

Edyta GOSK

Politechnika Białostocka

 ORCID: 0009-0002-3797-1575

DOI 10.14746/ssp.2025.2.13

Ewelina RUDOWSKA

Politechnika Białostocka

 ORCID: 0009-0008-9507-0509

Przemysł budowlany na drodze do Zielonego Ładu – kraje środkowoeuropejskie

Streszczenie: Artykuł omawia regulacje i strategie mające na celu redukcję emisji CO₂ w sektorze budowlanym. Kluczowym elementem jest Mechanizm dostosowywania cen przy granicy (CBAM), który w ramach strategii FitFor55 wprowadza opłaty celne na importowane towary związane z wysokimi emisjami CO₂, takie jak stal i cement, aby wyrównać koszty między UE a krajami o mniej rygorystycznych normach emisji. Dyrektywa EPBD (Energy Performance of Buildings Directive) wymusza na państwach członkowskich poprawę efektywności energetycznej budynków poprzez certyfikację i przeglądy systemów grzewczych. Deklaracje Środowiskowe EPD dostarczają informacji na temat wpływu produktów budowlanych na środowisko, wspierając zrównoważone budownictwo. W produkcji cementu, w szczególności w Europie Środkowej, kluczowe jest wdrażanie nowoczesnych technologii w celu redukcji emisji. Technologie takie jak BIM i innowacyjne rodzaje cementu, jak ECO-Pact, przyczyniają się do zmniejszenia śladu węglowego budynków, wspierając globalne cele klimatyczne.

Słowa kluczowe: redukcja emisji CO₂, Deklaracje Środowiskowe, zrównoważony rozwój, ekologiczne materiały budowlane

Wstęp

Pakiet inicjatyw przedstawionych w Zielonym Ładzie (Węglarz i in. 2021), prowadzi docelowo do osiągnięcia neutralności klimatycznej do 2050 r. Dążąc do spełnienia wymagań stawianych w Zielonym Ładzie, branża budowlana nieustannie będzie rozwijała się m.in. w Polsce



Artykuł udostępniany jest na licencji Creative Commons – CC-BY-SA 4.0 – uznanie autorstwa, użycie niekomercyjne, na tych samych warunkach.

dzięki rządowym programom takim, jak Pierwsze Mieszkanie (Groeger, 2016) W konsekwencji, zastosowanie cementu i betonu pozostanie nieuniknione. Jednakże, branża budowlana będzie musiała wdrażać innowacyjne technologie i materiały, które zminimalizują negatywny wpływ na środowisko naturalne, co stanowi kluczowy element zrównoważonego rozwoju (Adamczak-Bugno, 2023).

Unia Europejska (UE) podejmuje szereg aktywnych działań na rzecz transformacji ekologicznej, promując wizję nowoczesnego społeczeństwa opartego na holistycznym i międzysektorowym podejściu (Komisja Europejska, *Transformacja...*). W ramach tej strategii, inicjatywy UE nie ograniczają się wyłącznie do sektora budownictwa, lecz obejmują również kluczowe obszary gospodarki, takie jak energetyka, transport, przemysł oraz rolnictwo (Adamczak-Bugno, 2023). Integracja i współpraca pomiędzy tymi sektorami są kluczowe dla osiągnięcia zrównoważonego rozwoju, który stanowi fundament przyszłościowej i innowacyjnej gospodarki (Komisja Europejska, *Uczenie się...*). Wspólne działanie tych sektorów umożliwia nie tylko optymalizację procesów, co zwiększa efektywność i konkurencyjność europejskiej gospodarki, lecz także przyczynia się do promowania sprawiedliwości społecznej oraz zapewnienia trwałego dobrobytu obywatelom państw członkowskich (Sójka, 2022).

Zintegrowane podejście stosowane przez UE uwzględnia wieloaspektowe wyzwania związane z ochroną środowiska, a także dąży do stworzenia synergii międzysektorowej, która jest niezbędna w walce z kryzysem klimatycznym (European Commission, 2019). Poprzez inwestycje w nowoczesne technologie, odnawialne źródła energii oraz innowacyjne rozwiązania w przemyśle i transporcie, Unia Europejska staje się globalnym liderem w dziedzinie ekologicznej transformacji. Tego rodzaju podejście nie tylko przynosi wymierne korzyści środowiskowe, takie jak redukcja emisji gazów cieplarnianych i zanieczyszczeń, ale także przyczynia się do długofalowej stabilności społecznej i gospodarczej. W ten sposób UE kształtuje swoją pozycję w globalnej walce z kryzysem klimatycznym, jednocześnie wspierając rozwój innowacyjnych rozwiązań, które przynoszą korzyści zarówno dla środowiska, jak i dla przyszłych pokoleń (European Education Area).

Powstaje w ten sposób fundamentalny paradoks: jak budować więcej (zaspokajając popyt społeczny i wspierając wzrost gospodarczy) emitując mniej (realizując cele klimatyczne UE)? To zderzenie unijnych celów dekarbonizacyjnych z krajowymi priorytetami rozwojowymi definiuje centralne wyzwanie dla regionalnego przemysłu budowlanego. Koniecz-

ność stosowania cementu i betonu pozostaje nieunikniona, jednak branża jest zmuszona do implementacji innowacji materiałowych i procesowych, które zminimalizują jej negatywny wpływ na środowisko.

Celem niniejszego artykułu jest analityczna ocena kluczowych ścieżek dekarbonizacji sektora budowlanego w Europie Środkowej, ze szczególnym uwzględnieniem przemysłu cementowego i betonu. Artykuł ma na celu ocenę wpływu instrumentów regulujących oraz diagnozujących na proces redukcji emisji CO₂ oraz wskazanie roli betonu i cementu w transformacji przemysłu budowlanego w kierunku niskoemisyjności.

Praca ma charakter przeglądu analityczno-deskryptywnego (desk research) opartą na analizie danych wtórnych. Dokumenty obejmują akty prawne Unii Europejskiej, raporty branżowe, literaturę naukowo-techniczną oraz publicznie dostępne bazy danych emisyjnych. Struktura artykułu obejmuje analizę ram regulacyjnych, diagnozę emisyjności sektora cementu w Europie Środkowej, przegląd innowacji materiałowych oraz rolę optymalizacji cyfrowej, umożliwiając identyfikację trendów i wyzwań w zakresie redukcji emisji CO₂ w sektorze budowlanym.

1. Ramy regulacyjne transformacji: od „Fit for 55” do placu budowy regulacje i strategii redukcji emisji CO₂

Transformacja sektora budowlanego nie jest procesem dobrowolnym, lecz jest stymulowana przez ścisłe ramy regulacyjne Unii Europejskiej. Pakiet „Fit for 55” (Rada Europejska, 2025) (Erbach, Jensen, 2022) stanowi zbiór narzędzi legislacyjnych, które przekładają ogólne cele Zielonego Ładu na konkretne wymogi rynkowe.

1.1. Rola CBAM w Strategii FitFor55

Program FitFor55, stanowiący część ambitnej strategii Unii Europejskiej na rzecz ochrony klimatu, ma na celu obniżenie emisji netto dwutlenku węgla (CO₂) o co najmniej 55% do roku 2030. Jest to kluczowy krok w dążeniu do osiągnięcia neutralności klimatycznej do 2050 roku (Komisja Europejska, *Transformacja...*). W ramach realizacji tych celów wprowadzono Mechanizm dostosowywania cen przy granicy z uwzględnieniem emisji CO₂ (CBAM), który stanowi innowacyjne narzędzie polityki klimatycznej Unii Europejskiej (Zalewski, 2022).

