICOM mogłoby zmniejszyć emisję CO₂ o 27,84 mln ton rocznie, co stanowi około jednej trzeciej ilości dwutlenku węgla pochłanianego przez japońskie lasy. Zmniejszenie emisji CO₂ wiąże się ze zmniejszeniem emisji gazów cieplarnianych i obniżeniem średniej temperatury na Ziemi (Kajima Corp., b.r.). Zwykły beton ma stosunkowo wysokie pH (12–13), przy czym dla porównania pH CO₂-SUICOM zbliżone jest do neutralnego. Dlatego też materiał jest nieszkodliwy dla roślin i innych organizmów żywych.

Tabela 1. Analiza porównawcza betonu tradycyjnego i CO₂-SUICOM. Oprac. aut.

BADANY ASPEKT	BETON ZWYKŁY	CO ₂ -SUICOM
Przygotowanie mieszanki betonowej	Woda, cement, kruszywo i ewentualne domieszki	Woda, cement, kruszywo i γ-2CaOSiO ₂
Substancja utwardzająca	Woda	Dwutlenek węgla
Zachodzące reakcje	Hydratacja – reakcja między wodą a cementem	Reakcja karbonatyzacji dwutlenku węgla i γ-2CaOSiO ₂ , reakcja hydratacji wody i cementu
Emisja dwutlenku węgla	200–400 kg/m ³	–18 kg/m ³
Wytrzymałość	Wytrzymałość CO ₂ -SUICOM może być tak silna jak wytrzymałość zwykłego betonu	
Wykwity	Większa podatność na krystalizację soli zawartej w parze wodnej powstającej z wody osadzającej się na elewacji i powstawanie białych śladów i zacieków na elewacjach	Niskie wykwyty, doskonała odporność na zużycie
Koszty produkcji	Niższe koszty	Wyższe koszty produkcji ze względu na specjalne materiały i metody zawarte w procesie produkcyjnym
Zbrojenie	Bezproblemowe stosowanie stali w konstrukcjach zbrojonych	Trudno go stosować do produktów zawierających zbrojoną stal
pH	Wysokie, 12–13	Zbliżone do neutralnego – materiał nieszkodliwy dla roślin i innych żywych organizmów

2.1.2. ZASTOSOWANIE

CO₂-SUICOM ma wiele przykładów sukcesywnego zastosowania. Użyto go po raz pierwszy w pracach budowlanych w Highway Bridge Piers. Szalunek Stay-In-Place wykonany z CO₂-SUICOM zastał po raz pierwszy zastosowany do budowy filarów mostów autostradowych. Wykorzystano go na odcinku konstrukcyjnym Ebie drogi ekspresowej Hansin (Osaka Prefecture), wybudowanym przez Kajima Corporation. Zastosowanie tego materiału w szalunkach pozostających na miejscu spowodowało pochłonięcie 10% emisji dwutlenku węgla, co pozwoliło osiągnąć –59 kg/m³ (Kajima Corp., b.r.). Na placach budowy zaczęto wdrażać także system minimalizujący zużycie odpadów betonowych, np. na placu budowy dużego zakładu produkcyjnego w prefekturze Kumamoto. Dodano tam proste urządzenie do zakładowej oczyszczalni ścieków. Po wypłukaniu i usunięciu kruszywa z odpadów betonowych powstała zawiesina cementowa była przepuszczana przez specjalne urządzenie wytwarzające drobne pęcherzyki, które skutecznie pochłaniały i mineralizowały dwutlenek węgla. Odzyskane kruszywo mogło być dzięki temu ponownie wykorzystane jako materiał na podbudowę drogi na placu budowy. Powstały zapowiedzi planów jeszcze większego ograniczenia emisji CO₂ poprzez wychwytywanie i pochłanianie spalin z ciężkich maszyn używanych na placu budowy i wykorzystanie ich do przetwarzania odpadów betonowych (Kajima Corp., b.r.).

Firma Kajima, we współpracy z Sanwa Sekisan Co. i Uniwersytetem Taikai, opracowała dwa rodzaje materiałów: Cem R³, powstający z przetworzonej niewykorzystanej nadwyżki betonu, oraz Eco-Crete R³, czyli beton wykonany z cementu pochodzącego z recyklingu. Takie podejście pozwala na osiągnięcie bardziej zrównoważonego cyklu produkcji betonu.

CO₂-SUICOM ma także zastosowanie w architekturze. Inspiracje można czerpać z budynku Wall House w Japonii autorstwa Nendo Architektki z 2024 roku (Abdel, 2024). Projekt jest prywatną rezydencją w Ganaize w prefekturze Nagano. Wzdłuż drogi znajduje się unikalny



Il. 1. Elewacja Wall House w Japonii z CO₂-SUICOM (Abdel, 2024)

budynek o długości 110 metrów. Zaprojektowano m.in. betonową ścianę, która stanowi ogrodzenie budynku (szeroka ściana frontowa) (il. 1). Odpowiednio dostosowano kąt ułożenia każdego bloczka betonowego. Użyto około 2050 elementów, tworząc 5 ścian o wysokości 3 m z różnych stron budynku. Przestrzeń wnętrza jest zaprojektowana tak, by wypełniała lukę pomiędzy tak powstałymi ścianami betonowymi. Płynnie udało się połączyć wnętrze z zewnętrznymi ścianami z CO₂-SUICOM.

