

Beton

**niskoemisyjny
materiał
budowlany**

Redakcja: dr inż. Bożena Środa

Projekt: Artur Darłak

Skład i łamanie tekstu,
opracowanie graficzne: AD-LINE.PL

© Copyright by Stowarzyszenie Producentów Cementu, Kraków 2021

ISBN: 978-83-61331-42-1

Wydawca:



Stowarzyszenie Producentów Cementu
ul. Lubelska 29, 30-003 Kraków
tel. +48 12 423-33-55
e-mail: wydawnictwo@polskicement.pl
www.polskicement.pl

Druk i oprawa:

Drukarnia Skleniarz, Kraków

Spis treści



Słowo wstępne

Krzysztof Kieres

Przewodniczący Stowarzyszenia Producentów Cementu

05

Beton – niskoemisyjny materiał budowlany

Bożena Środa

Stowarzyszenie Producentów Cementu

06



Deklaracja środowiskowa III typu dla średnich cementów CEM I – CEM V produkowanych w Polsce

Instytut Techniki Budowlanej

14

Ślad węglowy betonu

Andrzej Garbacz, Paulina Urbańska

Politechnika Warszawska

24



Prefabrykacja betonowa krokiem w kierunku budownictwa o obiegu zamkniętym (Circular Building)

Wit Derkowski

Politechnika Krakowska; Linnaeus University, Szwecja;
fib COM6 „Prefabrication”

36



Krzysztof Kieres

Przewodniczący
Stowarzyszenia Producentów Cementu

Szanowni Państwo!

Oddajemy w Państwa ręce wydawnictwo okolicznościowe „Beton – niskoemisyjny materiał budowlany” przygotowany z okazji 11. edycji Konferencji Dni Betonu. Proponujemy, aby temat ten stał się także motywem przewodnim tej Konferencji.

Emisyjność materiałów budowlanych to bardzo aktualna i szeroko dyskutowana tematyka w kontekście działań dotyczących ochrony klimatu i jedno z najważniejszych wyzwań, przed jakimi obecnie stoi przemysł materiałów budowlanych w Europie i na świecie.

Ochrona klimatu to problem globalny, który w większym lub mniejszym stopniu w różnych rejonach świata jest przedmiotem dyskusji, analiz i regulacji prawnych. Pod tym względem Europa jest liderem, co znalazło swoje odzwierciedlenie w ambitnych celach Zielonego Ładu ogłoszonych przez Komisję Europejską w grudniu 2019 r. Z tym wyzwaniem przemysł w Europie będzie musiał się zmierzyć do 2050 r. Europejski Zielony Ład zakłada, że w ciągu najbliższych 10 lat w Europie uda się zredukować emisję CO₂ równoważną 55% ilości CO₂ wyemitowanego w 1990 r., a do roku 2050 osiągnąć pełną neutralność klimatyczną.

Europejski przemysł cementowy w maju 2020 r. przedstawił swoją drogę dojścia

do neutralności emisyjnej w okresie najbliższych 30 lat w publikacji „Spajamy Europejski Zielony Ład”. W zaprezentowanej Mapie Drogowej przeanalizowano możliwości redukcji emisji CO₂ w całym cyklu życia betonu – od wydobycia surowców, produkcję cementu, przygotowanie mieszanki betonowej, jej użycie w konstrukcji, możliwości redukcji emisji podczas eksploatacji tej konstrukcji, a następnie jej rozbiórkę i ponowne wykorzystanie betonu z rozbiórki.

Już dzisiaj wiemy, że dojście do neutralności emisyjnej nie zależy wyłącznie od działań podjętych przez sam przemysł, niezależnie od wysiłku jaki podejmie oraz kosztów, jakie poniesie. Konieczne są znaczne inwestycje, działania w obszarze badań, zastosowanie nowych technologii, zmiany w nawykach konsumpcyjnych, optymalizacja transportu, nowe materiały i ich zastosowanie, a wszystko to będzie wymagało współpracy na wielu poziomach, innowacyjnych form finansowania a także pomocy państwa.

Mamy nadzieję, że publikacja, którą Państwu przedkładamy stanie się przyczynkiem do ciekawych dyskusji podczas Konferencji i będzie stanowić dobre uzupełnienie zaprezentowanych referatów i opublikowanych materiałów konferencyjnych.



Beton

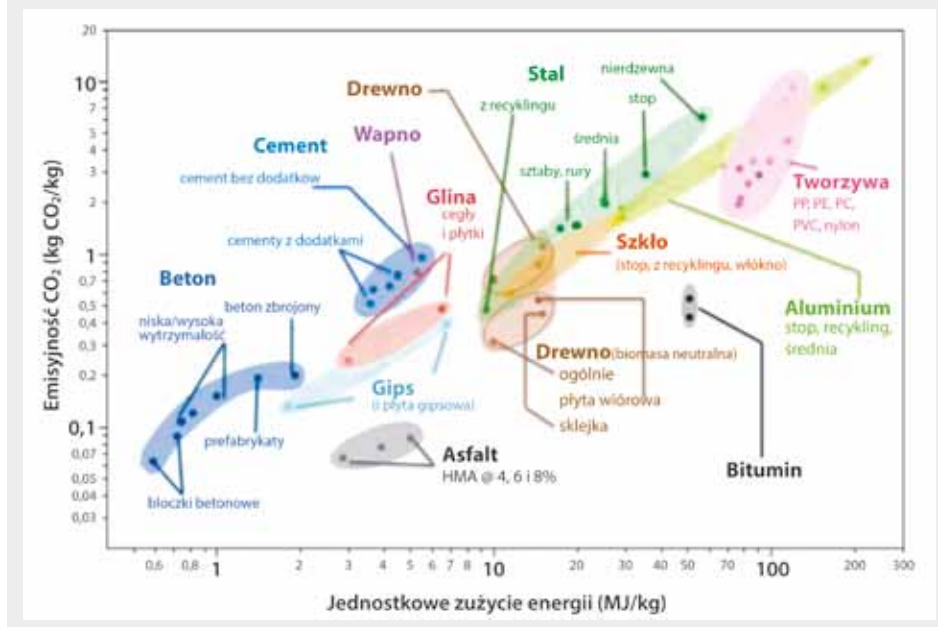
– niskoemisyjny materiał budowlany

dr inż. **Bożena Środa**

Stowarzyszenie Producentów Cementu

W dzisiejszych czasach beton jest zdecydowanie najpowszechniej stosowanym materiałem budowlanym na świecie. Prognozy wskazują, że nie ma realnej alternatywy dla tego materiału budowlanego i jego zużycie będzie rosło, szczególnie w krajach rozwijających się. Beton jest tani, dostępny lokalnie i łatwy w użyciu a dodatkowo cechuje się wszechstronnym zastosowaniem i nie ma konkurencji w wielu kluczowych konstrukcjach, np. w infrastrukturze, takiej jak mosty czy tamy. Ponadto, wbrew powszechnej opinii w porównaniu z innymi materiałami budowlanymi beton jest produktem niskoemisyjnym.

Do produkcji betonu używa się cementu, kruszywa i wody oraz domieszek chemicznych dla poprawy jego właściwości. W kompozytowej strukturze betonu cement stanowi spoiwo, zapewniające jego zwartą strukturę, wytrzymałość do przenoszenia obciążeń i odporność na warunki środowiskowe. Obecnie, cement jest produktem wytwarzanym przez człowieka w największych ilościach na świecie – od lat siedemdziesiątych jego produkcja na świecie wzrosła z poziomu 500 mln ton rocznie do ponad 4 mld ton w 2018 r. Przewiduje się, że wraz z rosnącą liczbą ludności na świecie i urbanizacją produkcja cementu może



Rys. 1. Emisyjność różnych materiałów budowlanych.

wzrosnąć o kolejne 20% (według prognoz ONZ liczba ludzi na świecie wzrośnie do ponad 9 mld w 2050 r., w tym w miastach z 3,6 do 6 mld). Nadal będą budowane domy i biurowce, drogi, mosty, zakłady przemysłowe, nowa infrastruktura transportowa, podstawy turbin wiatrowych, zapory hydroelektrowni czy elektrownie pływowe.

Obecnie, produkcja cementu jest odpowiedzialna za około 5% emi-

si CO₂ z produkcji cementu stanowi szczególne wyzwanie, ponieważ tylko około 40% bezpośredniej emisji pochodzi ze spalania paliw, natomiast pozostałe 60% CO₂ wynika z rozkładu surowców poddawanych obróbce termicznej w piecu cementowym. Dodatkowo, jak w wielu innych procesach przemysłowych, należy także uwzględnić emisję CO₂ wynikającą ze zużycia energii elektrycznej.

Coraz większa presja na dekarbonizację produkcji cementu zmusza producentów do poszukiwania różnych rozwiązań, pozwalających na redukcję emisji CO₂.

sji CO₂ na świecie. Coraz większa presja na dekarbonizację produkcji cementu zmusza producentów do poszukiwania różnych rozwiązań, pozwalających na redukcję tej emisji. Te poszukiwania muszą obejmować cały łańcuch dostaw, ponieważ w przypadku nowoczesnych, efektywnych energetycznie technologii produkcji cementu możliwości redukcji na tym etapie są znacznie ograniczone.

Dopiero wdrożenie innowacyjnych rozwiązań technologicznych i produktowych oraz podejście w dłuższym horyzoncie czasowym może przynieść znaczące efekty w tym zakresie.