Analiza strategiczna wskazuje, że CBAM nie jest jedynie opłatą celną; stanowi fundamentalny mechanizm ochrony rynku wewnętrznego UE (Magacho, Espagne i in., 2024). Jego celem jest wyrównanie kosztów między producentami z Unii Europejskiej (np. z Polski czy Niemiec), którzy ponoszą wysokie koszty dekarbonizacji (m.in. wynikające z uczestnictwa w systemie handlu emisjami EU ETS), a importerami z krajów o niższych standardach środowiskowych. Bez tego mechanizmu, każda europejska cementownia inwestująca w drogie technologie niskoemisyjne (np. wychwytywanie i składowanie) zostałaby natychmiast wyparta z rynku przez tańszy, „brudny” cement importowany spoza UE (Stowarzyszenia Producentów Cementu, 2021). CBAM eliminuje tę „karę za innowacyjność”, sztucznie podnosząc cenę importowanych, wysokoemisyjnych produktów do poziomu krajowego, obciążonego kosztami EU ETS. W ten sposób CBAM staje się nie tyle podatkiem, ile gwarancją rentowności dla zielonych inwestycji w europejskim przemyśle ciężkim (Stepura, 2024).

1.2. Dyrektywa EPBD i rola EPD: synergia popytu i podaży dyrektywa EPBD

– cel, wymogi i wpływ na efektywność energetyczną budynków

Dyrektywa EPBD (Energy Performance of Buildings Directive) (Rapacka, 2023) stanowi kluczowy instrument polityki Unii Europejskiej, mający na celu znaczące podniesienie efektywności energetycznej budynków. Wprowadzenie i implementacja tej dyrektywy są obowiązkowe dla wszystkich państw członkowskich UE. Jej głównym celem jest dostosowanie standardów budowlanych do nowoczesnych wymogów technologicznych oraz idealistycznych celach klimatycznych, które Unia Europejska stawia przed sobą w ramach polityki zrównoważonego rozwoju (Siuta-Oлча, 2024).

Dyrektywa EPBD jest regularnie aktualizowana, aby odpowiadać na postęp technologiczny oraz zmieniające się potrzeby związane z ochroną klimatu. Ostatnia istotna aktualizacja, znana jako EPBD Recast, miała miejsce w 2018 roku (Węglarz, Gilewski i in.). Aktualnie obowiązujące przepisy nakładają na państwa członkowskie obowiązek transpozycji regulacji do krajowego porządku prawnego. Kluczowe elementy dyrektywy obejmują m.in. obowiązek certyfikacji energetycznej budynków, ustalenie minimalnych wymagań dla nowych oraz modernizowanych

obiektów budowlanych, a także regularne przeglądy systemów grzewczych i klimatyzacyjnych (Kwiatkowski, 2024; Vaillant).

W kontekście dyrektywy, nowe budynki muszą spełniać określone standardy efektywności energetycznej, których termin wprowadzenia upływał 31 grudnia 2020 roku. W przypadku budynków poddawanych modernizacji, wymogi te również muszą być wdrożone w nadchodzących latach, zgodnie z harmonogramem aktualizacji przepisów. Dyrektywa EPBD ma charakter długoterminowy i jest integralną częścią strategii Unii Europejskiej na rzecz osiągnięcia neutralności klimatycznej do 2050 roku. Dodatkowo, dyrektywa nakłada obowiązek regularnych przeglądów instalacji grzewczych i klimatyzacyjnych, co ma na celu zapewnienie ich efektywnego funkcjonowania oraz dalsze obniżenie emisji gazów cieplarnianych (Wyrwa, Radomska i in., 2025). Wprowadzenie tych przepisów ma na celu nie jedynie optymalizację zużycia energii w budynkach, ale także wsparcie globalnych wysiłków na rzecz ochrony klimatu oraz zrównoważonego rozwoju (Krysik, 2022).

Regulacje te nie działają w izolacji, lecz tworzą synergiczny mechanizm „popytu i podaży” (push-pull), który kształtuje rynek zrównoważonych materiałów budowlanych. Z jednej strony, Dyrektywa EPBD (Energy Performance of Buildings Directive) wymusza poprawę efektywności energetycznej budynków. Poprzez obowiązkową certyfikację energetyczną oraz regularne przeglądy systemów grzewczych i klimatyzacyjnych, dyrektywa tworzy popyt (pull) na budynki o wysokim standardzie. Aby sprostać tym wymogom i uzyskać prestiżowe certyfikaty środowiskowe, takie jak LEED czy BREEAM, inwestorzy i projektanci muszą precyzyjnie kwantyfikować ślad węglowy całego obiektu (Głazewska, 2024).

W tym momencie Deklaracje Środowiskowe EPD (Environmental Product Declarations) dostarczają niezbędnych danych (push) (Asdrubali, Grazieschi i in., 2023). EPD to dobrowolne, ale standaryzowane (zazwyczaj ważne 5 lat) dokumenty, które w transparentny sposób przedstawiają oddziaływanie produktu na środowisko w całym cyklu życia (CERT-BUD, Deklaracje) – od pozyskania surowców po utylizację. Dostarczając porównywalnych danych o śladzie węglowym, EPD przekształcają abstrakcyjny „wpływ na środowisko” w twardą, porównywalną metrykę projektową (Anderson, Rønning, 2022). Daje to wymierną przewagę rynkową producentom oferującym innowacyjne, niskoemisyjne materiały budowlane (ECOPACT).

1.3. Emisja CO₂ w produkcji cementu w Europie Środkowej

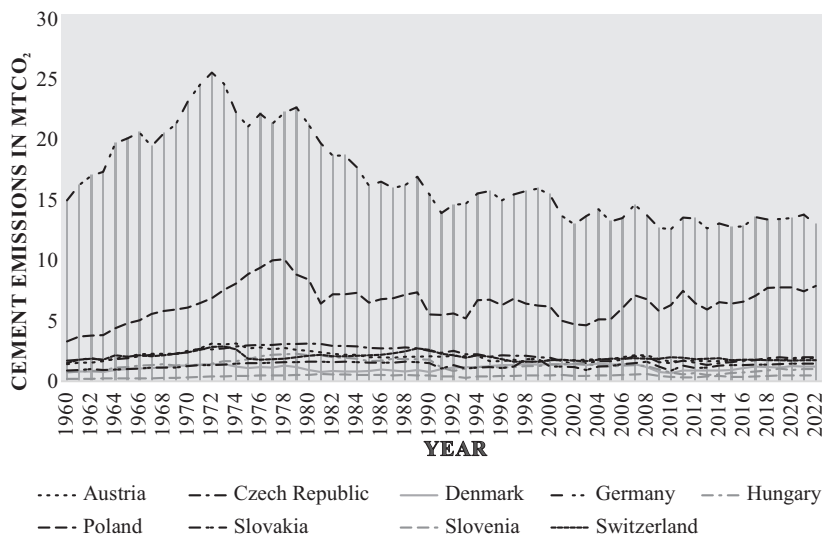
Produkcja cementu, będąca kluczowym elementem sektora budowlanego, odgrywa istotną rolę w globalnej gospodarce. Jednakże procesy produkcyjne związane z wytwarzaniem cementu są jednymi z najbardziej energochłonnych i emisyjnych, przyczyniając się do znacznej emisji gazów cieplarnianych, w tym przede wszystkim dwutlenku węgla (CO₂) (Anderson, Moncaster, 2022).

W związku z rosnącym naciskiem na ograniczenie negatywnego wpływu działalności przemysłowej na środowisko, szczególnie w kontekście walki ze zmianami klimatycznymi, konieczna staje się analiza i redukcja emisji generowanych przez sektor cementowy (Czernik, Michałowski, 2022).

Wykres 1 przedstawia szczegółową analizę emisji gazów cieplarnianych związanych z produkcją cementu w krajach Europy Środkowej w latach 1960–2022 (Rada Europejska, 2025). Na podstawie zgromadzonych danych można stwierdzić, że Niemcy jako największy emitent w regionie, odnotowują najwyższe poziomy emisji dwutlenku węgla (CO₂), które od 1960 roku utrzymują się na bardzo wysokim poziomie. W szczególności, w latach 70. XX wieku emisja osiągnęła szczyt na poziomie około 25 milionów ton CO₂ (MtCO₂), po czym nastąpił spadek o około 13 MtCO₂. Tendencja ta może być wynikiem wprowadzenia nowoczesnych technologii produkcyjnych, zwiększenia efektywności energetycznej oraz implementacji polityk proekologicznych mających na celu redukcję emisji.