2.2. BIOBETON

2.2.1. BADANIA NAUKOWE

Innym rozwiązaniem przyszłościowym może być dodanie roztworu bakteryjnego do mieszanki betonowej. Jeden z takich produktów opracowali badacze z Fraunhofer-Gesellschaft z Niemiec (Fraunhofer IKTS, 2024). Udowodnili, że biogenne materiały budowlane mogą powstawać na bazie sinic, przy wykorzystaniu procesu fotosyntezy (il. 2). Bakterie mnożą się w roztworze składników odżywczych w warunkach laboratoryjnych (il. 3). Solidne struktury podobne do skał powstają dzięki uzupełnieniu dodatków i wypełniaczy, takich jak bazalt, piasek czy surowce odnawialne (il. 4). Według Federalnej Agencji Środowiska (UBA – *Umwelt Bundes AMT*) w samych Niemczech w 2018 r. wytworzono około 20 mln ton CO₂ (Fraunhofer IKTS, 2024). Odpowiada to około 10% emisji przemysłowych. Naukowcy z Fraunhofer Institute for Ceramic Technologies and Systems IKTS oraz Fraunhofer Institute for Electron Beam and Plasma Technology FEP zaprezentowali specjalny proces produkcji biogennych materiałów w projekcie „BioCarboBeton”. Była to odpowiedź na dane liczbowe obrazujące emisję dwutlenku węgla do atmosfery. Utworzenie trwałych związków chemicznych, na przykład węglanu wapnia, oznacza skuteczne związanie dwutlenku węgla, który następnie zatrzymywany jest w skale biogenicznej. Tego typu struktury istniały około 3,5 mld lat temu, co jest dowodem na trwałość wspomnianego procesu – wytrącania węglanu wapnia i wiązania dwutlenku węgla (Fraunhofer IKTS, 2024).

Produkcja betonu z cyjanobakteriami przebiega na kilku etapach. W pierwszym etapie wrażliwe na światło cyjanobakterie hodowane są w roztworze odżywczym w celu wytworzenia biomasy. Próbkę materiału biologicznego przybierają kolor zielony dzięki chlorofilowi żywych bakterii. Intensywność i kolor zastosowanego źródła światła wpływają na ich fotosyntezę i metabolizm. Do roztworu bakteryjnego dodawane są źródła wapnia, na przykład chlorek wapnia, aby doprowadzić do mineralizacji. Opracowywana jest mieszanina hydrożeli i różnych wypełniaczy, na przykład różnych rodzajów piasków. Proces wspomaga dodatkowe wstrzyknięcie CO₂. Tak przygotowany materiał musi być wymieszany do uzyskania jednolitej mieszaniny. Poprzez wypełnienie go formami, można go strukturyzować. Aby umożliwić kontynuację metabolizmu i fotosyntezy bakterii, najlepiej stosować półprzezroczyste formy. Przygotowana masa bakteryjna może być również wprowadzona do formy poprzez

właczanie bądź natryskiwanie. W ten sposób można uzyskać stały produkt oparty na biogennym węglanie wapnia i wypełniaczach. Bakterie całkowicie obumierają. Tego typu materiały budowlane wykonane z cyjanobakterii nie zawierają żadnych toksycznych substancji. Ponadto użyte wcześniej bakterie zwiększają odporność korozyjną betonu. W przypadku zastosowania zbrojenia bakterie zużywają tlen, co zapobiega wewnętrznej korozji zbrojenia betonu. Materiał jest wyjątkowo delikatny dla roślin i innych żywych organizmów, ponieważ pH biobetonu zbliżone jest do neutralnego.



Il. 2. Żywy materiał biologiczny (©Fraunhofer IKTS, 2024).
Za zgodą A. Ballin



Il. 3. Fotobioreaktor Fraunhofer FEP do hodowli mikroorganizmów fototroficznych w skali laboratoryjnej w określonych warunkach oświetlenia, temperatury i gazów (©Fraunhofer FEP, 2024). Za zgodą U. König



Il. 4. Zmineralizowany, stały kamień porowaty (©Fraunhofer IKTS, 2024). Za zgodą A. Ballin

2.2.2. ZASTOSOWANIE

Z biobetonu można tworzyć materiały do różnych zastosowań w zależności od odpowiedniego doboru wypełniaczy. Niezbędna jest tu także kontrola parametrów procesu mineralizacji. Z mieszanki z cyjanobakteriami powstają materiały izolacyjne, cegły i wypełnienia szalunków, a także zaprawy i tynki elewacyjne, które twardnieją po nałożeniu. Biobeton można wykorzystać jako zamiennik części konstrukcyjnych, np. w postaci uformowanych z niego bloczków. Naukowcy sugerują, że biobeton może znaleźć zastosowanie w gospodarce o obiegu zamkniętym, w której CO₂ dodany do mieszaniny z roztworem bakteryjnym może być pozyskiwany zarówno z gazów przemysłowych i kopalnianych szkodliwych dla środowiska, jak i z odpadowych produktów mleczarskich. Obecnie w tym celu wykorzystywany jest biogaz. Naukowcy z instytutów Fraunhofer IKTS i Fraunhofer FEP nadal pracują nad zwiększeniem skali produkcji (Fraunhofer Institut, 2025).

2.2.3. SAMONAPRAWIALNY BIOBETON

Eksperymenty z różnymi rodzajami bakterii w produkcji biobetonu poprowadziły do uzyskania samonaprawialnego betonu samodzielnie usuwającego powstające w nim pęknięcia. Bakterie wprowadzone do betonu przechodzą w stan uśpienia i w takiej postaci pozostają kilkadziesiąt lat. Mikropęknięcia w betonie powstają na skutek występujących w nim naprężeń. Różnego rodzaju odkształcenia związane są ze zjawiskami takimi jak skurcz i pęcznienie. Niektóre mikropęknięcia powstają już w trakcie twardnienia masy betonowej, wystąpienia ich nie da się uniknąć. Graniczne szerokości rys według PN-EN 1992-1-1:2008 wahają się w granicach 0,2–0,3 mm, większe rozwartości mogłyby spowodować przekroczenie stanu granicznego użyteczności. Powstawanie zarysowań wraz z upływem czasu sprzyja korozji betonu, co skutkuje szybszym zniszczeniem materiału. Przez szczeliny przecieka woda, co powoduje powiększanie się dziur. Badania nad stworzeniem samonaprawialnego biobetonu od 2006 roku prowadzi mikrobiolog z holenderskiego Uniwersytetu Technicznego w Delft Henk Jonkers (Beściak, Śmiszek-Lindert, Lewicka, 2018). Stosuje on mikroorganizmy, których metabolizm prowadzi do powstawania węglanu wapnia, który pełni funkcję spoiwa w betonie. Zauważył szczególne cechy bakterii, które mają zdolność do przeżycia w najbardziej skrajnych warunkach środowiska. Wypełnianie rys dotyczy jednak takich o rozwartości do 50 µm, rysy o szerokości większej niż dopuszczone w normie nie mogą zostać wypełnione w wyniku samoleczenia, ponieważ skutkowałoby to zmniejszeniem objętości mieszanki cementowo-wodnej na skutek procesu hydratacji. Większa zawartość cementu zwiększa możliwości samoleczenia. Współcześnie promowane są metody ograniczające zużycie cementu. Za technologie niskoemisyjne uważa się różne modyfikacje krzemianowo-wapniowe. Naukowcy starają się zastępować pewną ilość cementu i poprawić wydajność w betonie za pomocą domieszek chemicznych, a nie znacząco zmieniać mieszanki surowców (Lehne, Preston, 2018).