W opublikowanym w grudniu 2019 r. przez Komisję Europejską komunikacie dotyczącym Europejskiego Zielonego Ładu zostały wyznaczone nowe cele redukcyjne w dążeniu do osiągnięcia

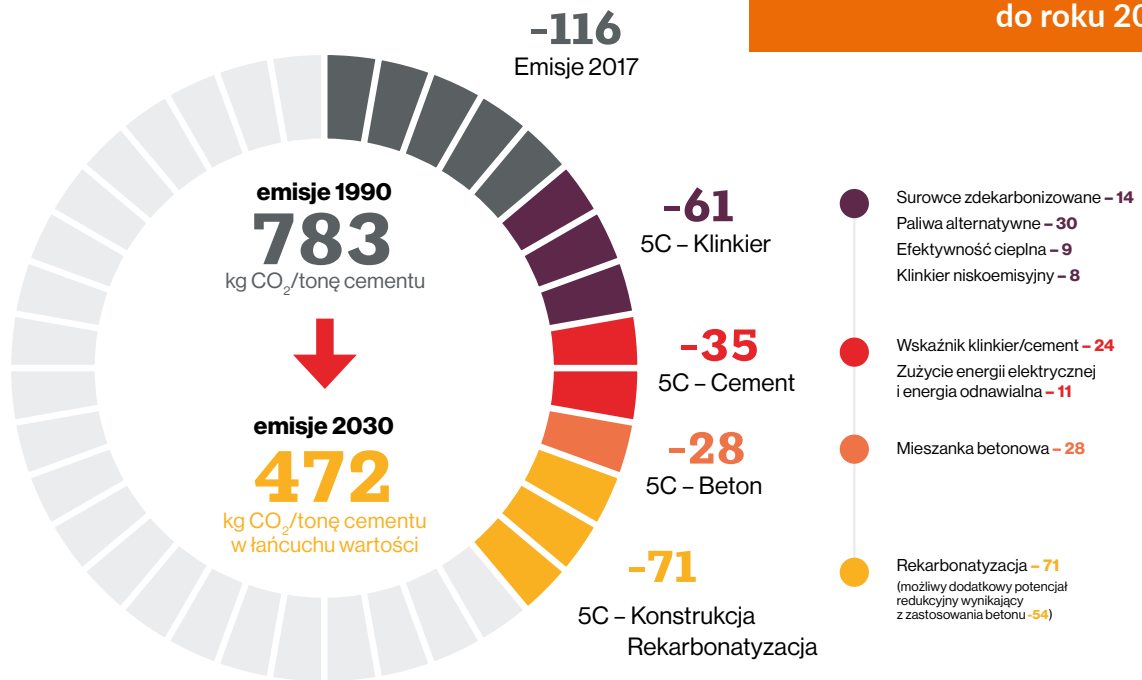


neutralności emisyjnej w roku 2050. Poziomem odniesienia dla realizacji tych celów jest emisja CO₂ z roku 1990 i w skorygowanym podejściu cel redukcyjny dla roku 2030 zwiększono z 40 do 55%, aby w roku 2050 zrealizować zakładane 100% redukcji. Po opublikowaniu nowych celów redukcyjnych sektor cementowy w Europie reprezentowany przez Europejskie Stowarzyszenie Cementowe Cembureau był zmuszony zweryfikować dotychczasowe podejście i przygotować bardziej ambitną wizję działań redukcyjnych, która została zaprezentowana w opublikowanej 12 maja 2020 r. Mapie Drogowej do 2050 pt. „Spajamy Europejski Zielony Ład”.

Istotnym narzędziem w polityce klimatycznej jest ocena śladu węglowego produktów, która wymaga przeanalizowania całego cyklu życia wyrobu. W przypadku sektora cementowego analiza cyklu życia obejmuje kilka etapów – począwszy od wydobycia

surowców i wyprodukowania klinkieru, poprzez produkcję cementu i mieszanki betonowej, po powstanie konstrukcji i następnie jej rozbiórkę. Rozbiórka konstrukcji stanowi koniec pierwszego cyklu życia, a drugie zaczyna się gdy całe elementy ze starej konstrukcji lub w postaci kruszywa zostaną ponownie użyte. Dodatkowo, aby rzetelnie ocenić ślad węglowy betonu powinno się także uwzględnić dodatkowy proces, który ma miejsce podczas użytkowania konstrukcji betonowej – to karbonatyzacja, czyli proces pochłaniania CO₂ przez beton. W opublikowanej Mapie Drogowej Cembureau przeanalizowano wszystkie etapy pod kątem możliwości redukcji emisji CO₂ na każdym z nich. Realizacja celów redukcyjnych będzie wymagała podjęcia szeroko zakrojonych działań – od szukania dalszych ulepszeń technologii produkcji cementu poprzez badania nad wdrożeniem przełomowej technologii wychwytywania i zagospodarowania CO₂ po optymalizację wykorzystania materiału w konstrukcji i ponowne wykorzystanie materiału z odzysku. Analiza wykazała, że od roku 1990, jako poziomu odniesienia dla redukcji emisji, europejski przemysł cementowy w ciągu ostatnich 30 lat obniżył średnią jednostkową emisję CO₂ na tonę cementu o około 15%. W Polsce, dzięki gruntownej modernizacji i przebudowie zakładów cementowych poziom tej redukcji wyniósł aż 40%. Na poniższych schematach zestawiono ścieżki dojścia do odpowiednich

Mapa drogowa CEMBUREAU
do roku 2030

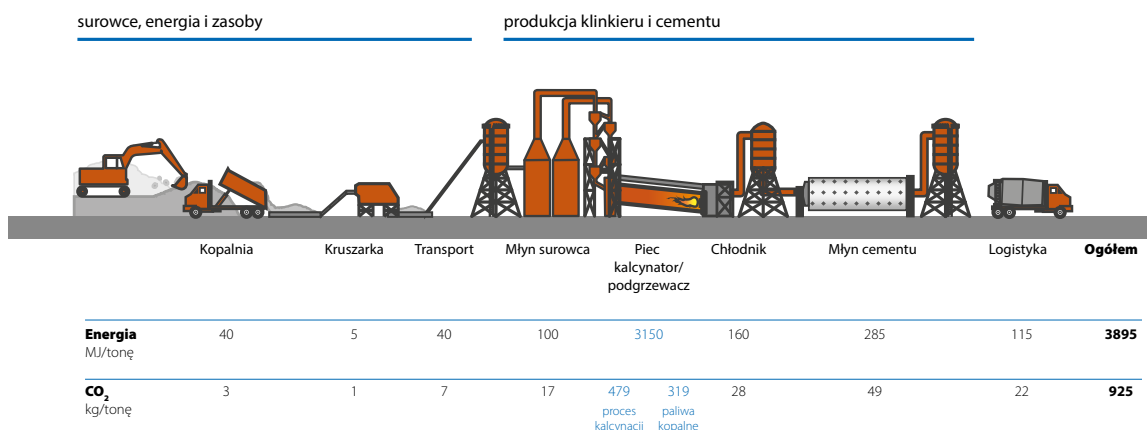


Redukcja CO₂ w łańcuchu wartości cementu (5 punktów: klinkier, cement, beton, budownictwo, rekarbonatyzacja)

Mapa drogowa CEMBUREAU
do roku 2050



Redukcja CO₂ w łańcuchu wartości cementu (5 punktów: klinkier, cement, beton, budownictwo, rekarbonatyzacja)



Rys. 2. Schemat poglądowy procesu produkcji cementu.

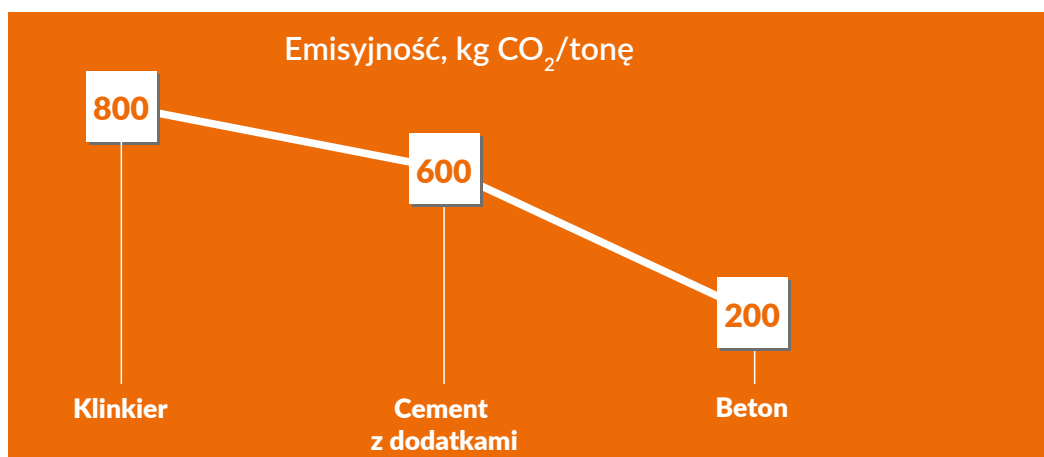
poziomów redukcji CO₂ do roku 2030 i 2050.

W cyklu produkcyjnym betonu największą część emisji CO₂ powstaje na etapie produkcji klinkieru portlandzkiego. Jest to składnik cementu, którego wytworzenie wymaga podgrzania surowców do 1450°C a dodatkowo przy jego produkcji jest uwalniany CO₂ w procesie kalcynacji surowców.

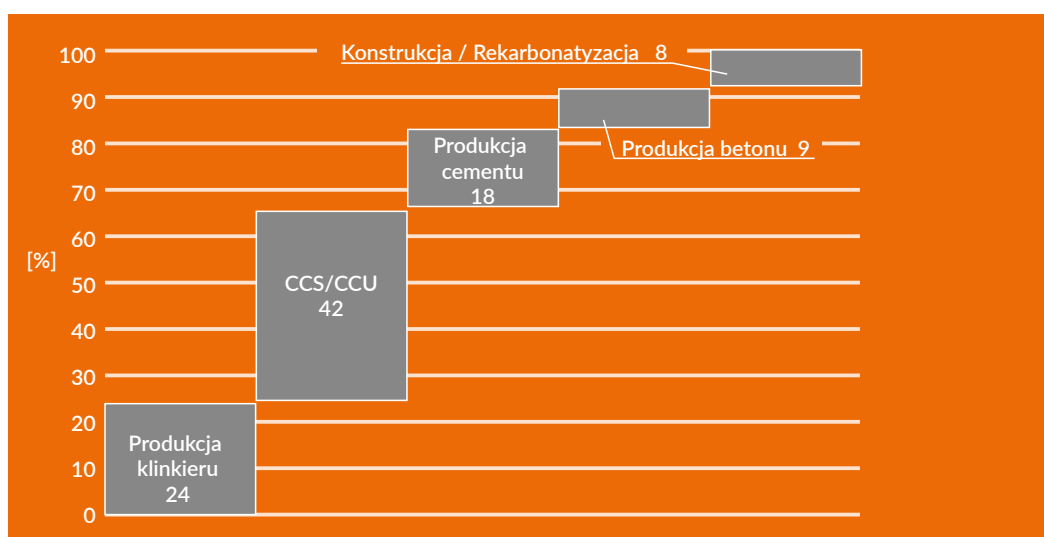
Znaczący efekt redukcyjny emisji CO₂ można osiągnąć ograniczając ilość klinkieru portlandzkiego w cemencie. Tradycyjny cement portlandzki bez dodatków zawiera w swoim składzie > 90% klinkieru portlandzkiego i jest głównie wytwarzany z kamienia wapiennego. Wyprodukowanie 1 tony klinkieru wymaga średnio 3,7 GJ ciepła i powoduje emisję około 850 kg CO₂. Niższa emisja w przypadku redukcji wskaźnika klinkier/cement (obecnie w Polsce wskaźnik ten wynosi 75%) wynika z jednej strony z mniejszej emisji procesowej pochodzącej z kalcynacji surowców i jednocześnie z niższego zapotrzebowania ciepła do wytworzenia minerałów klinkierowych. Ilość klinkieru portlandzkiego, który może

być zastąpiony w cemencie innymi dodatkami reguluje norma cementowa a także zależy od rodzaju tych dodatków, klasy betonu i jego zastosowania w danej konstrukcji. W 2018 roku przemysł cementowy w Polsce zużył niemal 2 mln ton żużli wielkopieczowych, ponad 1 mln ton popiołów lotnych oraz ponad 650 tys. ton kamienia wapiennego jako dodatków przy produkcji cementu. Odpadowe zdekarbonizowane materiały zastępujące kamień wapienny są także stosowane w piecu cementowym przy produkcji samego klinkieru portlandzkiego. W 2018 r. zużyto ponad 1 mln ton tego typu dodatków.