Polska zajmuje drugie miejsce pod względem emisji CO₂ związanych z produkcją cementu, osiągając obecnie poziom około 7,5 MtCO₂. Znacząca różnica w poziomach emisji między Polską a innymi krajami regionu sugeruje istnienie odmiennych praktyk w zakresie technologii produkcji, zarządzania środowiskowego oraz regulacji prawnych. Kraje takie jak Austria, Czechy, Węgry, Dania, Słowacja i Słowenia charakteryzują się znacznie niższymi wskaźnikami emisji, wynoszącymi około 1,8 MtCO₂ lub mniej. Może to wskazywać na bardziej zaawansowane technologie produkcyjne, wyższy stopień wykorzystania paliw alternatywnych czy skuteczniejsze wdrożenie strategii zrównoważonego rozwoju w tych państwach.

Analiza tych danych podkreśla potencjał dla Polski oraz innych krajów regionu do dalszej redukcji emisji poprzez wdrożenie efektywniejszych technologii, optymalizację procesów produkcyjnych oraz imple-

Wykres 1. Emisje cementu w MtCO₂

Źródło: Rada Europejska, 2025.

mentację strategii zrównoważonego rozwoju w sektorze budowlanym. W szczególności, inwestycje w technologie niskoemisyjne, zwiększenie efektywności energetycznej oraz promowanie wykorzystania surowców wtórnych mogą znacząco przyczynić się do obniżenia emisji gazów cieplarnianych.

W kontekście globalnych wysiłków na rzecz przeciwdziałania zmianom klimatycznym, kluczowe jest zwrócenie uwagi na rządowe polityki i inicjatywy mające na celu ograniczenie emisji w sektorze przemysłowym (Dz.U.UE.L.2023.231.1).

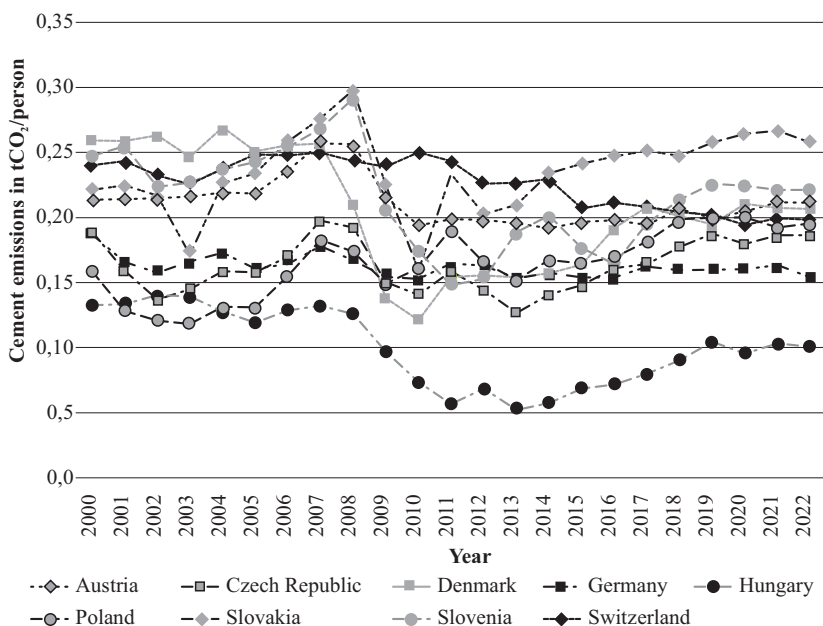
Obejmuje to wprowadzenie surowszych norm emisji, systemów zachęt finansowych dla przedsiębiorstw inwestujących w zielone technologie oraz wsparcie dla badań i rozwoju w zakresie innowacyjnych materiałów i procesów produkcyjnych (Michalak, Rosiek i in., 2020). Takie działania są niezbędne do osiągnięcia celów klimatycznych i przyczynienia się do globalnej redukcji emisji gazów cieplarnianych.

Emisja gazów cieplarnianych *per capita* jest istotnym wskaźnikiem, który pozwala ocenić wpływ sektora przemysłowego na środowisko w kontekście liczby ludności danego kraju. W produkcji cementu, branży o wysokim poziomie emisji CO₂, różnice między państwami są szcze-

gólnie wyraźne (Michalak, Rosiek i in., 2020). Celem tego rozdziału jest analiza emisji gazów cieplarnianych związanych z produkcją cementu w przeliczeniu na osobę w wybranych krajach Europy, w tym na Węgrzech, Słowacji i Słowenii (Wysocka-Golec, Witczak i in., 2023). Przedstawione dane pokazują zarówno pozytywne zmiany wynikające z wprowadzenia bardziej ekologicznych technologii, jak i wyzwania związane z intensywnym rozwojem przemysłowym w regionie (Grzebulska, Masalska i in. 2020). Analiza ta stanowi istotny wkład w rozumienie regionalnych strategii zrównoważonego rozwoju oraz ich wpływu na emisję CO₂.

Wykres 2 pokazuje emisję gazów cieplarnianych związanych z produkcją cementu w przeliczeniu na tCO₂ na osobę w wybranych krajach Europy (Wysocka-Golec, Witczak i in., 2023). Od roku 2000 Węgry utrzymują najniższy poziom emisji CO₂, który obecnie wynosi jedynie 0,1 tCO₂ na osobę. Taki niski wynik można tłumaczyć efektywnymi działaniami w zakresie zrównoważonego rozwoju oraz technologiami produkcji cementu, które są bardziej ekologiczne. W przeciwieństwie do

Wykres 2. Emisja cementu w tCO₂ na osobę



Źródło: Wysocka-Golec, Witczak i in., 2023.

Węgier, Słowacja odnotowuje najwyższy poziom emisji, przekraczając wartość Węgier o 0,15 tCO₂ na osobę. Wzrost ten może być związany z intensywnym rozwojem przemysłowym oraz większym zapotrzebowaniem na cement.

Najwyższe wartości wskaźnika emisji CO₂ w regionie miały miejsce w 2008 roku, kiedy to na czoło wysunęły się Słowenia i Słowacja. W miarę postępu lat, zauważalna jest tendencja do zmniejszenia emisji w wielu krajach, co jest pozytywnym sygnałem w walce ze zmianami klimatycznymi i dążeniu do bardziej zrównoważonych praktyk przemysłowych.

2. Innowacje materiałowe jako odpowiedź na wyzwania emisyjne budownictwa – możliwości ograniczenia emisji CO₂

2.1. Zrównoważony rozwój w budownictwie

Zasady zrównoważonego rozwoju stanowią fundament dla tworzenia przyszłościowego środowiska, które opiera się na trzech kluczowych filarach: społecznym, środowiskowym i ekonomicznym (Burchard-Dziubińska, Rzeńca i in. 2014). Budynki muszą nie tylko spełniać wymagania dotyczące bezpieczeństwa, trwałości i dostępności cenowej, ale również odpowiadać na zasady efektywności emisyjnej oraz energetycznej (Lis, Sekret, 2016). W kontekście zrównoważonego rozwoju, istotne jest, aby budownictwo i renowacje stanowiły znaczący element wzrostu gospodarczego i tworzenia miejsc pracy, co zostało podkreślone przez inicjatywę renowacji w ramach Zielonego Ładu (Global Carbon Atlas, 2024).

W kontekście tych wymagań, beton jako jeden z najwszechstronniejszych i najbardziej ekonomicznych materiałów budowlanych, odgrywa kluczową rolę. Charakteryzuje się on wyjątkową trwałością, przewyższającą 100 lat oraz odpornością na ogień, co czyni go materiałem o wysokiej odporności na różne warunki eksploatacji (Hadart, 2020). Beton wpływa również na efektywność energetyczną budynków, ponieważ jego zastosowanie może prowadzić do zmniejszenia zużycia energii na ogrzewanie i chłodzenie nawet o 15% (Czarnecki, Justnes, 2012).