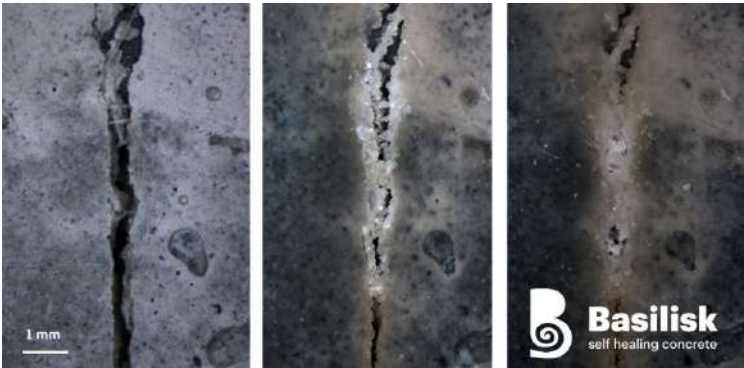
Jonkers do eksperymentów użył bakterii z rodzaju *Bacillus*. Spoiwem w takim biobetonie jest węglan wapnia wytwarzany przez te bakterie, które przyczyniają się do naprawy pęknięć

w wyniku metabolizmu. Uaktywniają się podczas kontaktu materiału z wodą. Do wytworzenia węglanu wapnia może dojść w procesie rozkładu mocznika przez bakterie ureolityczne. Bakterie pozostają aktywne w środowisku, gdzie ilość substancji odżywczych jest znikoma. Gatunek musi wytwarzać spory, czyli formy spoczynkowe umożliwiające organizmom przetrwanie niekorzystnych warunków, ponieważ tylko w takiej formie można wprowadzić bakterie do mieszanki betonowej bez straty ich aktywności. Zużywanie tlenu przez bakterie zapobiega wewnętrznej korozji zbrojenia betonu. Spory bakterii najlepiej umieszczać w specjalnej otoczce, aby komórki nie uaktywniały się zbyt wcześnie. W momencie gdy do szczeliny w betonie dostaje się woda, zwiększa się wilgotność betonu, a przetrwalniki aktywują się, zaczyna powstawać węglan wapnia w wyniku procesów metabolicznych komórek bakterii, a powstałe mikropęknięcia zrastają się. Spory umieszczone bezpośrednio w betonie szybko tracą swoją żywotność ze względu na duże pH betonu. Wpływ na to może mieć także hydratacja cementu, która prowadzi do zmniejszenia porów mniejszych od sporów. Otoczką mogą być cząstki gliny, mikrokapsułki melaminowe bądź żel krzemionkowy. Dzięki temu również sam biobeton będzie miał właściwości samolecznicze przez dłuższy czas. W procesie samoleczenia betonu istnieje także metoda dodawania kapsułek sferycznych lub cylindrycznych wpływających na proces leczenia. Do elementu betonowego wprowadza się kapsułki zawierające monomer oraz kapsułki zawierające katalizator. W momencie powstania rysy kapsułki niszczą się, a składniki z ich wnętrza mieszają się ze sobą po uwolnieniu. Monomer wypełnia rysę, ulegając polimeryzacji.

Przeprowadzono wiele badań nad wpływem bakterii i dodawanych substancji odżywczych na właściwości betonu (Beściak, Śmiszek-Lindert, Lewicka, 2018). Badania prowadził zespół Jonkersa. Pożywką były wówczas: ekstrakt drożdżowy, pepton, octan wapnia lub mleczan wapnia. Dodawanie ekstraktu drożdżowego, peptonu lub octanu wapnia do mieszanki betonowej powoduje zmniejszenie wytrzymałości betonu na ściskanie. Wzrost wytrzymałości betonu powoduje dodanie mleczanu wapnia. Inne doświadczenia, m.in. Salah A. Abo-EL-Enina, wykazały, że większa zawartość bakterii, których aktywność metaboliczna powoduje strącanie CaCO_3 , zmniejszała nasiąkliwość betonu. Wzrost wytrzymałości na ściskanie jest wprost proporcjonalny do zwiększania udziału bakterii od 1 OD (*optical density* – gęstość optyczna).

2.2.4. ZASTOSOWANIE

Samonaprawialny beton chętnie stosowany jest do naprawy już istniejących budowli z betonu i kamienia do renowacji budynków. Sprawdza się w pracach nad konserwacją zabytków. Materiał ten ma szczególne znaczenie w procesie oczyszczania wody w zbiornikach z wodą stojącą. Zastosowanie płytek z biobetonu pozwala także na usunięcie nieprzyjemnego zapachu z jezior, stawów, brzegów rzek czy kanałów. Używany jest także do budowy zbiorników na wodę. Firma Restoration Partners LLC wprowadziła na rynek amerykański beton samonaprawialny Basilisk – technologię opracowaną przez Jonkersa (Restoration Partners LLC, 2024) – i udowodniła właściwości naprawcze materiału (il. 5).



Il. 5. Rzeczywiste zdjęcie procesu naprawy betonu za pomocą środka samonaprawiającego Basilisk (Restoration Partners LLC, 2024). Za zgodą I. Juliao

Tabela 2. Analiza porównawcza tradycyjnego betonu i biobetonu. Oprac. aut.