Na świecie od wielu lat prowadzi się badania nad możliwością wykorzystania alternatywnych materiałów, które mogłyby efektywnie zastąpić część klinkieru portlandzkiego w cemencie. Obejmują one szeroki zakres poszukiwań, jak alternatywne klinkiery, jak np.: klinkier belitowy, zamienniki klinkieru w cemencie, aktywowane spoiwa alkaliczne. Innym sposobem redukcji emisji CO₂ na etapie produkcji klinkieru jest wykorzystanie paliw alternatywnych. W cementowni emisja



Rys. 3. Zmiana emisyjności w cyklu produkcyjnym betonu.



Rys. 4. Potencjał redukcyjny w całym łańcuchu wartości cementu i betonu do roku 2050 (źródło: Cembureau).

CO₂ z paliw stanowi około 35-40% łącznej emisji z produkcji cementu. Zastąpienie paliw kopalnych (węgiel) paliwami alternatywnymi produkowanymi z różnych frakcji odpadów, które zawierają węgiel biogeny i biomasę pozwala na częściową redukcję emisji paliwowej. W Europie w roku 2018 paliwa alternatywne pokryły 48% łącznego zużycia paliwa w piecach cementowych. W tym samym roku w Polsce poziom zastąpienia ciepła z paliw alternatywnych wyniósł 65% i nie ma przeszkód technicznych, aby zwiększyć zużycie paliw alternatywnych do ponad 90%.

Jednak, najskuteczniejszą technologią redukcji emisji CO₂ z cementowni jest metoda wychwytywania CO₂, a następnie jego składowanie w strukturach geologicznych lub wykorzystanie jako surowca w różnych technologiach (ang. Carbon Capture Usage/Storage – CCUS). Już od kilku lat trwają pilotażowe badania nad tą technologią, ale obecnie przyjmuje się, że wdrożenie na skalę przemysłową może nastąpić dopiero po roku 2040. Jak w każdym innym procesie przemysłowym, również w cementowni zużywa się energię elektryczną. W przyszłości planuje się, że

energia ta w 100% będzie energia odnawialną. Również transport surowców czy paliw dostarczanych do cementowni oraz transport produktów cementowych do odbiorców końcowych przyczynia się do emisji CO₂. Wprowadzenie zeroemisyjnych form transportu i przejście na pojazdy napędzane silnikami elektrycznymi, wodorowymi lub ich kombinacją, w tym hybrydowymi, wykorzystującymi energię elektryczną, biodiesel i wodór pozwoli na redukcję tej części emisji.

W porównaniu do emisji CO₂ z produkcji cementu jej ilość pochodząca z samej produkcji betonu jest znacznie niższa. Największa część emisji CO₂ pochodzi pośrednio z transportu betonu do użytkownika końcowego na plac budowy oraz wynika ze zużycia energii niezbędnej do pompowania mieszanki. Zakłada się, że do roku 2050 całość transportu będzie realizowana pojazdami bezemisyjnymi dzięki przejściu na napęd elektryczny, wodorowy lub ich kombinację. Rozwój cyfryzacji procesów wytwarzania i zastosowania betonu pozwoli na lepszą kontrolę i zmniejszenia emisji CO₂. Dzięki temu wykonawcy będą zamawiać na plac budowy dokładnie taką ilość betonu, jaka jest potrzebna. Digitalizacja pomoże w wykorzystaniu kruszywa o odpowiednim uziarnieniu i optymalizacji dozowania domieszek a także monitorowaniu betonu podczas transportu i zapewnieniu prawidłowego betonowania. Dane o cementach i betonach będą dostępne dla wykonawcy oraz nabywców

budynku, co pozwoli im określić jego ślad węglowy, źródło materiałów wykorzystanych do budowy, a także monitorować parametry energetyczne budynków w okresie ich użytkowania. Eksploatacja budynku wykonanego z betonu to kolejny etap cyklu życia betonu. Obecnie w Europie 72% łącznej emisji CO₂ związanej z przeciętnym budynkiem pochodzi ze zużycia energii w okresie jego eksploatacji. Dzięki masie termicznej betonu, w budynkach można obniżyć zużycie energii o 25%, a nawet do 50% w okresach szczytowego zapotrzebowania. Możliwe jest także zmniejszenie ilości betonu w budynkach i innych obiektach budowlanych poprzez jego efektywniejsze wykorzystanie, przy jednoczesnym zagwarantowaniu trwałości i odpowiedniego okresu użytkowania budowli. W pewnych rodzajach budynków można obniżyć emisję CO₂ nawet o 30% przez zastosowanie odpowiedniego projektu konstrukcji. Wznoszenie budynków można np. usprawnić, stosując druk 3D.

Budynki biurowe często projektuje się pod wiele funkcji, dzięki czemu, jeżeli popyt np. na przestrzeń biurową w danym rejonie spadnie, biurowiec można przekształcić w budynek mieszkalny. Budynki o konstrukcji betonowej można przystosować do potrzeb najemcy, jako budynki o funkcji mieszanej. Trwałość i długowieczność betonu znakomicie umożliwia takie przebudowy ze względu na zmieniające się potrzeby rynkowe. W przypadku starszych budynków istnieje tendencja do ponownego

wykorzystania betonowej konstrukcji budynku zamiast jej całkowitego wyburzenia.

W modelu „projektowania pod rozbiórkę” budynek od początku opracowuje się z uwzględnieniem jego rozbiórki, a następnie ponownego użycia elementów. Podejście to umożliwia łatwy demontaż materiałów i elementów w celu ich ponownego użycia do wzniesienia nowego budynku.

Także w budownictwie drogowym beton ma przewagę nad tradycyjnymi nawierzchniami asfaltowymi – w badaniach stwierdzono, że występują niższe opory toczenia między kołem a podłożem z betonu, co pozwala na oszczędności w zużyciu paliwa. Dodatkowo, nawierzchnia betonowa wymaga mniej remontów a dzięki jaśniejszej barwie ma wyższą odbijalność światła, co może ograniczyć potrzebę oświetlania ulic oraz efekt wyspy termicznej w obszarach zabudowanych. Ponadto, beton jest materiałem, który po rozbiórce można wykorzystać ponownie bez zaawansowanych procesów przetwarzania. Beton z wyburzenia można rozdrobnić i ponownie wykorzystać jako kruszywo lub materiał do budowy dróg albo jako surowiec do produkcji cementu. Obecnie jednak, ze względu na niższe zużycie energii promuje się wykorzystywanie w pierwotnej formie całych elementów betonowych z rozbiórki. Również w przypadku ponownego wykorzystania elementów z rozbiórki można uwzględnić masę termiczną betonu.

Z punktu widzenia realizacji celów polityki klimatycznej beton posiada

jeszcze jedną przewagę nad innymi materiałami budowlanymi. Posiada bowiem potencjał powolnego pochłaniania dwutlenku węgla – w okresie eksploatacji budowli betonowej proces pochłaniania odbywa się głównie na powierzchni użytkowanych konstrukcji a po rozdrobieniu powierzchnia pochłaniania wzrasta i rośnie wraz z czasem ekspozycji kruszywa betonowego na oddziaływanie z atmosferycznym CO₂.

Na koniec warto zwrócić uwagę na jeszcze jeden aspekt możliwości redukcyjnych wynikających z odpowiedniego zastosowania betonu i poprawy śladu węglowego przemysłu cementowo-betonowego. Jest nią odejście od dominacji cementu portlandzkiego, jako podstawowego składnika we wszystkich rodzajach betonu w kierunku różnicowania wykorzystania różnych rodzajów cementów w zależności od zastosowania w konstrukcjach. Jest to możliwe, biorąc pod uwagę szeroki zakres tych zastosowań, jak zaprawy, bloczki betonowe czy beton zbrojony. Uzasadnione byłoby dopasowywanie odpowiednich cementów do odpowiednich zastosowań – od cementów niskoemisyjnych po cementy wysokoemisyjne, które byłyby zarezerwowane tylko dla tych zastosowań, w których ich specyficzne parametry są niezbędne. Realizacja takiego podejścia będzie wymagała wdrożenia na dużą skalę cyfrowych systemów produkcji, dzięki którym będzie możliwe bardziej efektywne pod względem zużycia materiałów projektowanie i wykonywanie elementów konstrukcji budowlanej.



Deklaracja środowiskowa III typu dla średnich cementów CEM I – CEM V produkowanych w Polsce

Instytut Techniki Budowlanej

Warszawa

Zgodnie z Rozporządzeniem Parlamentu Europejskiego i Rady (UE) ustanawiającego zharmonizowane warunki wprowadzania do obrotu wyrobów budowlanych (w skrócie CPR – Construction Product Regulation) ocena zrównoważonego wykorzystania zasobów i wpływu wyrobów oraz obiektów budowlanych na środowisko powinna się odbywać na podstawie deklaracji środowiskowych produktów. W związku z tym, wyroby budowlane dystrybuowane na rynku Unii Europejskiej posiadają obowiązkową Deklarację Właściwości Użytkowych

(DoP) oraz dobrowolną Deklarację Środowiskową Produktu (EPD).

Jednym z instrumentów, które pozwalają na ocenę ekologicznych skutków działalności budowlanej jest bilans ekologiczny dowolnego obiektu budowlanego w pełnym cyklu jego życia – „od kołyski po grób” (od wytworzenia materiałów i wyrobów budowlanych, poprzez etap budowy, użytkowania oraz rozbiórki i recyklingu materiałów budowlanych) oraz identyfikacja tych etapów życia budynku, w których występują największe obciążenia środowiskowe w celu ich

zmniejszenia. Bilans ekologiczny rozumiany jako ocena cyklu życia jest integralnie powiązany z dokumentami normalizacyjnymi z grupy ISO 14020, dotyczącymi etykietowania środowiskowego i opracowania deklaracji środowiskowych III typu.