Takie właściwości betonu przyczyniają się do znaczącej redukcji emisji CO₂ zarówno na etapie produkcji materiału, jak i w całym sektorze budownictwa (Bezeglów, 2024). Beton, poprzez swoją trwałość i efektywność energetyczną, staje się kluczowym elementem strategii zrów-

noważonego rozwoju budownictwa. Jego zastosowanie wspiera dążenie do minimalizacji wpływu na środowisko, jednocześnie przyczyniając się do realizacji celów związanych z redukcją emisji gazów cieplarnianych i zrównoważonym rozwojem infrastruktury (Czarnecki, Justnes, 2012).

W rezultacie, beton nie tylko spełnia normy techniczne i funkcjonalne, ale również odgrywa znaczącą rolę w strategiach mających na celu osiągnięcie długoterminowych celów środowiskowych, gospodarczych i społecznych, co jest niezbędne dla zapewnienia zrównoważonej przyszłości.

2.2. Problem: ślad węglowy klinkieru

Produkcja cementu, kluczowy proces w sektorze budowlanym, jest odpowiedzialna za istotne emisje dwutlenku węgla (CO_2), które mają poważne konsekwencje dla zmian klimatycznych. Szacuje się, że proces produkcji cementu przyczynia się do około 8% globalnych emisji CO_2 (Pilch, 2007), głównie z powodu reakcji chemicznych w piecach cementowych oraz zużycia paliw kopalnych. W odpowiedzi na te wyzwania, sektor cementowy intensywnie poszukuje innowacji technologicznych, mających na celu ograniczenie emisji CO_2 i zwiększenie efektywności środowiskowej produkcji (Pilch, 2007).

Produkcja cementu portlandzkiego jest procesem wysokoemisyjnym (Giergiczny, 2014). Około dwie trzecie emisji pochodzi nie ze spalania paliw, lecz z samego procesu chemicznego kalcynacji (rozkładu węglanu wapnia) (Środa, 2024). Oznacza to, że nawet przejście na 100% odnawialne źródła energii w cementowniach nie rozwiąże problemu emisji procesowych. Dlatego kluczową strategią dekarbonizacji jest redukcja zawartości klinkieru w produkcie końcowym.

2.3. Ścieżka ewolucyjna: betony niskoemisyjne

Pierwszą, najszybciej wdrażaną ścieżką jest ewolucyjna optymalizacja receptur. Rozwiązania takie jak betony typu ECOPact (Kuryś, Gorzelak, 2024) oferują znaczącą redukcję śladu węglowego – nawet o 30% w porównaniu do tradycyjnego betonu opartego na cemencie portlandzkim – CEM I 42,5R.

Osiąga się to poprzez optymalizację receptury i zastąpienie części klinkieru portlandzkiego alternatywnymi materiałami, takimi jak popio-

ły lotne, żużel wielkopiecowy czy inne dodatki mineralne. Co istotne, innowacje te przynoszą nie tylko korzyści środowiskowe, ale również techniczne. Kluczową cechą wielu z tych produktów jest „niższe ciepło hydratacji” (*ECOPACT...*, 2024). Nie jest to jedynie detal techniczny, lecz kluczowa przewaga rynkowa. Wysokie ciepło hydratacji w tradycyjnych betonach prowadzi do naprężeń termicznych i powstawania rys skurczowych, zwłaszcza w masywnych elementach konstrukcyjnych (Klemczak, 2018). Produkty takie, jak ECOPact (*ECOPACT...*, 2024), oferując rozwiązanie tego powszechnego problemu inżynierskiego, są postrzegane nie tylko jako bardziej ekologiczne, ale jako lepsze technicznie. Ta podwójna korzyść (techniczna + środowiskowa) jest kluczem do ich szybkiej adaptacji rynkowej.

2.4. Ścieżka rewolucyjna: nowe formacje cementu i geopolimery

Równolegle rozwijana jest ścieżka rewolucyjna, polegająca na fundamentalnej zmianie chemii spoiwa (Środa, 2021). Obejmuje to innowacyjne preparaty klinkierowe, takie jak Aether, cementy glinowo-wapniowe (o wysokiej zawartości, stosowane m.in. w materiałach ogniotrwałych) czy cementy belitowe, które wymagają niższych temperatur syntezy (Stowarzyszenie Producentów Cementu, 2020).

Jednym z nowoczesnych preparatów klinkierowych, który wyróżnia się w tej dziedzinie, jest Aether (Stowarzyszenie Producentów Cementu, 2020). Aether stanowi zaawansowany rodzaj cementu, który jest wynikiem innowacyjnych badań i technologii mających na celu zminimalizowanie wpływu produkcji cementu na środowisko (Komisja Europejska, *Redukcja emisji...*).

Aether charakteryzuje się zredukowaną ilością klinkieru, kluczowego składnika cementu, który jest głównym źródłem emisji CO₂. W produkcie tym klinkier jest zastępowany lub zmniejszany przy użyciu alternatywnych materiałów i dodatków mineralnych, co prowadzi do niższych emisji gazów cieplarnianych. Dodatkowo, proces produkcji Aetheru wprowadza nowoczesne technologie, które są bardziej energooszczędne i generują mniejsze emisje CO₂. Może to obejmować stosowanie bardziej ekologicznych źródeł energii, takich jak biomasa czy energia odnawialna oraz technologie wychwytywania i magazynowania dwutlenku węgla (CCS) (Stowarzyszenie Producentów Cementu, 2020).

Aether, dzięki swoim właściwościom, poprawia efektywność energetyczną budynków, co przyczynia się do zmniejszenia zużycia energii na ogrzewanie i chłodzenie. To z kolei prowadzi do redukcji emisji CO₂ związanych z użytkowaniem budynków. Takie innowacyjne preparaty klinkierowe, jak Aether, są kluczowe dla realizacji globalnych celów klimatycznych, w tym dążenia do neutralności węglowej. Ich wprowadzenie wspiera zrównoważony rozwój sektora budowlanego, odpowiadając na rosnące wymagania dotyczące ochrony środowiska i zmniejszenia śladu węglowego (Górak, Gaudy i in., 2021). Technologie te stanowią ważny krok w kierunku bardziej ekologicznych praktyk przemysłowych, będąc istotnym elementem strategii globalnych na rzecz ograniczenia zmian klimatycznych.

Inne innowacyjne preparaty klinkierowe, takie jak cement glinowo-wapniowy (Madej, Kruk, 2023) oraz cement belitowy (Gawlicki, 2024), również wnoszą istotne zmiany w kierunku bardziej zrównoważonego budownictwa. Cement glinowo-wapniowy, znany z czystej mieszanki cementu ogniotrwałego o zawartości 70% Al₂O₃, oraz cement belitowy, który stosuje innowacyjne składniki mineralne, oferują niższy ślad węglowy dzięki zredukowanemu zapotrzebowaniu na wysokotemperaturowe procesy produkcyjne (Madej, Kruk, 2023). Te nowe rodzaje cementów charakteryzują się zmniejszoną emisją CO₂, co stanowi istotny krok w kierunku ochrony środowiska (Holcim, 2013).

Wszystkie te innowacje są wynikiem zaawansowanych badań oraz dążeń do ograniczenia wpływu przemysłu cementowego na zmiany klimatyczne. Nowe cementy, dzięki obniżeniu emisji CO₂ i zmniejszonemu zapotrzebowaniu na energię, stanowią bardziej ekologiczną alternatywę w budownictwie. Ich wprowadzenie do szerokiego użytku może znacząco przyczynić się do realizacji globalnych celów klimatycznych i strategii na rzecz zrównoważonego rozwoju, oferując przemysłowi budowlanemu efektywne i przyjazne dla środowiska rozwiązania.