BADANY ASPEKT	BETON ZWYKŁY	BIOBETON
Przygotowanie mieszanki betonowej	Woda, cement, kruszywo i ewentualne domieszki	Roztwór z cyjanobakteriami, źródła wapnia (chlorek wapnia), mieszanina hydrożeli i wypełniaczy
Substancja utwardzająca	Woda	Dwutlenek węgla
Zachodzące reakcje	Hydratacja – reakcja między wodą a cementem	Fotosynteza bakterii, mineralizacja po dodaniu źródeł wapnia do roztworu bakteryjnego, wspomaganie procesu poprzez wstrzyknięcie CO ₂
Emisja dwutlenku węgla	200–400 kg/m ³	Absorbcja
Wytrzymałość na ściskanie	Dodanie mleczanu wapnia powoduje zwiększenie wytrzymałości betonu na ściskanie. Wytrzymałość na ściskanie zwiększa się wraz ze wzrostem udziału bakterii od 1 OD	
Nasiąkliwość	Wymagana nasiąkliwość betonu – 4–9%	Zastosowanie bakterii, których aktywność metaboliczna powoduje strącanie węglanu wapnia, powoduje poprawę nasiąkliwości. Większa zawartość komórek bakteryjnych powoduje zmniejszenie nasiąkliwości betonu

BADANY ASPEKT	BETON ZWYKŁY	BIOBETON
Korozja	Podatność na korozję pod wpływem działania warunków atmosferycznych	Bakterie zwiększają odporność korozyjną betonu
Rysy/pęknięcia	Skurcz i pęcznienie przyczyną występowania rys	Zastosowanie odpowiedniego rodzaju bakterii może prowadzić do samoleczenia betonu, naprawa uszkodzeń (przykład – bakterie z rodzaju <i>Bacillus</i>)
Zbrojenie	Bezproblemowe stosowanie stali w konstrukcjach zbrojonych. Zbrojenie z czasem może ulec korozji	Bakterie zużywają tlen, co zapobiega wewnętrznej korozji zbrojenia betonu
pH	Wysokie, 12–13	Zbliżone do neutralnego – materiał delikatny dla roślin i innych żywych organizmów
Wpływ wody	Nadmiar wody może negatywnie wpłynąć na proces wiązania i wytrzymałość struktury betonowej	Procesy metaboliczne komórek bakterii powodują powstawanie węglanu wapnia i stopniowe wypełnianie pęknięć pod wpływem zwiększenia wilgotności betonu
Koszty materiałowe	Rozwiązanie z biobetonem jest kosztowniejsze od tradycyjnych materiałów, lecz prognozowane są znaczne oszczędności w dłuższej perspektywie	

2.3. BETON KONOPNY

2.3.1. BADANIA NAUKOWE

Budownictwo naturalne ma szansę także wzbogacić produkcja betonu konopnego (hempcrete) (Sokołowski, Kossakowski, 2019). Do jego produkcji wykorzystuje się konopie. Najlepiej sprawdzają się paździerze konopne produkowane ze słomy konopnej. Przygotowanie mieszanki betonowej polega na mieszanii na mokro konopnych paździerzy ze spoiwem na bazie wapna. Wapno należy do jednych z najstarszych spoiw budowlanych. Substancją utwardzającą jest tu dwutlenek węgla. Podczas produkcji wykorzystuje się spoiwo na bazie wapna wraz z kruszywem naturalnym, organicznym. Najlepiej sprawdza się tutaj mieszanka wapna hydraulicznego i wapna hydratyzowanego oraz wody. Po zmieszanii wapna z wodą zachodzi proces krystalizacji. Uwodnione kryształki wodorotlenku wapnia zrastają się wraz

z postępującą utratą wody na skutek jej odparowywania. Po osiągnięciu odpowiedniego poziomu wilgotności przez spoiwo rozpoczyna się karbonatyzacja, czyli przyłączanie dwutlenku węgla z atmosfery do wodorotlenku wapnia. W wyniku reakcji chemicznej powstaje węglan wapnia – skała wapienna, z której zostało pozyskane wapno hydratyzowane. Można zastosować dodatki w celu poprawy wytrzymałości spoiwa wapiennego. Dodatki pucolanowe i hydrauliczne przyspieszają wiązanie i polepszają charakterystykę wytrzymałościową materiału. Pucolana zawiera krzemionkę lub krzemionkę i tlenek glinu w postaci reaktywnej. Reaguje chemicznie z wodorotlenkiem wapnia w obecności wilgoci w postaci drobnoziarnistej, tworząc w ten sposób związki mające właściwości wiążące. Pucolany mogą być dodatkiem do wapna hydratyzowanego w mieszankach wapienno-konopnych. Dla porównania w procesie produkcji zwykłego betonu w przygotowywaniu mieszanki betonowej zastosowanie ma spoiwo cementowe łączone z kruszywem mineralnym, np. żwirem. Produkcja betonu konopnego charakteryzuje się ujemnym śladem węglowym, ponieważ konopie w mieszance pochłaniają dwutlenek węgla podczas wzrostu. Mieszanek konopną nazwano „betonem”, ponieważ tutaj też następuje połączenie wypełniacza ze spoiwem. Przygotowana struktura ulega stopniowemu twardnieniu, wapno jest coraz twardsze pod wpływem procesu karbonatyzacji.

Mieszanka ubijana jest w szalunku na wysokości około 40–60 cm. Jako szalunek najlepiej sprawdza się drewniana konstrukcja szkieletowa. Kolejno do formy wsypywana jest mieszanka o konsystencji półsuchej, którą następnie ubija się. Tak przygotowany beton pozostawiany jest do wyschnięcia. Na końcu dodawane jest wykończenie – wapienny lub gliniany tynk. Można zastosować także okładziny elewacyjne drewniane lub kamienne. Beton konopny w konstrukcjach drewnianych jest wypełnieniem przegród jako materiał izolacyjny. Dodatkowo sprawdza się jako usztywnienie konstrukcji. Jest to lekki materiał i nadaje się do wykonania izolacji termicznej dachu, ściany i podłogi. Możemy otrzymać materiał o zróżnicowanej gęstości, właściwościach termoizolacyjnych, wytrzymałości i wyglądzie w zależności od użytych proporcji paździerzy konopnych i spoiwa (Lemka, 2023).