Deklaracja środowiskowa produktu (EPD) typu III to zdefiniowana według normy ISO 14025 ilościowa

konsumenta i wspierania rozwoju niskoemisyjnego projektowania budynków. Przedsiębiorca posiadający Deklaracje Środowiskowe na swoje wyroby informuje rynek, że jego firma zobowiązała się do ograniczenia wpływu procesów produkcyjnych na środowisko. Produkty z EPD są wykorzystywane podczas budowy obiektów, dla których uzyskiwane

W Polsce instytucją upoważnioną do przygotowywania i wydawania deklaracji środowiskowych wyrobów budowlanych jest Instytut Techniki Budowlanej.

informacja środowiskowa o cyklu życia danego produktu. Zawiera ona parametry określone przez serię norm z grupy ISO 14040, ale może również zawierać inne dodatkowe informacje dotyczące środowiska. Deklaracja szczegółowo opisuje oddziaływanie produktu na środowisko podczas jego całego cyklu życia (LCA): od pozyskania surowców, przez etap produkcji, transport, użytkowanie, aż do utylizacji i recyklingu. Określa ona ilościowo wydobycie surowców, energochłonność procesu produkcji, zużycie wody i wytwarzanie odpadów.

Celem deklaracji jest zapewnienie narzędzia do obiektywnego porównywania produktów pod kątem ich ekologiczności oraz, poprzez te informacje, wspieranie popytu i podaży produktów i usług bardziej przyjaznych dla środowiska. Właściwości środowiskowe cementu coraz częściej są deklarowane przez producentów w celu budowania świadomości ekologicznej

są certyfikaty zrównoważonego budownictwa (systemy DGNB, LEED, BREEAM i inne). Deklaracja ta nie tylko zwiększa szanse budynku na uzyskanie certyfikatu BREEAM lub LEED, ale także pozwala klientom na podejmowanie świadomych decyzji konsumenckich, prowadzących do redukcji wpływu budynku na środowisko. Znajdują zastosowanie w przypadku konieczności określenia właściwości środowiskowych produktów składających się z komponentów (tzn. budynków lub złożonych wyrobów).

Deklaracje EPD podlegają weryfikacji przez niezależną stronę trzecią, która posiada w tym zakresie wymagane kompetencje i wiedzę. Podmioty wydające i weryfikujące deklaracje III typu zrzeszone są w Międzynarodowej organizacji ECO-Platform. W Polsce instytucją upoważnioną do przygotowywania i wydawania deklaracji środowiskowych wyrobów budowlanych jest Instytut Techniki Budowlanej, działający w oparciu o normę PN-EN

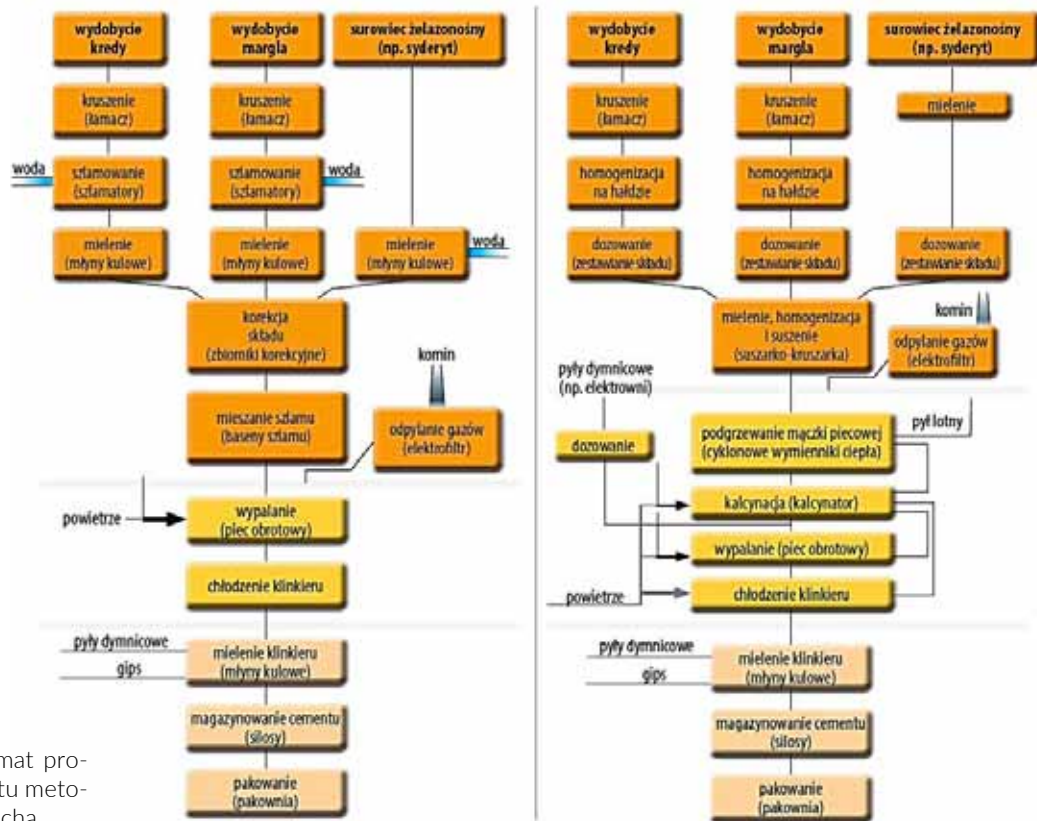


15804 i wewnętrzny regulamin kategoryzacji Produktów ITB PCR A. Weryfikacja danych analizy LCA przeprowadzona przez niezależnego weryfikatora, obejmuje jako minimum zakresu weryfikacji sprawdzenie: zgodność z dokumentem PCR, zgodność z PN-EN 15804, zgodność z normą ISO 14040, wiarygodność uzyskanych wyników LCA.

W roku 2020 Instytut Techniki Budowlanej (ITB) na zlecenie Stowarzyszenia Producentów Cementu (SPC) opracował Deklarację Środowiskową III Typu dla średnich cementów CEM I, CEM II, CEM III, CEM IV i CEM V wyprodukowanych w Polsce. Deklaracja jest ważna

przez 5 lat od 1 czerwca 2020 r. do 1 czerwca 2025 r. Członkowie Stowarzyszenia mogą posługiwać się EPD opracowanymi na zlecenie SPC dla średnich cementów.

Analiza cyklu życia cementu (LCA) została przeprowadzona zgodnie z normami: PN-EN 15804, PN-EN 16908, PN-EN ISO 14025, PN-EN ISO 14040 i zasadami kategoryzacji wyrobów ITB PCR-A. Deklarację Środowiskową III Typu dla cementów CEM I – CEM V przygotowano w oparciu o metodykę cyklu życia LCA, zgodnie z wytycznymi zawartymi w normach PN-EN 15804 Zrównoważenie robót budowlanych – Deklaracje środowiskowe wyrobu – Podstawowe zasady



Rys. 1. Schemat produkcji cementu metodą mokrą i suchą.

kategoriacji wyrobów budowlanych i ISO 14067:2018 Greenhouse gases – Carbon footprint of products – Requirements and guidelines for quantification. Poprzez ślad węglowy rozumie się całkowitą sumę emisji gazów cieplarnianych, wywołanych bezpośrednio podczas produkcji cementu, obejmującej następujące etapy: wydobycie surowców, ich przetwórstwo i towarzyszące temu zużycie energii, transport i właściwy proces produkcji cementu. Deklaracja Środowiskowa III typu dostarcza informacji w odniesieniu do jednostki masy wyrobu (1 kg). Informacja ta może zostać wykorzystana do przygotowania oceny dla specyficznego zastosowania cementu w odniesieniu do jego całego cyklu życia w budynku.

Produkcja cementu objęta jest krajowymi i europejskimi przepisami, które regulują efekty oddziaływania na środowisko, takie jak wydobycie surowców naturalnych, rekultywacja kopalni, odzysk energii

i materiałów z odpadów, emisje hałasu pyłów i innych substancji niebezpiecznych (NO_x , SO_2 , metale ciężkie itd.). Ślad węglowy klinkieru został policzony zgodnie z wytycznymi IPCC (MRV). Przy opracowywaniu EPD korzystano z różnych źródeł danych. Były to dane statystyczne za 2017 r. dostępne w SPC, baza Ecoinvent, dane EPD dla gipsów i anhydrytów opracowane przez ITB, dane KOBIZE dotyczące paliw i energii elektrycznej, dane ITB dotyczące składników drugorzędnych, żużli i pucolan. Cement jest produktem pośrednim, o wielu różnych zastosowaniach końcowych (beton towarowy, prefabrykaty betonowe, tynki, zaprawy murarskie itp.) i zazwyczaj nie jest możliwe podanie informacji na temat wpływu cementu na środowisko podczas budowy, użytkowania i w końcowym etapie eksploatacji, ponieważ w dużym stopniu zależą one od przeznaczenia cementu i jego użytkowania. Informacje środowiskowe dotyczące wszystkich

etapów cyklu życia (tzw. „cradle-to-grave” – od kopalni po grób); czyli od wydobycia surowców do końca etapu likwidacji obiektu można rozpatrywać w trzech następujących fazach:

- fazie wyrobu A (tzw. „cradle-to-gate” – od kopalni do bramy zakładu, czyli od wydobycia surowców, transport surowców do miejsca produkcji, proces produkcyjny, transport do miejsca budowy, instalacja w budynku (opcjonalnie),
- fazie budynku B: użytkowanie, eksploatacja, zastąpienie (opcjonalnie),
- fazie likwidacji C: rozbiórka, pozostawienie zagospodarowanie (opcjonalnie).

Elementy fazy wyrobu A są obligatoryjne do uzyskania najprostszej deklaracji środowiskowej wyrobu. Na potrzeby opracowania dla SPC obliczenia obejmują etapy analizy LCA związane z pozyskaniem surowców (A1), ich transportem do zakładu (A2) oraz procesem produkcji (A3), zgodnie z wytycznymi normy EN 15804. Główne etapy procesu produkcji cementów to: wydobycie i zakup surowców, produkcja mączki surowcowej, wypał klinkieru, przemiał cementu, składowanie cementu.

Surowcami naturalnymi do produkcji cementu są przede wszystkim materiały wapienne, takie jak wapień lub margiel, piasek, materiały glinowe, takie jak glina lub łupek, które występują powszechnie. W procesie stosowane są surowce alternatywne, takie jak popioły, żużle jako substytuty surowców naturalnych. Użycie zamienników

Tabela 1. Surowce użyte do produkcji CEM I – CEM V w Polsce.

Rodzaj cementu	Udział procentowy składników
CEM I – 46 % produkcji krajowej	
klinkier	92,0
regulator wiązania	3,0
składniki drugorzędne	5,0
CEM II – 41 % produkcji krajowej	
klinkier	70,3
regulator wiązania	3,8
popiół	11,7
żużel	6,2
kamień wapienny	5,0
składniki drugorzędne	3,0
CEM III – 12,4 % produkcji krajowej	
klinkier	43,0
regulator wiązania	4,0
żużel	53,0
składniki drugorzędne	0,0
CEM IV – 0,4 % produkcji krajowej	
klinkier	56,9
regulator wiązania	4,0
popiół	37,4
składniki drugorzędne	1,7
CEM V – 0,2 % produkcji krajowej	
klinkier	58,2
regulator wiązania	3,8
popiół	18,5
żużel	19,5

klinkieru ma znaczący wpływ na zmniejszenie śladu węglowego cementu.