Najbardziej radykalną alternatywą są jednak betony geopolimerowe (Błaszczczyński, Król, 2021). Geopolimery to spoiwa powstające w wyniku syntezy krzemu (Si) i aluminium (Al), pochodzących z surowców odpadowych, takich jak popioły lotne czy żużle. Całkowicie eliminują one potrzebę stosowania cementu portlandzkiego. Potencjał redukcyjny tej technologii jest ogromny: cykl produkcyjny geopolimerów generuje nawet o 80% mniej i zużywa 2 do 3 razy mniej energii niż produkcja cementu portlandzkiego (Błaszczczyński, Król, 2021).

Mamy tu jednak do czynienia z paradoksem innowacji. Z jednej strony „pragmatyczny” ECOPact (redukcja o 30%), oparty na istniejących

normach i łańcuchach dostaw, szybko zdobywa rynek. Z drugiej strony „rewolucyjny” geopolimer (redukcja o 80%) jest „nadal rzadko stosowany”. Przyczyny tego stanu są głębsze niż tylko koszty i adaptacja technologii.

Główne bariery to:

- **bariery normalizacyjne:** wszystkie normy projektowe (np. Eurokody) są skalibrowane dla cementu portlandzkiego i jego właściwości. Inżynierowie nie dysponują jeszcze pełnym aparatem normatywnym i wieloletnimi badaniami trwałości, aby z pełną odpowiedzialnością stosować geopolimery w kluczowych konstrukcjach.
- **bariery logistyczne:** produkcja geopolimerów wymaga innych surowców (o stałej, wysokiej jakości) oraz płynnych aktywatorów alkalicznych, co wymaga przebudowy całego łańcucha dostaw.

Rynek, przynajmniej w krótkim terminie, wybiera bezpieczną ewolucję (ECOPact) zamiast obciążonej wyższym ryzykiem implementacyjnym rewolucji (*Geopolimery – krok...*, 2021).

3. Optymalizacja procesowa i cyfrowa: rola BIM i zrównoważonego projektowania

Redukcja śladu węglowego budownictwa nie zależy wyłącznie od chemii materiałów, ale także od inteligentnego zarządzania procesem projektowania i budowy (Almeida, Chaves i in., 2023).

Projektowanie w technologii Building Information Modeling (BIM) stanowi kluczowy element cyfrowej transformacji w branży budowlanej, przynosząc istotne korzyści w zakresie zarządzania cyklem życia budynków oraz redukcji emisji CO₂ (Anderson, Rønning, 2022). BIM to zaawansowane podejście do projektowania, które umożliwia szczegółowe odwzorowanie wszystkich funkcjonalnych, technicznych i fizycznych cech obiektów budowlanych w trójwymiarowym modelu cyfrowym. Dzięki precyzyjnemu modelowaniu i symulacjom możliwe jest skuteczne planowanie oraz optymalizacja różnych aspektów życia obiektu – od fazy projektowania, przez budowę, aż po eksploatację i ewentualną rozbiórkę (Bukowski, Fabrycka, 2019; Pszczolak, 2021).

Podstawowym celem BIM jest poprawa efektywności oraz zmniejszenie wpływu obiektów budowlanych na środowisko, w tym redukcja emisji CO₂ (Maibaum, Block i in., 2023). Wykorzystanie technologii BIM pozwala na dokładną analizę i optymalizację materiałów budowlanych

oraz procesów konstrukcyjnych. Na przykład, poprzez precyzyjne modelowanie możliwe jest zoptymalizowanie zużycia betonu (Drzazga, 2016), co prowadzi do obniżenia emisji CO₂ związanej z jego produkcją i transportem. Dodatkowo, analiza materiałów oraz procesów budowlanych w modelu 3D pozwala na identyfikację najbardziej efektywnych rozwiązań i technologii, co może przyczynić się do redukcji śladu węglowego nawet o około 30% (Wavin, Czy...).

Kolejnym istotnym aspektem projektowania w technologii BIM jest uwzględnienie przyszłej rozbiórki oraz możliwości ponownego wykorzystania elementów budynku (Dz.U.U.E.L.2023.231.1). W kontekście zrównoważonego rozwoju, istotne jest, aby budynki były projektowane z myślą o łatwej demontażu oraz recyklingu materiałów. Projekty BIM mogą obejmować scenariusze, w których elementy konstrukcyjne są zaprojektowane tak, aby mogły być łatwo usunięte, przechowywane i ponownie wykorzystane. To podejście jest szczególnie ważne w przypadku budynków o długotrwałej funkcjonalności, takich jak budynki biurowe, które mogą zmieniać swoje przeznaczenie w czasie. Projektowanie takich obiektów z myślą o elastyczności i przyszłej adaptacji sprzyja efektywniejszemu zarządzaniu zasobami i zmniejsza potrzebę na nowe materiały (Grzyl, Apollo i in., 2016).

W kontekście budownictwa z betonem, który charakteryzuje się dużą trwałością i długowiecznością, technologia BIM umożliwia projektowanie budynków o zrównoważonym cyklu życia. Wykorzystując BIM, projektanci mogą opracować rozwiązania, które optymalizują zużycie materiałów i zmniejszają emisje związane z budową, eksploatacją oraz rozbiórką obiektów (<https://bimcorner.com/>). To podejście wpisuje się w szersze cele zrównoważonego rozwoju i strategii ograniczania wpływu budownictwa na środowisko, promując jednocześnie innowacyjne praktyki i technologie w branży budowlanej.

3.1. Beton jako element zrównoważony

W kontekście globalnych wysiłków na rzecz redukcji emisji CO₂, optymalizacja receptur oraz procesów produkcyjnych w branży budowlanej staje się kluczowym elementem strategii zrównoważonego rozwoju (Bezegłów, 2024). Jednym z istotnych obszarów, w którym możliwe jest osiągnięcie znaczących oszczędności w zakresie emisji gazów cieplarnianych, jest produkcja betonu. Dzięki innowacjom

w zakresie receptur betonów, wykorzystaniu naturalnych materiałów oraz udoskonaleniu procesów produkcyjnych, możliwe jest osiągnięcie znaczącego obniżenia śladu węglowego, co przyczynia się do minimalizacji wpływu budownictwa na środowisko (Jędrasz, Prochowska, 2024).

Technologie cyfrowe pozwalają na nowo spojrzeć na zrównoważone atrybuty samego betonu. Największym problemem tego materiału jest jego wysoki wbudowany ślad węglowy (emisje przy produkcji) (Garbacz, Urbańska, 2021). Jego największe zalety to jednak wyjątkowa trwałość (często przekraczająca 100 lat) oraz efektywność operacyjna wynikająca z masy termicznej. Zdolność betonu do akumulowania i powolnego oddawania ciepła stabilizuje temperaturę wewnętrzną budynku, co może obniżyć zużycie energii na ogrzewanie i chłodzenie nawet o 15% (Gaj, Sobiech, 2016). Technologia BIM jest narzędziem, które po raz pierwszy pozwala precyzyjnie modelować i monetyzować te długoterminowe korzyści. BIM umożliwia przeprowadzenie wiarygodnej analizy LCA (Life Cycle Assessment) (Lasvaux, Habert i in., 2015), która wykazuje, że wyższy ślad węglowy wbudowany (emisje z produkcji) jest w perspektywie 50 czy 100 lat wielokrotnie kompensowany przez niższy ślad węglowy operacyjny (dzięki masie termicznej) oraz dłuższą żywotność w porównaniu z alternatywnymi materiałami. W ten sposób BIM pozwala przenieść dyskusję z „ceny za” na „całkowity koszt cyklu życia”, co jest kluczowe dla promocji betonu w erze Zielonego Ładu.