Najlepiej przygotować mieszanek suchego wapna hydratyzowanego z paździerzami konopnymi i niewielką ilością cementu w proporcji: 1 kg wapna, 1,75 kg paździerzy, 0,1 kg cementu i 1,75 kg wody. W efekcie powstaje masa o gęstości 300–330 kg/m³. Do produkcji mieszanki wapienno-konopnej najlepiej stosować łodygi o długości od 10 do 25 mm. Dopuszczalne jest także użycie frakcji spoza tego przedziału ze względu na trudności w uzyskaniu paździerzy o konkretnej długości (Sokołowski, Kossakowski, 2019).

2.3.2. ANALIZA WŁAŚCIWOŚCI BETONU KONOPNEGO

Beton konopny to idealny izolator termiczny. Stosowany jest również ze względu na ekologię, cechuje go odporność na rozwój grzybów i pleśni. W przypadku konieczności rozbiórki budynku podlega w 100% rozkładowi. Ma lepsze właściwości termiczne niż wełna mineralna – jeden z najczęściej stosowanych materiałów do ocieplania budynków, ma bardzo dużą

pojemność cieplną, a zdolność akumulacji ciepła jest tak duża, ponieważ zawiera celulozę. Współczynnik przewodności cieplnej λ betonu konopnego powinien zmieścić się w przedziale 0,07–0,09 W/(m*K). Dla porównania w przypadku zwykłego betonu współczynnik ten wynosi od 1,00 do 1,70 W/(m*K). Straty ciepła w przypadku betonu konopnego są ograniczone, gdyż ciepło wolniej przenika przez ściany. W tej technologii nie występują mostki termiczne. Ponadto wykazuje zdolności do absorbowania i odprowadzania wilgoci z powietrza wewnątrz (higroskopowo). Materiał przepuszcza parę wodną. Całkowicie wodoszczelny zwykły beton jest trudny do osiągnięcia w praktyce. Wysoki stopień zasadowości betonu konopnego zapewnia ochronę pałdziejzy konopnych przed rozwojem korozji biologicznej, przed grzybami i owadami, natomiast zwykły beton jest znacznie bardziej narażony na oddziaływanie korozyjne środowiska zewnętrznego.

Zrównoważony rozwój potencjalnych biopochodnych substytutów betonu, takich jak drewno i konopie, zależy także od warunków lokalnych (Lehne, Preston, 2018).

Tabela 3. Porównanie tradycyjnego betonu i betonu konopnego. Oprac. aut.

BADANY ASPEKT	ZWYKŁY BETON	BETON KONOPNY HEMPCRETE
Przygotowanie mieszanki betonowej	Woda, cement, kruszywo i ewentualne domieszki	Mieszanie na mokro konopnych pałdziejzy ze spoiwem na bazie wapna
Substancja utwardzająca	Woda	Dwutlenek węgla
Spoiwo	Spoiwo cementowe i kruszywo mineralne (żwir)	Spoiwo wapienne i kruszywo naturalne, organiczne
Emisja dwutlenku węgla	200–400 kg/m ³	Ujemny ślad węglowy
Funkcja materiału w budynku	Nośna	Nienośna, materiał izolacyjny jako wypełnienie konstrukcji szkieletowej
Przewodność cieplna	Zróżnicowana przewodność cieplna; współczynnik przewodności cieplnej 1,00–1,70 W/m*K	Zdolności do akumulacji ciepła – jeszcze lepszy izolator niż wełna mineralna; współczynnik przewodności cieplnej 0,07–0,09 W/m*K
Wodoszczelność	Całkowicie wodoszczelny beton jest trudny do osiągnięcia w praktyce	Zdolności do absorbowania i odprowadzania wilgoci z powietrza wewnątrz (higroskopowo)

BADANY ASPEKT	ZWYKŁY BETON	BETON KONOPNY HEMPCRETE
Korozja	Narażony na oddziaływanie korozyjne środowiska zewnętrznego	Wysoki stopień zasadowości zapewnia ochronę paździerzy konopnych przed rozwojem korozji biologicznej, przed grzybami i owadami
pH	Wysokie, 12–13	Wysoki stopień zasadowości

2.3.3. FIRMY PRODUKUJĄCE BETON KONOPNY

Paebbl to firma nastawiona na poprawę jakości atmosfery, zajmuje się zwalczaniem globalnego ocieplenia. Naukowcy skupiają się na wychwytywaniu i pochłanianiu dwutlenku węgla z atmosfery i łączeniu go ze zmieloną skałą oliwinową, tworząc proszek skalny lub zawiesinę. CO₂ może być stosowany jako obojętny wypełniacz przemysłowy lub składnik materiałów budowlanych, takich jak beton. Proces określany jest mianem przyspieszonej mineralizacji, można przeprowadzić go w ciągu godziny i zmniejszyć ślad węglowy betonu nawet o 70%. Podobne badania prowadzi także firma z Nowej Szkocji CarbonCure Technologies Inc. Dwutlenek węgla wstrzykiwany jest do świeżego betonu podczas mieszania. Po wstrzyknięciu gaz ulega mineralizacji, trwale wiążąc się z betonem (Sax, 2024).

2.3.4. ZASTOSOWANIE

Przykładem zastosowania betonu konopnego w architekturze jest pawilon demontowalny The Voice of Urban Nature autorstwa holenderskiego biura Overtreders W, który powstał w 2022 roku (il. 6). Budynek zawiera zbiór sześciu ogrodów oraz znajduje się obok centralnego placu, gdzie co 10 lat organizowana jest wystawa ogrodnicza Floriade. Każdy z ogrodów odnosi się do innego tematu, aby zaakcentować różnorodność przyrody miejskiej. Od strony wejściowej pawilon wydaje się być budynkiem z niewieloma otwarciami, przestrzeń otwiera się dopiero w środku, jest dobrze doświetlona. Szczególną uwagę zwraca różowy beton konopny na elewacjach zewnętrznych oraz we wnętrzu budynku, umieszczony pomiędzy ciemnymi drewnianymi ramami konstrukcji. Do budowy obiektu wykorzystano materiały recyklingowe – drewno pochodzące z lokalnych złomowisk i tartaków, a także białe muszle ostryg pochodzące z odpadów z lokalnego przemysłu rybnego do wykonania ścieżki pomiędzy ogrodami. Dodatkowo budynek składa się z łatwych do rozmontowania modułów możliwych do ponownego wykorzystania. Ogrody znajdują się pomiędzy drewnianymi ażurowymi ścianami. Włókna konopi także pozyskano lokalnie. Beton konopny zastosowany w projekcie przyciąga uwagę swoim różowym kolorem – włókna konopi zostały zmieszane z naturalnymi różowymi pigmentami z roślin barwnikowych marzanny bawarskiej. Kolor

podkreśla charakter budynku, sprawia, że technologia wydaje się jeszcze bardziej innowacyjna niż samo zastosowanie betonu konopnego. Dodatkowo w ogrodach można znaleźć specjalne kody QR odsyłające do nagrań wyjaśniających, w jaki sposób ludzie mogą przyczynić się do budowania bardziej ekologicznej przyszłości.