Roczna produkcja klinkieru stosowanego do produkcji cementu w 2017 roku wyniosła: 12838,93 tys. ton metodą suchą oraz 95,4 tys. ton metodą moką, podczas

Tabela 2. Rodzaje paliw biorące udział w procesie produkcji klinkieru w Polsce.

Rodzaj paliwa na wypał klinkieru	Zużycie energii GJ	Udział w produkcji %	GJ/tonę klinkieru	Współczynnik emisji Mg CO ₂ /GJ	Współczynnik emisji paliwowej Mg CO ₂ /tonę kl.
Węgiel + petcoke	16 615 969	35,2	1,28	0,094	0,12
Oleje opałowe	70 804	0,12	0,0044	0,074	0,00033
Oleje opałowe ciężkie	26 739	0,15	0,0054	0,077	0,00042
Paliwa alternatywne/RDF*	30 334 203	64,4	2,34	0,049	0,11
Suma	47 080 944				

*Przyjęto niebiogenną wartość emisji CO₂

gdy całkowita produkcja cementu wyniosła 17119,3 tys. ton.

Produkcja mączki w metodzie mokrej wymaga przygotowania szlamu z mączki przed wypałem, który jest homogenizowany i pompowany do pieca. W metodzie suchej żadaną mieszankę najczęściej przygotowuje się w jednostopniowym procesie mielenia. Do procesu suszenia stosuje się ciepło z gazów procesowych. Ilość cementu produkowanego metodą mokrą jest minimalna i zmniejsza się w każdym roku. Mączka surowcowa jest wstępnie podgrzewana z wykorzystaniem gazów surowcowych, a następnie wypalana w piecu obrotowym w temperaturze ok. 1450°C. Głównymi paliwami stosowanymi w procesie są węgiel kamienny (35,2%). Stosowane paliwa alternatywne pochodzą z odpadów, a ich udział z roku na rok sukcesywnie wzrasta. Duża część paliw alternatywnych charakteryzuje się zawartością biomasy o niskim współczynniku śladu węglowego (średnio w Polsce 0,049 MgCO₂/GJ). Zastosowanie paliw alternatywnych znacząco zmniejsza ślad węglowy cementu. Biorąc pod uwagę ilość ciepła

produkowanego z paliw przy produkcji cementu paliwa alternatywne to 64,4% całości energii.

Rodzaje i ilości paliw przedstawiono w tabeli 2. Kaloryczność paliw dobrano za pomocą danych literaturowych i statystycznych (KOBIZE). Ilość CO₂ wyliczonego zgodnie z CITL wynosiła w 2017 roku 10 269 800 ton. W przeliczeniu na produkcję klinkieru jest to 0,794 Mg CO₂/tonę klinkieru. Współczynnik emisji procesowej wyniósł 0,51 MgCO₂/tonę klinkieru. Dla wyprodukowania cementu klinkier jest mielony wraz z dodatkami. Zużycie energii na przemiał cementu wynosi średnio 48,1 kWh/tonę. Całkowite zużycie energii elektrycznej w produkcji cementu wynosi 104,5 kWh/tonę. Emisyjność produkcji energii elektrycznej w Polsce wynosi 0,73 kg/kWh (Tauron) lub 0,778 kg/kWh (KOBIZE). W analizie LCA wzięto pod uwagę fazę wyrobu następujące procesy/moduły: A1 – wytwarzanie surowców: wydobywanie paliw, wydobywanie surowców, produkcję energii elektrycznej, produkcję paliw alternatywnych, A2 – transport: transport surowców, A3 – produkcję wyrobu: produkcję

Tabela 3. Składowe w analizie śladu węglowego cementu wraz z ich śladami węglowymi.

Element składowy oceny	Ślad węglowy kgCO ₂ /kg MJ/kg	Źródło
Klinkier	0,770	SPC/ITB
Gips syntetyczny	0,150	ITB/EPD
Gips naturalny	0,140	ITB/EPD
Regulator wiązania	0,145	ITB
Popiół	0,002	ITB (alokacja ekonomiczna)
Żużel	0,002	ITB (alokacja ekonomiczna)
Kamień wapienny	0,063	ITB
Składniki drugorzędne	0,050	ITB
Przemiał/energia elektryczna	0,376	ITB/SPC/KOBIZE
Transport	0,020	KOBIZE/ITB

mączki surowcowej, zużycie paliw na wypał, zużycie energii elektrycznej na przemiał. W tabeli 3 przedstawiono określone zgodnie z wiedzą i literaturą z zakresu tematyki wpływy poszczególnych składników na ślad węglowy cementów.

Suma nieuwzględnionych przepływów wejściowych A1-A3 wynosi maksymalnie 1% zużycia energii i masy i są to: oświetlenie i ogrzewanie biur, urządzenia sanitarne i sprzątanie obiektów, transport pracowników i zaplecze gastronomiczne pracowników, produkcja i utrzymanie narzędzi i infrastruktury produkcyjnej przepływy z badań i rozwoju, administracji, zarządzania i marketingu, utrzymanie kolumny transportu. Odsetek elementów odciętych od obliczeń wynosi maksymalnie 1% zużycia energii odnawialnej i nieodnawialnej energii pierwotnej oraz 1% wagową regułą odcięcia dozwoloną normą.

Analiza obejmuje następujące elementy: wyroby cementowe są wytwarzane kolejno w trzech etapach

produkcyjnych „Przygotowanie surowców”: produkcja klinkieru z surowców (wapień, glina, piasek...), „Wypalanie klinkieru”: surowce są palone w celu utworzenia klinkieru i pyłu „Mielenie i przechowywanie cementu”: inne składniki (anhydryt, wapień, pyły...) dodaje się do klinkieru, aby wyprodukować cement. Do produkcji wyrobów cementowych w Polsce stosuje się różne alternatywy dla paliw kopalnianych np. paliwa wytwarzane z odpadów komunalnych, w tym papieru, kartonu, drewna, tekstyliów i tworzyw sztucznych co znacznie obniża ślad środowiskowy cementów. Zgodnie z normą EN 16908 z analizy wykluczono CO₂ emitowany przy współpalaniu paliw wtórnych zawierających biomasę. Mieszanka energetyczna zastosowana do modelowania zużycia energii elektrycznej podczas produkcji cementów CEM-I-CEMV to mieszanka krajowa obliczona przez ITB na podstawie danych KOBIZE i Tauron. Materiał z recyklingu:

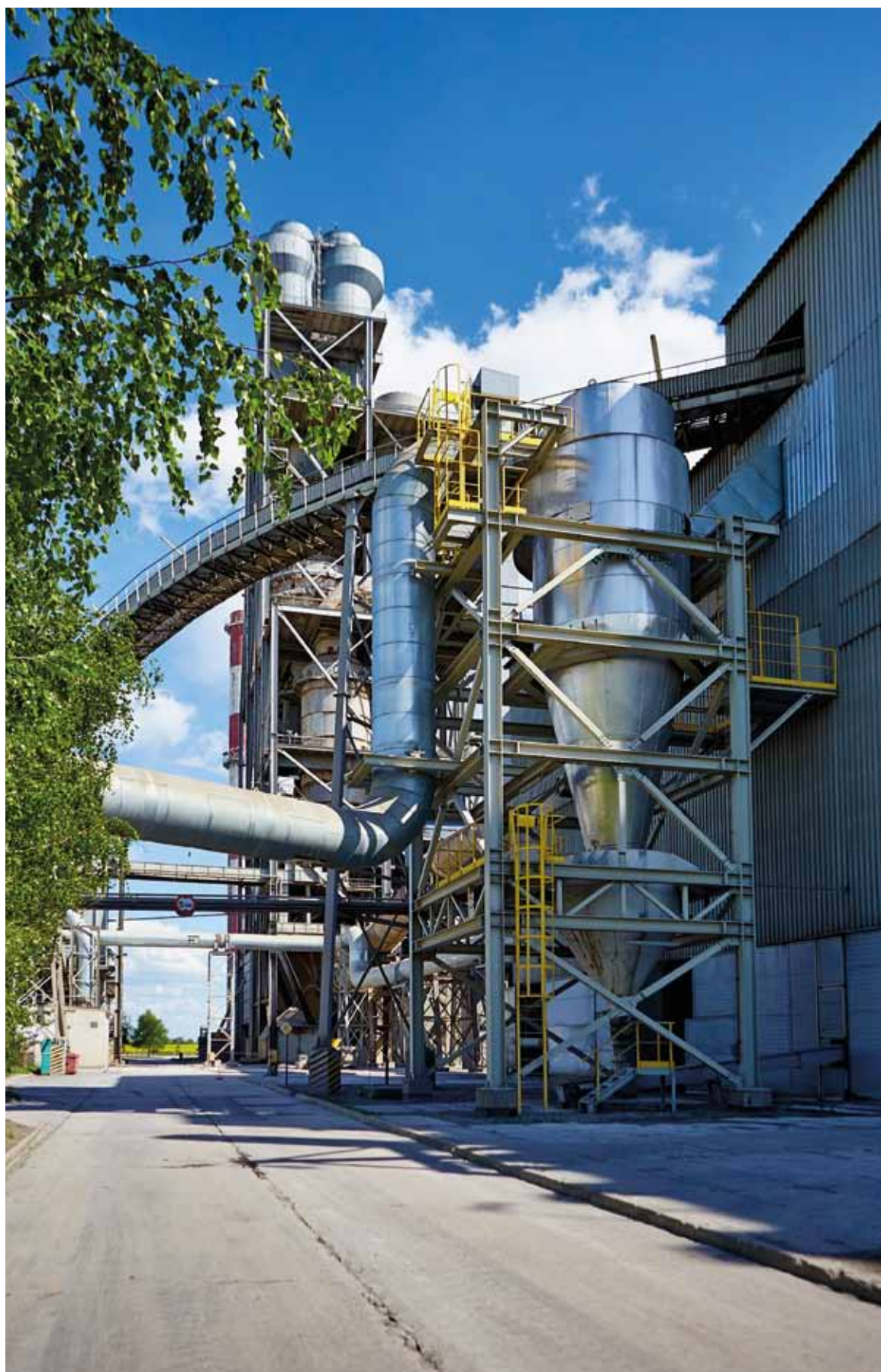


Tabela 4. Wyniki oceny środowiskowej cementów CEM-I-CEM V w fazach wyrobu od pobrania surowców do bramy fabryki A1-A3 (zgodnie z EN 15804), wyrażone w jednostce deklarowanej 1 kg.