4. Podsumowanie i perspektywy badawcze

4.1. Wnioski

Osiągnięcie neutralności emisyjnej w przemyśle budowlanym stanowi jedno z najbardziej złożonych wyzwań współczesnej polityki klimatycznej. Proces ten wymaga wprowadzenia kilku fundamentalnych zmian, które obejmują nie tylko techniczne i technologiczne innowacje, ale również kompleksowe podejście do regulacji i finansowania. Centralnym elementem w dążeniu do neutralności emisyjnej jest zapewnienie dostępu do alternatywnych surowców oraz energii odnawialnej. W przemyśle budowlanym oznacza to konieczność rozwijania i wdrażania no-

wych materiałów budowlanych, które charakteryzują się niższym śladem węglowym, oraz przechodzenia na źródła energii, które nie przyczyniają się do emisji CO₂. Wprowadzenie takich rozwiązań wymaga jednak odpowiednich regulacji prawnych, które nie tylko ułatwią inwestycje w technologie niskoemisyjne, ale także zapewnią stabilne i rozsądne zyski dla inwestorów. Realizacja tych działań wiąże się z potrzebą stworzenia innowacyjnych modeli finansowania oraz dostosowania przepisów dotyczących wsparcia publicznego. Modele finansowe muszą uwzględniać nie tylko koszty początkowe związane z inwestycjami w nowe technologie, ale także długoterminowe korzyści, jakie mogą przynieść zrównoważone praktyki budowlane. Warto podkreślić, że osiągnięcie neutralności emisyjnej nie jest zadaniem, które można zrealizować wyłącznie poprzez działania podejmowane w ramach przemysłu cementowego. Kluczowym aspektem jest także dostępność alternatywnych surowców, której stopień jest w dużej mierze uzależniony od rynku. Dodatkowo, budowa nowych instalacji oraz rozwój infrastruktury przesyłowej dla dwutlenku węgla to procesy wymagające znacznego czasu i zasobów, co stawia przed planistami wyzwania związane z długofalowym planowaniem i implementacją strategii.

Ostatecznie, osiągnięcie neutralności emisyjnej w budownictwie wymaga zintegrowanego podejścia, obejmującego współpracę różnych interesariuszy, takich jak przemysł, rządy, instytucje finansowe oraz społeczeństwo. Tylko dzięki skoordynowanym wysiłkom możliwe będzie skuteczne zrealizowanie ambitnych celów klimatycznych i przyczynienie się do zrównoważonego rozwoju globalnego. Analiza danych emisyjnych wykazała, że region nie jest monolitem; Polska stoi przed wyzwaniem „wzrostu przy dekarbonizacji”, podczas gdy kraje takie jak Słowacja wykazują wysoką emisyjność per capita, co rodzi pytania o strukturę ich przemysłu. Ścieżka do neutralności klimatycznej wymaga portfela rozwiązań. Nie ma jednej, cudownej technologii. Konieczne jest jednocześnie wdrożenie: (a) mechanizmów rynkowych gwarantujących rentowność zielonych inwestycji (CBAM), (b) narzędzi stymulujących popyt i transparentność (EPBD+EPD), (c) łatwo skalowalnych technologii ewolucyjnych (betony niskoemisyjne typu ECOPact), (d) przełomowych technologii rewolucyjnych (geopolimery, cementy alternatywne) oraz (e) optymalizacji procesowej i cyfrowej (BIM, DfD). Wnioski te jednoznacznie wskazują, że nie istnieje jedna uniwersalna technologia dekarbonizacji, a sukces transformacji zależy od umiejętnego łączenia innowacji, regulacji i praktyki inżynierskiej. Wskazuje również na po-

trzebę zwiększenia integracji między środowiskiem naukowym, przemysłem i administracją publiczną. Brak skutecznego transferu wiedzy między tymi sferami ogranicza efektywność wdrażania innowacji niskoemisyjnych.

Niniejszy artykuł, ze względu na przyjętą metodologię, posiada określone ograniczenia, które należy uwzględnić przy interpretacji wniosków. Praca, jako desk research (przegląd literatury i danych wtórnych), identyfikuje trendy i koreluje dostępne informacje, ale nie dostarcza nowych danych empirycznych. Raport opiera się na danych obcych. Zgodnie z tytułem, raport koncentruje się na betonie jako centralnym materiale budowlanym. Ogranicza to analizę porównawczą z innymi strategicznymi materiałami (np. drewnem klejonym, stalą niskoemisyjną) w kontekście regionalnym. Raport identyfikuje rozwiązania technologiczne, ale nie przeprowadza szczegółowej analizy techno-ekonomicznej kosztów ich wdrożenia na dużą skalę w specyficznych warunkach krajów Europy Środkowej. Zidentyfikowane ograniczenia luki w danych wskazują wyraźne kierunki wzmocnionych badań niezbędnych do skutecznego wsparcia zmian w regionie.

Istnieje pilna potrzeba przeprowadzenia bardziej bezpośrednich badań porównawczych dotyczących wykonalności techno-ekonomicznej różnych ścieżek odchodzenia od emisji dwutlenku węgla w betonie w krajach środkowoeuropejskich. W przyszłych badaniach powinniśmy streścić je w pytaniach typu: „Jakie są prawdziwe koszty (i bariery) w łańcuchu dostaw dla produkcji betonu geopolimerowego w Polsce (kraj o bogatych zasobach popiołów lotnych) w porównaniu do Słowacji? Jak ten koszt odnosi się do kosztu i potencjału redukcji (30%) betonu typu ECOPact?”. Potrzebujemy badań, które eksplorowałyby obszary długoterminowych wpływów mechanizmu korekty na granicy emisji (CBAM) na handel cementem w Europie Środkowej, szczególnie w handlu z kluczowymi sąsiadami spoza UE (np. Ukrainą, Turcją, krajami Afryki Północnej). Sądząc po tym, jak niewystarczające są dane na temat aktywności regionu, potrzebujemy empirycznych danych o stopniu wykorzystania przez projektantów budowlanych w regionie modelowania informacji o budynku (BIM) do projektowania dla demontażu (DfD). Powinny również dostarczyć informacji o tym, jakie są kluczowe bariery (prawne, rynkowe, logistyczne) dla rozwoju wtórnego rynku dla prefabrykowanych elementów betonowych, który jest niezbędny, aby w pełni wykorzystać ich żywotną trwałość w budownictwie o cyrkularności niskoemisyjnej.

Interesy konkurencyjne:

Autor oświadczył, że nie istnieje konflikt interesów.

Competing interests:

The author has declared that no competing interests exists.

Wkład autorów

Konceptualizacja: Edyta Gosk, Ewelina Rudowska

Analiza formalna: Edyta Gosk, Ewelina Rudowska

Metodologia: Edyta Gosk, Ewelina Rudowska

Opracowanie artykułu – projekt, przegląd i redakcja: Edyta Gosk, Ewelina Rudowska

Authors contributions

Conceptualization: Edyta Gosk, Ewelina Rudowska

Formal analysis: Edyta Gosk, Ewelina Rudowska

Methodology: Edyta Gosk, Ewelina Rudowska

Writing – original draft, review and editing: Edyta Gosk, Ewelina Rudowska

Bibliografia

- Adamczak-Bugno A. (2023), *O szansach i zagrożeniach dla segmentu budownictwa kubaturowego*, Nowoczesne Budownictwo Inżynieryjne.
- Almeida R., Chaves L., Silva M., Carvalho M., Caldas L. (2023), *Integration between BIM and EPDs: Evaluation of the main difficulties and proposal of a framework based on ISO 19650:2018*, J. Build Eng. 68, 106091, <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2023.106091>.
- Anderson J., Moncaster A. (2022), *Using an analysis of concrete and cement EPD: Verification, selection, assessment, benchmarking and target setting*, Acta Polytech. CTU Proc. 33, 20–26, <https://doi.org/10.14311/APP.2022.33.0020>.
- Anderson J., Rønning A. (2022), *Using standards to maximize the benefit of digitization of construction product Environmental Product Declaration (EPD) to reduce Building Life Cycle Impacts*, E3S Web of Conferences 349, 10003–10008, <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202234910003>.
- Asdrubali F., Grazieschi G., Roncone M., Thiebat F., Carbonaro C. (2023), *Sustainability of building materials: Embodied energy and embodied carbon of masonry*, “Energies” 16(4), 1846, <https://doi.org/10.3390/en16041846>.
- Bezęglów E. (2024), *Zrównoważone budownictwo – wyzwania środowiskowe, regulacje prawne, kierunki rozwoju*, w: *Zrównoważony rozwój – trendy, wyzwania*

nia, kontrowersje, red. D. Teneta, Wydawnictwo Uniwersytetu Ekonomicznego we Wrocławiu.