Il. 6. Pawilon The Voice of Urban Nature (Overtreders W) (Crook, 2022)

2.4. DRUK 3D WYCHWYTUJĄCY DWUTLENEK WĘGLA

2.4.1. BADANIA NAUKOWE

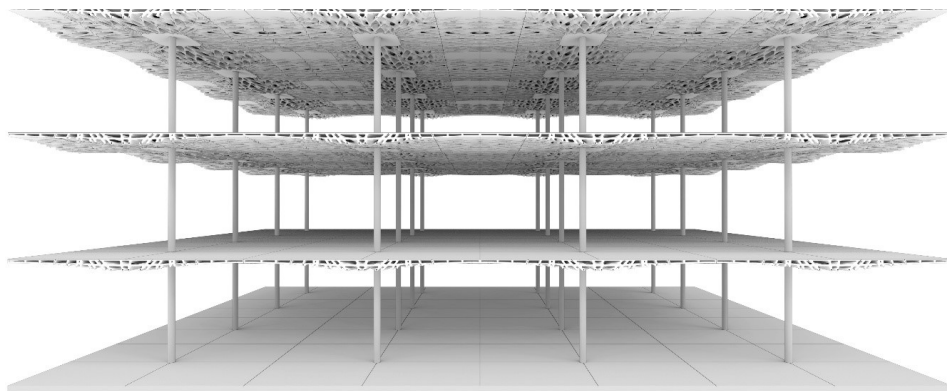
Naukowcy z Nanyang Technological University (NTU) w Singapurze stworzyli innowacyjny wariant druku 3D z wykorzystaniem betonu, który wychwytuje i pochłania dwutlenek węgla, poprawiając tym samym właściwości mechaniczne materiału (Powęska, 2024). Umożliwia on tworzenie bardziej skomplikowanych struktur niż jest to możliwe w przypadku tradycyjnego druku 3D. W specjalnej technologii wykorzystywany jest dwutlenek węgla oraz para wodna, czyli produkty uboczne przemysłowych procesów spalania, które są integrowane z mieszanką betonową podczas druku 3D. CO_2 reaguje z minerałami w betonie, w wyniku czego powstają trwałe związki chemiczne. Duże znaczenie ma tutaj wykorzystanie pary wodnej, która zwiększa zdolność betonu do absorpcji dwutlenku węgla. Efektem jest uzyskanie betonu o większej wytrzymałości i o mniejszym wpływie na środowisko. Przeprowadzono testy i badania laboratoryjne nowatorskiej techniki druku 3D, dzięki którym udało się udowodnić, że nowa metoda druku 3D pozwala wychwycić i zmagazynować o 38% więcej CO_2 niż tradycyjne techniki. Drukowane elementy wykazały większą odporność na ściskanie o 36,8%

i o 45,3% większą elastyczność w porównaniu z tradycyjnymi materiałami. Druk 3D staje się coraz bardziej popularny ze względu na szybkość wykonywania prac na placu budowy, gdyż drukarki 3D mogą pracować bez przerwy i szybko realizować budowę. Technologia NTU pozwala jeszcze bardziej skrócić czas wykonywania prac. W przypadku zwykłego druku 3D różnica w kosztach w porównaniu z tradycyjnymi metodami budowy wynosi od 35 do 60%. Dzięki poprawie właściwości mechanicznych betonu w druku 3D wychwytyjącym i pochłaniającym dwutlenek węgla możliwe jest zmniejszenie ilości materiału potrzebnego do budowy, co przekłada się na jeszcze niższe koszty produkcji i transportu. Udowodniono, że proces druku przy wykorzystaniu nowoczesnej technologii przebiegał szybciej i bardziej precyzyjnie. Naukowcy pracują nadal nad optymalizacją procesu, by stał się jeszcze bardziej efektywny. Ekologicznym rozwiązaniem byłoby także zastosowanie gazów odpadowych zamiast czystego dwutlenku węgla. Mogłyby to być gazy pochodzące z fabryk czy elektrowni. Rozwiązanie nowoczesnego druku 3D mogłoby znacząco zmienić budownictwo w krajach rozwijających się, gdzie zauważalny jest szybki rozrost obszarów zurbanizowanych.

Badania nad innowacyjnymi technikami druku 3D prowadzone są w SC3DP. Jest to centrum przełomowych badań w wielu sektorach, gdzie badacze koncentrują się na ekologii i przyspieszeniu prac budowlanych (SC3DP, NTU, b.r.).

2.4.2. ZASTOSOWANIE

Innowacyjna metoda druku 3D pochłaniającego dwutlenek węgla jest nadal badana, pojawiły się pierwsze obiekty powstałe przy użyciu tej technologii. Inspirująco wygląda wydrukowana ażurowa konstrukcja zaprezentowana na stoisku nr 346 podczas szczytu ARPA-E Energy Innovation Summit 2025 w Washington, D.C. (il. 7). Obiekt udało się wydrukować dzięki współpracy przemysłowo-akademickiej wspieranej przez Departament Energii Stanów



Il. 7. High-Performing Building Structure 2025 (Polyhedral Structures Laboratory, 2025)

Zjednoczonych. Stoisko to konstrukcja prefabrykowana pochłaniająca dwutlenek węgla. Autorem projektu jest zespół akademicki z Uniwersytetu w Pennsylvanii, współpracujący między innymi z naukowcami z Uniwersytetu z Nowego Jorku i Uniwersytetu Texas A&M. Projekt powstał w 2022 roku i dotyczy prefabrykowanego systemu modułowego konstrukcji podłogowej o zminimalizowanej masie i maksymalnie dużej powierzchni, by zwiększyć karbonatyzację. Obiekt powstał jako odpowiedź na fakt, że dwutlenek węgla stanowi 26–57% emisji w całym cyklu życia budynków niskoenergetycznych. Naukowcom udało się dowieść, że takie rozwiązanie podłogowe może zmniejszyć emisję dwutlenku węgla o 60% w ciągu całego cyklu życia konstrukcji. Jest ona lekka i wymaga mniejszego zużycia cementu oraz zbrojenia. Do druku 3D wykorzystano mieszankę betonową pochłaniającą dwutlenek węgla oraz technologię sprężania betonu. System modułowy przyspiesza wykonanie prac (Polyhedral Structures Laboratory, 2025).