Parametry opisujące oddziaływania środowiskowe: (JF) 1 kg						
Oddziaływania środowiskowe	Jednostka	CEM-I	CEM-II	CEM-III	CEM-IV	CEM-V
Globalne ocieplenie (netto ¹)	kg CO ₂ eq.	0,710	0,571	0,405	0,473	0,485
Uszczuplenie ozonu	kg CFC 11 eq.	3,71E-08	3,01E-08	3,00E-08	2,31E-08	2,74E-08
Zakwaszanie gleby i wody	kg SO ₂ eq.	0,00079	0,00073	0,0010	0,00052	0,00059
Fotocemiczne tworzenie ozonu	kg Etylenu eq.	0,00079	0,00069	0,00061	0,00054	0,00042
Eutrofizacja	kg (PO ₄) ³⁻ eq.	0,00010	8,68E-05	6,82E-05	6,50E-05	6,85E-05
Uszczuplenie zasobów abiotycznych – pierwiastki	kg Sb eq.	0,0029	0,0024	0,0017	0,0019	0,0015
Uszczuplenie zasobów abiotycznych paliwa kopalne	MJ	3,58	3,06	3,02	2,32	2,32
Parametry opisujące zużycie zasobów: (JF) 1 kg						
Aspekty środowiskowe	Jednostka	CEM-I	CEM-II	CEM-III	CEM-IV	CEM-V
Zużycie odnawialnej energii pierwotnej, z wyłączeniem zasobów odnawialnej energii pierwotnej stosowanej jako surowce	MJ	INA ²	INA	INA	INA	INA
Zużycie zasobów odnawialnej energii pierwotnej stosowanej jako surowce	MJ	INA	INA	INA	INA	INA
Całkowite zużycie zasobów odnawialnej energii pierwotnej (energia pierwotna i zasoby energii pierwotnej stosowane jako surowce)	MJ	0,15	0,15	0,20	0,095	0,11
Zużycie nieodnawialnej energii pierwotnej, z wyłączeniem zasobów nieodnawialnej energii pierwotnej stosowanej jako surowce	MJ	INA	INA	INA	INA	INA
Zużycie zasobów nieodnawialnej energii pierwotnej stosowanej jako surowce	MJ	INA	INA	INA	INA	INA
Całkowite zużycie zasobów nieodnawialnej energii pierwotnej (energia pierwotna i zasoby energii pierwotnej stosowane jako surowce)	MJ	4,08	3,51	3,43	2,67	2,57
Zużycie materiałów wtórnych	kg	0,074	0,056	0,034	0,046	0,047
Zużycie odnawialnych paliw wtórnych	MJ	0,88	0,67	0,41	0,55	0,56
Zużycie nieodnawialnych paliw wtórnych	MJ	1,28	0,97	0,60	0,79	0,81
Zużycie zasobów słodkiej wody ³	m ³	0,0086	0,0066	0,0041	0,0053	0,0054
Inne informacje środowiskowe opisujące kategorie odpadów: (JF) 1 kg						
Aspekty środowiskowe	Jednostka	CEM-I, A1-A3	CEM-II, A1-A3	CEM-III, A1-A3	CEM-IV, A1-A3	CEM-V, A1-A3
Odpady niebezpieczne, usunięte	kg	0,0001	9,08E-05	7,35E-05	7,34E-05	4,04E-05
Usunięte odpady inne niż niebezpieczne	kg	0,017	0,016	0,023	0,012	0,013
Odpady radioaktywne, usunięte	kg	0	7,17E-08	0	0	0
Materiały do ponownego użycia	kg	0	0	0	0	0
Materiały do recyklingu	kg	6,27E-10	5,48E-10	3,92E-10	1,33E-10	2,98E-10
Materiały do odzyskiwania energii	kg	0	0	0	0	0
Energia eksportowana	MJ	0	0	0	0	0

¹ Globane ocieplenie netto - bez uwzględniania emisji z paliw alternatywnych, ² INA - wskaźnik nie został oznaczony (Indicator Not Assessed), ³ Zużycie wody wynika głównie z procesu produkcji energii elektrycznej



produkty cementowe zawierają m.in. następujące materiały pochodzące z recyklingu: żużel wielkopiecowy i popiół. Cementy CEM-I-CEMV zostały obliczone bez opakowania, dostarczane jako materiał sypki. Przyjęto współczynniki charakteryzujące oddziaływania środowiskowe zgodnie z modelami i metodologią CML(2016). W tabeli 4 zestawiono wyniki oceny LCA dla CEM I-CEMV.

Ślad węglowy cementów krajowych

Uśredniony ślad węglowy netto cementu (GWP) dla CEM I produkowanego w Polsce w 2017 roku i wyznaczonego za pomocą metody LCA i normy ISO 14067 – Carbon Footprint of Products wynosi 0,710 tony CO₂/tonę CEM-I. Ślad węglowy cementu CEM II– Carbon Footprint of Product- wynosi 0,571 kg CO₂/tonę CEM-II. Ślad węglowy cementu CEM III – Carbon Footprint of Product- wynosi 0,405 kg CO₂/tonę CEM-III.

Ślad węglowy cementu CEM IV – Carbon Footprint of Product - wynosi 0,473 kg CO₂/tonę CEM-IV.

Ślad węglowy cementu CEM V– Carbon Footprint of Product- wynosi 0,485 kg CO₂/tonę CEM-V.

Dla porównania ślad węglowy CEM I zadeklarowany przez European Cement Association CEMBUREAU wynosi 0,803 tony CO₂/tonę CEM I.

Z przeprowadzonej analizy wynika, że średnie oddziaływanie środowiskowe cementów produkowanych w Polsce jest nieznacznie lepsze niż średnie oddziaływanie środowiskowe cementów europejskich.

Odniesienia normatywne:

1. PN-EN ISO 14025:2010 Etykiety i deklaracje środowiskowe – Deklaracje środowiskowe III typu – Zasady i procedury
2. PN-EN 15804+A2:2020-03 Zrównoważenie robót budowlanych – Deklaracje środowiskowe wyrobu – Podstawowe zasady kategoryzacji wyrobów budowlanych
3. PN-EN 16908:2017-02 Cement i wapno budowlane – Deklaracje środowiskowe wyrobów – Zasady kategoryzacji wyrobów będące uzupełnieniem postanowień EN 15804
4. PN-EN ISO 14040:2009 Zarządzanie środowiskowe – Ocena cyklu życia – Zasady i struktura



Ślad węglowy betonu

prof. dr hab. inż. **Andrzej Garbacz**

mgr inż. **Paulina Urbańska**

Politechnika Warszawska

1. Wprowadzenie

Przeciwdziałanie zmianom klimatu stało się w ciągu ostatnich lat jednym z najistotniejszych elementów polityki światowej. Przyczynił się do tego wzrost średniej rocznej temperatury na Ziemi w ostatnim stuleciu oraz świadomość, że brak reakcji może doprowadzić do dalszego jej wzrostu nawet o $6,4^{\circ}\text{C}$ w ciągu następnych stu lat [1].

Obecnie we wszystkich sektorach przemysłu obserwuje się dążenie do kwantyfikacji emisji gazów cieplarnianych, pozwalającej na identyfikację czynników i etapów produkcji najbardziej zanieczyszczających środowisko oraz stanowiącej pierwszy krok w kierunku

wdrożenia rozwiązań redukujących emisję. Miarą wielkości emisji jest ślad węglowy (ang. *carbon footprint*), pojęcie zdefiniowane w normie ISO 14067 „Carbon footprint of products – requirements and guidelines for quantification and communication” jako „suma emitowanych i pochłanianych przez produkt gazów cieplarnianych, wyrażana ekwiwalentem CO_2 , bazująca na ocenie cyklu życia”. Ślad węglowy obejmuje, oprócz emisji CO_2 – głównego źródła wzmocnienia efektu cieplarnianego, także metan – CH_4 , podtlenek azotu – N_2O , fluorowęglowodory – HCFs, perfluorowodory.

Głównym źródłem emisji gazów cieplarnianych z ludzkiej aktywności

jest spalanie paliw kopalnych dla pozyskiwania energii elektrycznej, ogrzewania mieszkań i w transporcie [2-5]. Z uwagi na to, największym śladem węglowym cechują się produkty, których wytworzenie jest procesem wysokoenergetycznym. Znacznie mniejszym poziomem emisji cechuje się energia pozyskana ze źródeł odnawialnych, takich jak: promieniowanie słoneczne, wiatr, geotermia (tabela 1). Ważnym czynnikiem jest też transport surowców do zakładów produkcyjnych, gdyż zużycie litra paliwa uwalnia do atmosfery około 2,3 kg CO₂, natomiast litra diesla 2,7 kg CO₂. W celu ujednoczenia jednostek i rozszerzenia pojęcia śladu węglowego na pozostałe gazy wprowadzono termin ekwiwalent dwutlenku węgla (eCO₂). Jest to miara metryczna, określana dla danego

gazu w wyniku przemnożenia masy tego gazu przez odpowiedni dla niego wskaźnik potencjału tworzenia efektu cieplarnianego (ang. *Global Warming Potential, GWP*, tabela 2). Przykładowo dla podtlenku azotu N₂O GWP wynosi 310, więc emisja 1 mln ton N₂O odpowiada 310 mln ton CO₂.

Obecnie ślad węglowy stał się jednym z najczęściej stosowanych parametrów określających wpływ wyrobów na środowisko. Jest również wykorzystywany w działalności marketingowej firm produkcyjnych i usługowych praktycznie każdej branży, często do wykazywania przewagi konkurencyjnej.

Rozważania dotyczące emisji gazów cieplarnianych oraz działań na rzecz zrównoważonego rozwoju nie ominęły przemysłu budowlanego. Istotnym źródłem emisji gazów cieplarnianych w tym sektorze jest najszerzej stosowany i najczęściej używany materiał na świecie – beton. Przygotowanie mieszanki betonu zwykłego zanieczyszcza atmosferę ziemską o 140 – 310 kg eCO₂ /t. Jest to wartość kilkukrotnie mniejsza niż w przypadku produkcji stali (~1900 kg eCO₂ /t) [8]. Wpływ betonu na środowisko naturalne przybiera na znaczeniu przy uwzględnieniu ogromnej objętości tego materiału produkowanej rocznie na świecie.

2. Obliczanie śladu węglowego betonu

Obliczanie śladu węglowego betonu powinno opierać się na analizie cyklu życia, obejmującej najczęściej wydobycie i przygotowanie surowców, ich transport do betoniarni,

Tabela 1. Ślad węglowy wytworzenia przykładowych produktów [6].