- Błaszczyński T. Z., Król M. R. (2021), *Ekospołwa geopolimerowe*, „Builder”, 25.
- Bukowski H., Fabrycka W. (2019), *Budownictwo w obiegu zamkniętym w praktyce*, Instytut Innowacji i Odpowiedzialnego Rozwoju, Warszawa.
- Burchard-Dziubińska M., Rzeńca A., Drzazga D. (2014), *Zrównoważony rozwój – naturalny wybór*, Wydawnictwo Uniwersytetu Łódzkiego.
- CERTBUD, *Deklaracje środowiskowe*, https://certyfikacja-certbud.pl/epd?gad_source=1&gclid=Cj0KCQjwlvW2BhDyARIsADnIe-Jxm1LYJ_mMtDdvQJTdn-lYo8vjB_COBpnjdYnhCmhKUqWD0IZ_Vs6w8aAvyNEALw_wcB, 05.2024.
- Czarnecki L., Justnes H. (2012), *Zrównoważony, trwały beton*, Dni betonu.
- Czernik S., Michałowski B., Tomaszewska J., Michalak J. (2022), *The influence of cement on the environmental performance of construction products on the example of cementitious adhesives – External Thermal Insulation Composite Systems [ETICS] components*, “Cem Wapno Beton”, 27(1), s. 14–31, <https://doi.org/10.32047/cwb.2022.27.1.2>.
- Drzazga M. (2016), *BIM – zapis informacji o przedsięwzięciu budowlanym (projektowanie 5D)*, „Przegląd Budowlany”, 87(9), s. 33–37.
- Dz.U.UE.L.2023.231.1, Dyrektywa Parlamentu Europejskiego i Rady (UE) 2023/1791 z dnia 13 września 2023 r. w sprawie efektywności energetycznej oraz zmieniająca rozporządzenie (UE) 2023/955, <https://sip.lex.pl/akty-prawne/dzieniki-UE/dyrektywa-2023-1791-w-sprawie-efektywnosci-energetycznej-oraz-zmieniajaca-72206698>.
- ECOPACT – Beton niskoemisyjny od HOLCIM, <https://www.holcim.pl/beton-nisko-emisyjny-ecopact>, maj 2024.
- Erbach G., Jensen L. (2022), *Fit for 55 packages*, EPRS, European Parliament.
- European Commission (2019), *The European Green Deal*, Brussels, Belgium, <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX:52019DC0640>.
- European Education Area, European Commission, <https://education.ec.europa.eu/pl>, 05.2024.
- Foremny A., Nicał A. (2013), *Building Information Modeling: stan obecny i kierunki rozwoju*, „Autobusy. Technika, Eksploatacja, Systemy Transportowe”, 14, 1759–1766.
- Gaj J., Sobiech M. (2016), *Akumulacja ciepła w budynkach a bezpieczeństwo energetyczne*, „Inżynieria Bezpieczeństwa Obiektów Antropogenicznych”.
- Garbacz A., Urbańska P. (2021), *Ślad węglowy betonu*, „Budownictwo, Technologie, Architektura”.
- Gawlicki M., *Belit w cementach o malej emisji CO₂ w procesie klinkieryzacji (Belite in cements with low emission of CO₂ during clinker formation)*.
- Geopolimery – krok w kierunku zrównoważonego budownictwa (2021), <https://www.wim.pw.edu.pl/Studenci/Kolo-naukowe-WAKANS/Materialmiesiaca/mater->

- iałmiesiaca-Geopolimery-krok-w-kierunku-zrownowazonego-budownictwa, 05.2024.
- Giergiczny Z. (2014), *Nowe cementy i technologie wytwarzania spoiw alternatywnych. Materiały konferencyjne*, Konferencja Dni Betonu, Stowarzyszenie Producentów Cementu, Wisła.
- Global Carbon Atlas, (2024), <https://globalcarbonatlas.org/emissions/carbon-emissions/>, 05.2024.
- Głazewska M. (2024), *Deklaracje środowiskowe typu III – czego dowiemy się z EPD?*, <https://bzg.pl/poradnik/artykul/deklaracje-srodowiskowe-typu-iii-czego-dowiemy-sie-z-epd/id/49195>, 05.2024.
- Górak P., Gaudy J., Wójcik A., Grądzki A. (2021), *Zmniejszenie śladu węglowego w konstrukcjach mostowych za pomocą rozwiązań materiałowych dla betonów opartych na cementach nisko-klinkierowych*, Materiały XI Konferencji Dni Betonu, Wisła (ss. 11–13).
- Groeger L. (2016), *Programy wspierania budownictwa mieszkaniowego w Polsce i ich wpływ na rynek nieruchomości mieszkaniowych*, „Space–Society–Economy”, (18), ss. 131–146.
- Grzebułska B., Massalska B., Ostanek P., Zubel K., Romaniuk, P. (2020), *Droga do samowystarczalności energetycznej do 2050 roku dla Metropolii GZM*.
- Grzyl B., Apollo M., Miszewska E. (2016), *Building information modeling-analiza zakresu i stanu implementacji w polskiej branży budowlanej*, „Autobusy. Technika, Eksploatacja, Systemy Transportowe”, 1762–1768.
- Hadart (2020), *Na czym polega zrównoważony rozwój w budownictwie*, <https://hadart.pl/pl/na-czym-polega-zrownowazony-rozwoj-w-budownictwie/>, 05.2024.
- Holcim (2013), *Successful trial for new generation low carbon cement*, https://www.holcim.com/media/media-releases/successful-trial-new-generation-low-carbon-cement?_x_tr_sl=en&_x_tr_tl=pl&_x_tr_hl=pl&_x_tr_pto=sc, 05.2024.
- Jędrasz W., Prochowska O. (2024), *Czy BIM przeciwdziała zmianom klimatu i ich skutkom?*, <https://g4bim.pl/blog/bim-przeciw-zmianom-klimatu/>, 05.2024.
- Kamionka L. W. (2022), *Projektowanie zrównoważone w aspekcie zastosowania materiałów proekologicznych*, „Środowisko Mieszkaniowe”, (41), ss. 65–77.
- Klemczak B. (2018), *Masywne konstrukcje betonowe*, XXXIII Ogólnopolskie Warsztaty Pracy Projektanta Konstrukcji, Szczyrk.
- Komisja Europejska, *Redukcja emisji dwutlenku węgla przyszłością branży cementowej*, <https://cordis.europa.eu/article/id/406925-lower-co2-emissions-on-the-horizon-for-cement/pl>, 05.2024.
- Komisja Europejska, *Transformacja ekologiczna*, https://reform-support.ec.europa.eu/what-we-do/green-transition_pl, 05.2024.
- Komisja Europejska, *Uczenie się a transformacja ekologiczna i zrównoważony rozwój*, <https://education.ec.europa.eu/pl/focus-topics/green-education/learning-for-the-green-transition>, 05.2024.