Tabela 4. Porównanie tradycyjnego druku 3D i druku 3D pochłaniającego CO₂. Oprac. aut.

BADANY ASPEKT	TRADYCYJNY DRUK 3D	DRUK 3D POCHŁANIAJĄCY CO ₂
Przygotowanie mieszanki betonowej	Cement, szpachlówka, plastifikator i ewentualne dodatki – mieszanka betonowa	Mieszanka betonowa integrowana z dwutlenkiem węgla i parą wodną
Zachodzące reakcje	Połączenie cząstek składników mieszanki betonowej	CO ₂ reaguje z minerałami w betonie – powstają trwałe związki chemiczne
Emisja dwutlenku węgla	Specjalny druk 3D – wychwycenie i zmagazynowanie nawet o 38% więcej CO ₂ niż w tradycyjnej metodzie	
Odporność na ściskanie	Ekologiczny druk 3D – drukowane struktury odporniejsze na ściskanie o 36,8% i elastyczniejsze o 45,3%	
Czas budowy	Znacznie szybciej niż tradycyjne budownictwo	Możliwość jeszcze większego skrócenia czasu budowy, proces druku przebiega szybciej i z większą precyzją
Zużycie materiału	Mniej materiału niż w przypadku tradycyjnego budownictwa, możliwość korzystania z materiałów lokalnych	Ekologiczny druk 3D – zmniejszenie ilości materiału potrzebnego do budowy – niższe koszty produkcji i transportu

3. WNIOSKI

- Przedstawione materiały w istotny sposób przyczyniają się do zmniejszenia śladu węglowego, co sprawia, że są one cennym rozwiązaniem w rejonach o podwyższonym stężeniu dwutlenku węgla, takich jak okolice elektrowni czy inne duże źródła emisji.

- Oprócz redukcji emisji CO₂ nowoczesne materiały pod wieloma względami przeważają nad betonem tradycyjnym, jednak koszty materiałowe są stosunkowo wysokie ze względu na konieczność zastosowania specjalistycznych substancji dodawanych do przygotowywanych mieszanek.
- Proces przygotowania specjalnych odmian betonu oraz prowadzenie eksperymentów z ich zastosowaniem wymaga zaawansowanej wiedzy technicznej i specjalistycznych kompetencji.
- Specjalistyczne odmiany betonu, oprócz korzyści związanych z ochroną klimatu, wykazują również pozytywny wpływ na środowisko naturalne, będąc bezpieczne dla roślin i innych organizmów żywych.

Ekologiczne alternatywy dla tradycyjnego betonu, takie jak CO₂-SUICOM, biobeton czy beton konopny, wykazują znaczący potencjał w redukcji emisji dwutlenku węgla. Ich wdrożenie napotyka jednak na główną barierę ekonomiczną wynikającą z wysokich nakładów wytwarzania. Dalsze badania powinny koncentrować się na redukcji kosztów produkcji materiałów oraz na możliwości wykorzystania ich w nowoczesnych technologiach budowlanych, w tym druku 3D. Równocześnie stworzenie odpowiednich ram prawnych i regulacji mogłoby wymusić stosowanie materiałów o obniżonym śladzie węglowym, przyspieszając ich implementację w sektorze budowlanym. W kolejnych badaniach warto byłoby skupić się na sposobach produkcji materiałów ekologicznych na masową skalę, by mogły być szybko produkowane i sprawnie wdrażane w nowe projekty, gdyż na chwilę obecną można znaleźć niewiele przykładów z architektury obrazujących zastosowanie większości z opisywanych materiałów.

4. PODSUMOWANIE

Wiele firm skutecznie dąży do tego, by ograniczyć emisję dwutlenku węgla w trosce o środowisko naturalne. Wszystkie z nowoczesnych materiałów, które zostały zaprezentowane, wpisują się w globalne poszukiwanie bardziej ekologicznych rozwiązań w budownictwie i mogą stać się materiałami przyszłości. Pokazują, jak bardzo ich wprowadzenie może zmienić oblicze budownictwa, szczególnie w dynamicznie rozwijających się krajach. Stosowanie takich materiałów to element projektowania zrównoważonego, tego typu działania mogą stać się inspiracją projektową dla przyszłych inżynierów i architektów. Jest to duży krok w przyszłość, minimalizujący globalne ocieplenie na naszej planecie. Różne modyfikacje i eksperymenty z mieszanek betonowymi poszerzają wybór materiałów dostępnych na rynku budowlanym, otwierają nowe możliwości. Takie alternatywy w przyszłości w znacznym stopniu mogłyby zastąpić stosowanie tradycyjnego betonu.

Innowacyjne badania zachęcają także do eksperymentowania z innymi materiałami.