Źródło emisji	Wielkość emisji
Energii z gazu	0,5 kg eCO ₂ /kWh
Energia z węgla	>1,0 kg eCO ₂ /kWh
Energia nuklearna	0,005 kg eCO ₂ /kWh
Energia słoneczna	0,088 kg eCO ₂ /kWh /
Energia geotermalna	0,015 – 0,053 kg eCO ₂ /kWh
Energia wiatru	0,020 – 0,096 kg eCO ₂ /kWh
Produkcja stali	1900 kg eCO ₂ /t

Tabela 2. Wartości wskaźnika GWP dla głównych gazów cieplarnianych [7].

Gaz, GHG	GWP
Dwutlenek węgla CO ₂	1
Metan CH ₄	21
Podtlenek azotu N ₂ O	310
Fluorowęglowodory HCFs	124 – 14800
Perfluorowęglowodory PFCs	7390 – 12200
Sześćfluorek siarki SF ₆	22800

przygotowanie mieszanki betonowej, kończąc na jej transporcie na plac budowy, a także uwzględniać etap użytkowania oraz tzw. drugie życie betonu, okres po eksploatacji, czyli rozbiórkę i ewentualne ponowne użycie [6].

Istotną kwestią, rzadko podejmowaną w ekologicznych debatach o materiałach na bazie cementu jest sekwestracja CO₂ następująca w procesie karbonatyzacji. Wpływ karbonatyzacji na ogólny bilans CO₂ w cyklu życia betonu uważany jest za marginalny. Powodem jest mała głębokość absorpcji CO₂ i mała powierzchnia betonu w konstrukcji. Według Woyciechowskiego i Jackiewicz-Rek wiadukt betonowy o objętości 62 m³ może pochłonąć 450 kg CO₂ [9]. Sekwestracja CO₂ na ośmiokrotnie wyższym poziomie zachodzi w czasie drugiego życia betonu, gdyż po rozbiórce obiektu wzrasta wielkość powierzchni ekspozowanej na działanie powietrza. We wcześniejszym okresie brak jednolitego podejścia przy określaniu śladu węglowego był powodem rozbieżności uzyskiwanych wyników. Dowodzi tego tablica 3, przedstawiająca zmiany wielkości emisji CO₂ w zależności od liczby źródeł uwzględnionych przez autorów przy obliczaniu śladu węglowego. Według Marceau [10] przy produkcji betonu o wytrzymałości na ściskanie 35 MPa uwalnia się 313 kg CO₂/m³ (tablica 3, pozycja 1), natomiast zdaniem Wcisło i Kuniczuka [11] beton o wytrzymałości niższej jedynie o 5 MPa i zawierający popiół lotny (tablica 3, pozycja 9) emituje o 54 kg CO₂/m³ więcej. Autorzy nie uwzględnili

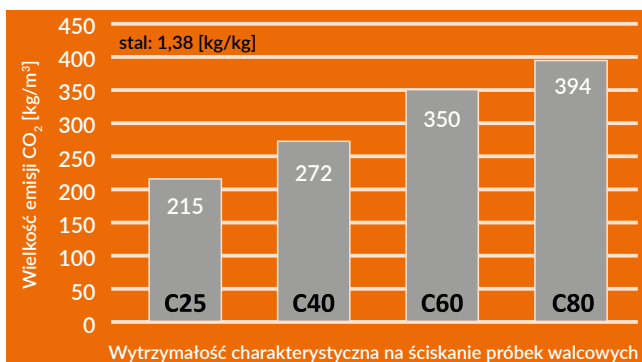
jednak emisji związanej z magazynowaniem składników betonu, transportu paliwa oraz eksploatacji betoniarni. Występujące różnice mogłyby być także spowodowane nieuwzględnieniem efektu stosowania domieszek, których produkcja i transport zostały wzięte pod uwagę w obliczeniach Wcisło i Kuniczuka. Udział domieszek wydaje się jednak mało istotny, gdyż są one dodawane do mieszanki betonowej w stosunkowo małych ilościach (do 5% masy cementu) i ich wpływ na środowisko można oszacować jako 220 kg CO₂/t [13]. Autorzy przeanalizowanych publikacji nie brali pod uwagę zmian CO₂ zachodzących w procesie karbonatyzacji i „drugim życiu betonu”.

Kruszywo (drobne i grube), popiół lotny, czy woda mogą stanowić do 90% masy mieszanki betonowej, jednakże wydobycie i rozdrobnienie materiałów kamiennych, mieszanie składników, czy transport materiałów lub mieszanki na budowę wymagają stosunkowo małych ilości energii i emitują relatywnie małe ilości CO₂ – odpowiednio 5,4; 1,5; 0,9 kg CO₂/t [13]. Czynnikiem determinującym stopień oddziaływania betonu na środowisko jest udział cementu w mieszance betonowej (por. rozdz. 2).

Coraz powszechniej stosowanym sposobem otrzymywania bardziej korzystnego ekwiwalentu CO₂ betonu jest używanie domieszek upłynniających (superplastyfikatorów), które umożliwiają obniżenie zawartości wody zarobowej w mieszance betonowej, a tym samym pozwalają na redukcję ilości cementu przy zachowaniu odpowiedniego

stosunku wodno-cementowego i konsystencji. Do wciąż rozwijanych sposobów mających na celu redukcję śladu węglowego betonu zaliczyć można: stosowanie spoiw alternatywnych, wychwytywanie CO₂ ze spalania paliw i dekompozycji węgla wapnia w cementowniach, czy sekwestrację CO₂ w prefabrykach betonowych.

Dane przedstawione w tabelicy 3 potwierdzają wysoki udział poziomu emisji CO₂ przy produkcji cementu w śladzie węglowym. Redukcja ilości cementu w mieszance betonowej powoduje prawie liniowy spadek ilości CO₂ oddawanego do atmosfery przez beton [6]. Uzyskiwanie wyższej wartości wytrzymałości betonu na ściskanie wiąże się ze wzrostem wartości śladu węglowego betonu [14] – rys. 1.



Rys. 1. Wielkość emisji CO₂ zależnie od wytrzymałości betonu na ściskanie próbek walcowych (na podstawie [14]).

Habert i Roussel [15] zaproponowali empiryczną formułę, która pozwala na oszacowanie emisji CO₂ w funkcji wytrzymałości charakterystycznej określonej na walcach:

$$\text{Wielkość emisji CO}_2 \left[\frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right] = \delta \sqrt{f_{ck}}$$

gdzie: δ – stała równa 46,5 kg CO₂ / $\sqrt{\text{MPa}}$

Fantilli i inni [14] wykazali na podstawie porównania z danymi eksperymentalnymi, że powyższa formuła daje dość dobre oszacowanie śladu węglowego betonu. Wydaje się jednak, że możliwość sformułowania ogólnie przyjętej formuły obliczania śladu węglowego na podstawie wytrzymałości na ściskanie wymaga ujednoczenia procedury obliczania śladu betonu.

Obliczanie śladu węglowego może zostać ujednoczone stosując obecnie obowiązujące normy i wytyczne (tablica 4), które m.in. umożliwiają uzyskanie klasyfikacji Deklaracji Środowiskowej Produktu EPD.

Przy projektowaniu składu mieszanek betonowych korzystna byłaby też możliwość stosowania narzędzi do kompleksowego szacowania śladu węglowego, które brałyby pod uwagę możliwie szeroki zakres życia budowli, w oparciu o rozbudowaną bazę danych zawierającą kompletne informacje o materiałach budowlanych, procesach oraz stosowanych technologiach. Narzędzia te powinny pozwalać także na uwzględnienie wpływu transportu towarzyszącego każdemu etapowi powstawania konstrukcji, zużycia energii i wody na poszczególnych etapach oraz przewidywanym wykorzystaniu elementów konstrukcji po zakończeniu ich „życia”. Pożądana byłaby możliwość analizy konstrukcji już na etapie tworzenia zintegrowanego projektu BIM tak, aby ułatwić projektantom optymalizację projektowanej konstrukcji pod względem jej śladu węglowego. Rodzaj i wielkość konstrukcji może w istotny sposób wpływać na dobór rodzaju betonu.

Tabela 3. Emisja CO₂ w zależności od uwzględnionych źródeł emisji [6].

Lp.	f_{cm} [MPa]	Skład betonu [m ³]
1	2	3
1	35	Cement – 335 kg, woda – 141 kg, kruszywo – 1899 kg [10]
2	25	Cement – 279 kg, woda – 141 kg, kruszywo – 1958 kg [10]
3	20	Cement – 223 kg, woda – 141 kg, kruszywo – 1958 kg [10]
4	20	Cement – 179 kg, popiół lotny – 44 kg, woda – 141 kg, kruszywo – 1958 kg [10]
5	20	Cement – 167 kg, popiół lotny – 56 kg, woda – 141 kg, kruszywo – 1958 kg [10]
6	20	Cement – 145 kg, żużel wielkopiecowy – 78 kg, woda – 141 kg, kruszywo – 1958 kg [10]
7	20	Cement – 112 kg, żużel wielkopiecowy – 112 kg, woda – 141 kg, kruszywo – 1958 kg [10]
8	25	Cement 300 kg, popiół 230 kg, kruszywo 1547 kg, plastyfikator 0,88; superplastyfikator 2,51; woda 160 kg [11]
9	30	Cement 340 kg, popiół 190 kg, kruszywo 1647 kg, plastyfikator 0,81; superplastyfikator 2,34; woda 160 kg [11]
10	25	Cement 240 kg, popiół 100 kg, kruszywo 1786 kg, stabilizator 0,28; superplastyfikator 2,25; woda 170 kg [11]
11	30	Cement 285 kg, popiół 100 kg, kruszywo 1760 kg, stabilizator 0,27; superplastyfikator 2,24; woda 170 kg [11]
12	40	Cement – 328 kg, kruszywo – 2023 kg, woda – 190 kg [12]

Źródła emisji CO₂

Cement		Kruszywo			Woda	Dodatki		Domieszki		Paliwa		Beton			„Drugie życie betonu”		Łączna emisja CO ₂ [kg/m ³]		
Produkcja	Transport	Magazynowanie i podawanie	Produkcja	Transport	Magazynowanie i podawanie	Transport	Popiół lotny	Żużel wielkopiecowy	Produkcja	Transport	Produkcja	Transport	Eksplloatacja betoniarńi	Przygotowanie mieszanki	Transport na budowę	Układanie i wykańczanie		Karbonatyzacja	
4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23
+	+	+	+	+	+	-	-	-	-	-	-	+	+	+	+	-	-	-	313
+	+	+	+	+	+	-	-	-	-	-	-	+	+	+	+	-	-	-	262
+	+	+	+	+	+	-	-	-	-	-	-	+	+	+	+	-	-	-	211
+	+	+	+	+	+	-	+	-	-	-	-	+	+	+	+	-	-	-	171
+	+	+	+	+	+	-	+	-	-	-	-	+	+	+	+	-	-	-	161
+	+	+	+	+	+	-	-	+	-	-	-	+	+	+	+	-	-	-	142
+	+	+	+	+	+	-	-	+	-	-	-	+	+	+	+	-	-	-	112
+	+	-	+	+	-	+	+	-	+	+	-	-	-	+	+	-	-	-	327
+	+	-	+	+	-	+	+	-	+	+	-	-	-	+	+	-	-	-	367
+	+	-	+	+	-	+	+	-	+	+	-	-	-	+	+	-	-	-	271
+	+	-	+	+	-	+	+	-	+	+	-	-	-	+	+	-	-	-	315
+	+	-	+	+	-	+	-	-	-	-	-	+	-	+	+	+	-	-	354

Może się zdarzyć, że beton o większym śladzie węglowym ostatecznie zapewni zmniejszenie śladu węglowego całej konstrukcji. Fantilli i inn. [14] przeprowadzili analizę zmian wartości śladu węglowego trzech konstrukcji o zbliżonym kształcie, ale różnej kubaturze. Ich obliczenia pokazały, że w przypadku konstrukcji wysokich, o dużej kubaturze, wzrost wytrzymałości betonu, tym samym wzrost śladu węglowego, ostatecznie powodował spadek śladu węglowego stali i betonu użytego w konstrukcji (rys. 2). Wynikało to z możliwości zmniejszenia

ilości stosowanej stali zbrojeniowej w przypadku zastosowania betonu o wyższej wytrzymałości.