- Kramarczyk M. (2023), *Geopolimery – rewolucyjny materiał budowlany przyszłości*, <https://proktor.pl/geopolimery-rewolucyjny-material-budowlany-przyszlosci>, 05.2024.
- Król M., Błaszczyński T. (2013), *Geopolimery w budownictwie*, „Izolacje”, 5.
- Krysiak P. (2022), *Zmiany w dyrektywie w sprawie charakterystyki energetycznej budynków*, „Rynek Instalacyjny”.
- Kuryś D., Gorzelak B. (2024), *Na drodze do neutralności klimatycznej – transformacja cementu i betonu*, „Budownictwo, Technologie, Architektura”.
- Kwiatkowski J. (2024), *Przyszłość systemu świadectw charakterystyki energetycznej – proponowane zmiany*, „Cyrkulacje. Powietrze, Wentylacja, Klimatyzacja”, (80).
- Lasvaux S., Habert G., Peuportier B., Chevalier J. (2015), *Comparison of generic and product-specific Life Cycle Assessment databases: application to construction materials used in building LCA studies*, Int. J. Life Cycle Assess., 20, 1473–1490, <https://doi.org/10.1007/s11367-015-0938-z>.
- Lis P., Sekret R. (2016), *Efektywność energetyczna budynków-wybrane zagadnienia problemowe*, „Rynek Energii”.
- Madej D., Kruk A. (2023), *Klasyczne i nowoczesne spojrzenie badawcze na procesy hydratacji cementów glinowo-wapniowych*, „Cement Wapno Beton”, 28.
- Magacho G., Espagne E., Godin A. (2024), *Impacts of the CBAM on EU trade partners: consequences for developing countries*, „Climate Policy”, 24(2), ss. 243–259.
- Maibaum J., Block M., König M., Wachsmann A. (2023), *BIM-based EPD adaptation in the context of ecological sustainability and municipal infrastructures*, w: *Life-Cycle of Structures and Infrastructure Systems*, red. F. Biondini, D. M. Frangopol, CRC Press, London, Great Britain, ss. 2329–2336.
- Majewski Sz. (2024), *Zdekarbonizowane budownictwo na horyzoncie. Przyjęto dyrektywę EPBD*, <https://www.teraz-srodowisko.pl/aktualnosci/dyrektywa-epbd-charakterystyka-energetyczna-budynkow-14932.html>, 05.2024.
- Michalak D., Rosiek K., Szyja P. (2020), *Gospodarka niskoemisyjna gospodarka cyrkularna zielona gospodarka. Uwarunkowania i wzajemne powiązania*, Wydawnictwo Uniwersytetu Łódzkiego.
- Nomikou M., Kouris C., Karkaletsis T., Kaloidas V., Badogiannis E. (2024), *A Proposal for the Use of Recycled Aggregates in Concrete in Greece*, „Materials Proceedings”, 15(1), 92.
- Pilch Z. (2007), *Beton w budynkach efektywnych energetycznie. Korzyści z masy termicznej*, Kraków.
- Piotrowski M. (2024), *Do 2027 roku chcemy produkować cement o zerowym śladzie węglowym*, <https://www.holcim.pl/blog/do-2027-roku-chcemy-produkowac-cement-o-zerowym-sladowym-weglowym>, 05.2024.
- Pszczolak M. (2021), *Jak zmniejszyć ślad węglowy w przemyśle aec – podstawy*, <https://bimcorner.com/pl/zrownowazona-budowa/>, 05.2024.
- Rada Europejska Rada Unii Europejskiej (2025), <https://www.consilium.europa.eu/pl/policies/fit-for-55/>.

- Rapacka P. (2023), *CBAM wchodzi w życie. Na razie rusza faza przejściowa*, <https://www.teraz-srodowisko.pl/aktualnosci/CBAM-wchodzi-w-zycie-na-razie-rusza-faza-przejsciowa-14006.html>, 05.2024.
- Sinno N., Lotfy A., Chaabene W. B. (2023, May), *Development of Low Carbon Concrete Solutions with Alternative Local Ontario Materials*, w: *Canadian Society of Civil Engineering Annual Conference* (ss. 269–276), Springer Nature Switzerland, Cham.
- Siuta-Oлча A. (2024), *Przyczyny i skutki zmian Dyrektywy Unii Europejskiej w sprawie charakterystyki energetycznej budynków*, „Polski Instalator”.
- Sosnowska A., Pyrka M., Jeszke R. (2023), *Wprowadzenie podatku granicznego od emisji gazów cieplarnianych (CBAM) jako nowego instrumentu polityki klimatycznej UE i jego potencjalne skutki ekonomiczne dla Polski*, „Studia BAS”, s. 145–170.
- Sójka A. J. (2022), *Europejski zielony ład – Unia Europejska od zrównoważonego rozwoju i bezpieczeństwa środowiskowego do ekologizmu*, „Studia Administracji i Bezpieczeństwa”, 12(12), ss. 121–139.
- Stepura D. (2024), *Managerial challenges of industrial enterprises in terms of compliance with the EU carbon emission regulations*.
- Stowarzyszenia Producentów Cementu (2021), *Mechanizm Ochrony Granic (CBAM) jako rozwiązanie chroniące polski i europejski przemysł cementowy*, <https://www.polskicement.pl/mechanizm-ochrony-granic-cbam-jako-rozwiazanie-chroniace-polski-i-europejski-przemysl-cementowy/>.
- Stowarzyszenie Producentów Cementu (2020), *Spajamy Europejski Zielony Ład. Osiągnięcie neutralności emisyjnej w łańcuchu wartości cementu i betonu do roku 2050*.
- Środa B. (2021), *Nowa norma 197-5 krokiem w kierunku dekarbonizacji*, „Budownictwo, Technologie, Architektura”.
- Środa B. (2024), *Cement i jego skład w erze dekarbonizacji*, „Budownictwo, Technologie, Architektura”.
- Vaillant, *Czy będzie zakaz kotłów gazowych, czyli o czym mówi dyrektywa EPBD*, <https://www.vaillant.pl/klienci-indywidualni/porady-i-wiedza/poradnik/inne/czy-bedzie-zakaz-kotlow-gazowych-czyli-o-czym-mowi-dyrektywa-epbd/>, 05.2024.
- Wavin, *Czy BIM wspiera optymalizację kosztów energetycznych? Odkrywamy odpowiedzi*, <https://blog.wavin.com/pl-pl/czy-bim-wspiera-optymalizacj%C4%99-kosztow-energetycznych>, 05.2024.
- Węglarz A., Gilewski P., Zdanowski P., Ogrodniczuk J., Rajkiewicz A., Twardowski J., ... Kus, J., *Strategia zaspokojenia zapotrzebowania na wykwalifikowanych pracowników energooszczędnego budownictwa w perspektywie 2030 roku*.
- Węglarz A., Kulik O., Skoczkowski T. (2021), *Niskoemisyjne budownictwo w Polsce w kontekście Europejskiego Zielonego Ładu*, „Materiały Budowlane”, (1).

- Wyrwa A., Radomska E., Pająk T., Mika Ł., Michalak P., Lis Ł., ... Sztekler K. (2025), *Efektywność wytwarzania i użytkowania energii*, „Energetyka Rozproszona”, (13–14), 9–33.
- Wysocka-Golec J., Witczak K., Głazewska M. (2023), *Deklaracja środowiskowa wyrobu (EPD) – istotne narzędzie dla branży budowlanej*, <https://kpmg.com/pl/pl/blogs/home/posts/2023/07/deklaracja-srodowiskowa-wyrobu-epd-istotne-narzedzie-dla-branzy-budowlanej-esg-blog.html>, 05.2024.
- Zalewski W. (2022), *Pakiet „Fit for 55” – wprowadzenie mechanizmu dostosowania cen na granicach (CBAM)*, https://www.ey.com/pl_pl/law/pakiet-fit-for-55-cbam, 05.2024.

Construction Industry on the Path to the Green Deal – Central European Countries

Summary

The article discusses regulations and strategies to reduce CO₂ emissions in the construction sector. A key element is the Border Price Adjustment Mechanism (CBAM), which, as part of the FitFor55 strategy, imposes tariffs on imported goods associated with high CO₂ emissions, such as steel and cement, to equalize costs between the EU and countries with less stringent emissions standards. The Energy Performance of Buildings Directive (EPBD) forces member states to improve the energy efficiency of buildings through certification and inspection of heating systems. EPD Environmental Declarations provide information on the environmental impact of building products, supporting sustainable construction. In cement production, particularly in Central Europe, it is crucial to implement modern technologies to reduce emissions. Technologies such as BIM and innovative types of cement, such as ECOPact, contribute to reducing the carbon footprint of buildings, supporting global climate goals.

Key words: CO₂ reduction, Environmental declarations, Sustainability, Green building materials