BIBLIOGRAFIA

- Abdel, H. (2024). *Block Wall House/ nendo*. ArchDaily. Pobrane z: <https://www.archdaily.com/1015955/block-wall-house-nendo> (dostęp: 03.02.2025).
- Beściak, G., Śmiszek-Lindert, W., Lewicka, S. (2018). Bioconcrete – the building material of the future? *Cement, Wapno, Beton*, 23(2), 137–143.
- Budziszewska, M., Kardaś, A., Bohdanowicz, Z. (red.). (2021). *Klimatyczne ABC. Interdyscyplinarne podstawy współczesnej wiedzy o zmianie klimatu*. Warszawa: Wydawnictwo Uniwersytetu Warszawskiego.
- Crook, L. (2022). *Pink hempcrete brightens demountable Floriade pavilion by Overtreders W*. Pobrane z: <https://www.dezeen.com/2022/08/22/the-voice-of-urban-nature-floriade-overtreders-w/> (dostęp: 25.10.2025).
- Fraunhofer Institut. (2025). *Neues aus der Forschung: Biobeton mit CO₂-Speicher*. Pobrane z: <https://www.baunetzwerk.biz/neues-aus-der-forschung-biobeton-mit-co2-speicher> (dostęp: 22.10.2025).
- Fraunhofer-Institut für Keramische Technologien und Systeme IKTS. (2024). *Biobeton und biogenne Baumaterialien mit Cyanobakterien*. Fraunhofer IKTS. Pobrano z: https://www.ikts.fraunhofer.de/de/presse/pressemitteilungen/2024-07-01_p_biobeton-und-biogene-baumaterialien-mit-cyanobakterien.html (dostęp: 03.02.2025).
- Fraunhofer Institute for Electron Beam and Plasma Technology FEP. (2024). *Development of bio-based, climate-neutral building materials by means of biogenic material production using phototrophic microorganisms*. Pobrane z: https://www.fep.fraunhofer.de/en/press_media/Pressemitteilungen2024/13_2024.html (dostęp: 23.10.2025).
- Kajima Corp. (2012). CO₂-SUICOM. Kajima monthly report digest. Pobrane z: https://www.kajima.co.jp/news/digest/jun_2012/searching/index-j.html (dostęp: 13.02.2025).
- Kajima Corp. (b.r.). Kajima Concrete Base. Technology&Services. Carbon – capturing concrete: Capturing CO₂ like trees. Point 03. The environmental impact of CO₂-SUICOM. Pobrane z: https://www.kajima.co.jp/english/tech/c_sus_con/technology01/index.html (dostęp: 04.12.2025).
- Kardaś, A. (2018). *Emisje CO₂ dalej rosna – budżet węglowy 2018*. Pobrano z: <https://naukaoklimacie.pl/aktualnosci/emisje-co2-dalej-rosna-budzet-weglowy-2018-338> (dostęp: 13.02.2025).
- Lehne, J., Preston, F. (2018). *Making Concrete Change. Innovation in Low – carbon Cement and Concrete*. London: Chatham House, the Royal Institute of International Affairs.
- Lemka, J. (2023). *Beton konopny – ekologiczny wariant betonu. Dlaczego warto postawić dom z konopi?* Pobrane z: <https://muratordom.pl/budowa/inne-technologie-budowlane/beton-konopny-ekologiczny-wariant-betonu-dlaczego-warto-postawic-dom-z-konopi-cena-aa-dsFD-DZ59-r2eV.html> (dostęp: 03.02.2025).

- Le Quéré i in. (2018). *Global Carbon Budget 2018*. Integrated Carbon Observation System. Earth System Science Data. <https://doi.org/10.5194/essd-10-2141-2018>
- Ministry of Economy, Trade and Industry of the Government of Japan (2008). *Yearbook of Ceramics and Building Materials Statistics*. Pobrane z: https://www.meti.go.jp/statistics/tyo/seidou/result/gaiyo/resourceData/04_yogyo/nenpo/h2dee2008k.pdf (dostęp: 27.10.2025).
- PN-EN 1992-1-1:2008. Eurokod 2. Projektowanie konstrukcji z betonu. Część 1-1: Reguły ogólne i reguły dla budynków.
- Polyhedral Structures Laboratory. (2025). *3D-Printed Carbon Absorbing High-Performance Building Structure*. Pobrane z: <https://psl.design.upenn.edu/arpa/#High-Performing-Building-Structure> (dostęp: 22.10.2025).
- Powęska, M. (2024). *Poznajcie beton przyszłości. Druk 3D wychwytyjący dwutlenek węgla rewolucjonizuje budownictwo*. Pobrane z: <https://www.focus.pl/artykul/beton-wychwytyjacy-co2-druk-3d> (dostęp: 03.02.2025).
- Restoration Partners LLC. (2024). Basilisk Self-Healing Concrete Debuts in the U.S. Market. Pobrane z: <https://www.einpresswire.com/article/747427338/basilisk-self-healing-concrete-debuts-in-the-u-s-market> (dostęp: 22.10.2025).
- Sax, S. (2024). *How the Cement iNdustry Is Creating Carbon – Negative Building Materials*. Pobrane z: <https://time.com/7023365/cement-concrete-climate/> (dostęp: 03.02.2025).
- SC3DP, NTU. (b.r.). *About us*. Pobrano z: <https://www.ntu.edu.sg/sc3dp/about-us> (dostęp: 17.02.2025).
- Sokołowski, P., Kossakowski, P. (2019). Kompozyt wapienno – konopny – materiał ekologiczny. *Zeszyty Naukowe Politechniki Częstochowskiej*, 25, 230–240. <https://doi.org/10.17512/znb.2019.1.36>
- Torichigai, T. (2022). *Carbon negative concrete “CO₂-SUICOM”*. Newsletter of Japan Society of Civil Engineers, 64, 3. Pobrane z: https://www.jsce.or.jp/committee/concrete/e/newsletter/newsletter64/index_files/SpecialEdition/Profile-1_SUICOM.pdf (dostęp: 03.02.2025).
- Torichigai, T., Yokozeaki, K., Morioka, M., Yamamoto, K. (2009). Reduction of the environmental impact using carbonated cementitious materials with γ -2CaO·SiO₂. *Proceedings of the Cement & Concrete Society*, 63(1), 161–167. <https://doi.org/10.14250/cement.63.161>
- Yokokawa, Y., Yokozeaki, K. (2023). Study on a method for measuring carbon dioxide content of concrete cured by high – concentration carbon dioxide atmosphere. *Proceedings of the Cement & Concrete Society*, 77(1), 450–458. <https://doi.org/10.14250/cement.77.450>
- Yoshioka, K., Obata, D., Nanjo, H., Yokozeaki, K., Torichigai, T., Morioka, M., Higuchi, T. (2013). New ecological concrete that reduces CO₂ emissions below zero level ~ New method for CO₂ capture and storage. *Energy Procedia*, 37, 6018–6025. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2013.06.530>