3. Komputerowe wspomaganie obliczania śladu węglowego

Aktualnie dostępne na rynku oprogramowania jedynie częściowo spełniają te wymagania (tabela 5). Należy zauważyć, że w ostatniej dekadzie rozwój oprogramowania komputerowego wspomagającego obliczanie śladu węglowego postępuje prawie wykładniczo, a istniejące rozwiązania są coraz bardziej kompleksowe. Systemy te jednak

Tabela 4. Normy wykorzystywane przy obliczaniu śladu węglowego.

Norma	Tytuł
PN-EN 15643-2:2011 (PL)	Zrównoważoność obiektów budowlanych – Ocena budynków – Część 2: Zasady oceny właściwości środowiskowych
PN-EN 15643-4:2012 (Eng.)	Zrównoważone obiekty budowlane – Ocena budynków – Część 4: Postanowienia dotyczące oceny ekonomicznych właściwości użytkowych
PN-EN 15804+A1:2014-04 (Eng.)	Zrównoważoność obiektów budowlanych – Deklaracje środowiskowe wyrobu – Podstawowe zasady kategoryzacji wyrobów budowlanych
PN-EN 15804+A2:2020-03 (Eng.)	Zrównoważenie obiektów budowlanych – Deklaracje środowiskowe wyrobu – Podstawowe zasady kategoryzacji wyrobów budowlanych (zastąpiła PN-EN 15804+A1:2014-04)
PN-EN 15978:2011 (Eng.)	Sustainability of construction works – Assessment of environmental performance of buildings – Calculation method
EN 16627:2015 (Main) (Eng.)	Sustainability of construction works – Assessment of economic performance of buildings – Calculation methods
ISO 14025:2010 (Eng.)	Environmental labels and declarations – Type III environmental declarations – Principles and procedures
PN-EN ISO 14040:2009 (PL)	Zarządzanie środowiskowe – Ocena cyklu życia – Zasady i struktura
PN-EN ISO 14044:2006 (PL)	Zarządzanie środowiskowe – Ocena cyklu życia – Wymagania i wytyczne
PN-EN ISO 14067: 2018-10 (Eng.)	Gazy cieplarniane – Ślad węglowy wyrobów – Wymagania i wytyczne dotyczące kwantyfikacji
ISO 15686-5:2017 (Eng.)	Buildings and constructed assets – Service life planning – Part 5: Life-cycle costing
ISO 21930:2017 (Eng.)	Sustainability in buildings and civil engineering works – Core rules for environmental product declarations of construction products and services

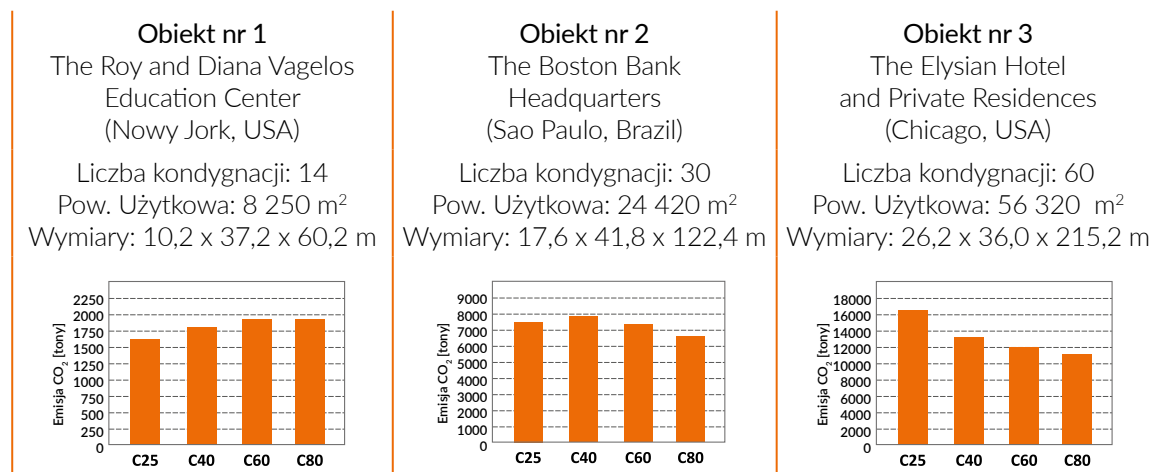
w różnym stopniu wykorzystują normy zebrane w tabeli 4.

Najbardziej dopracowane narzędzia to, istniejące od 2000 roku, One Click LCA będące wynikiem współpracy brytyjsko-fińskiej oraz GaBi produkcji niemieckiej. Porównywalnym narzędziem, lecz mniej intuicyjnym, jest SimaPRO. Programy te posiadają bardzo obszerne bazy danych, które są na bieżąco aktualizowane i rozbudowywane dla wielu regionów całego świata (w tym Polski), pozwalające na optymalizację użytych materiałów pod względem ich wpływu na środowisko oraz dające porównywalne w stosunku do siebie wyniki. Pozwalają na uwzględnienie tego, co dzieje się z konstrukcją od etapu poboru surowców do etapu rozbiórki i ewentualnego recyklingu poszczególnych elementów (Tabela 4). Zastosowane w nich metody obliczeniowe są często zgodne z normą ISO 14067, usprawniają proces uzyskiwania certyfikatów zielonego budownictwa takich jak LEED czy BREEAM oraz pozwalają na uzyskanie EPD dla nowych materiałów/produktów.

Przewagą One Click LCA jest możliwość automatycznej integracji obliczeń z projektem budowlano-architektonicznym opracowywanym w technologii BIM. Oba rozwiązania pozwalają na jednoczesną optymalizację i porównywanie kosztów danej konstrukcji.

Warto również zwrócić uwagę na nakładkę EC3 dla oprogramowania Revit Structures, wspieraną przez Billa Gatesa, powstałą niespełna 3 lata temu. Narzędzie to w sposób graficzny wskazuje w modelu obiektu punkty krytyczne dla środowiska tzw. heat map eCO₂.

Istotnym elementem spopularyzowania wspomaganego komputerowego w obliczaniu śladu węglowego jest opracowanie oprogramowanie łatwego w obsłudze, a prowadzone analizy z jego użyciem pozwolą na przygotowanie czytelnych symulacji środowiskowych. Przydatną funkcją oprogramowania jest możliwość konsultacji projektów z ekspertami środowiskowymi zarówno w kontekście optymalizacji zastosowanych materiałów i technologii



Rys. 2. Ślad węglowy stali i betonu użytego do wznoszenia konstrukcji żelbetonowych trzech różnych obiektów żelbetonowych o zbliżonym kształcie i różnej wysokości.

Tabela 5. Najczęściej stosowane systemy komputerowego wspomagania.

L.p.	Nazwa	LIFE CYCLE ASSESSMENT (LCA)																		Zgodność z normami	
		Wytwarzanie		Konstrukcja		Eksploatacja							Wycofanie z eksploatacji			Korzyści					
		Surowce	Transport	Wytwarzanie	Transport na budowę	Konstrukcja	Użycie	Utrzymanie	Naprawa	Wymiana	Remont	Zużycie energii	Zużycie wody	Rozbiórka	Transport	Przetwarzanie odpadów	Rozkład odpadów	Ponowne użycie	Odzysk		Recykling
		A1	A2	A3	A4	A5	B1	B2	B3	B4	B5	B6	B7	C1	C2	C3	C4	D1	D2		D3
1	One Click LCA	+	+	+	+	+	-	-	-	+	+	-	-	+	+	+	+	+/-	+/-	+/-	EN 16627 ISO 15686-5 ISO 14040 ISO 14044 ISO 14067 EN15804+A1+A2 ISO 21930 ISO 14025
2	GaBi Sphera	+	+/-	+	+/-	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	nd	nd	+	ISO 14067 EN 15804+A2 (2019) NF EN 15804
3	Embodied Carbon in Construction Calculator (EC3 for BIM 360 Autodesk)	+	nd	+	nd	+	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	Tak – materiały w bazie jedynie certyfikowane EPD
4	SimaPRO	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	nd	nd	nd	ISO 14067 ISO 14040
5	ADW DEVELOPMENTS	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	ISO 14044 EN 15643-2 EN 15643-4 EN 15978
6	eTool	+	+	+	+	+	nd	nd	nd	nd	nd	+	+	+	+	+	+	nd	nd	nd	EN 15978 ISO 14044

Integracja z oprogramowaniem projektowym	BIM	Certyfikacja	Szacowanie kosztów (LCC)	Baza danych	Inne
REVIT, ARCHICAD, GRASSHOPPER, ITP.	TAK	Podstawa uzyskiwania certyfikatów takich jak LEED, BREEAM, EPD	Tak – bazując na różnych cennikach m. In. Neubau baupreise kompakt, statistische baupreise für positionen mit kurztexten (BKI) i spon's architects' and builders' price book (AECOM)	100000+ pozycji, na bieżąco weryfikowana i ; korzysta m.in. z bazy impact prowadzonej przez BRE (Building Research Establishment)	Projektowanie ukierunkowane na odzysk materiałów; optymalizacja kosztów i śladu węglowego; posiada dane z itb; najbardziej rozbudowana baza danych
NIE – ale można zaciągnąć dane o rodzaju i ilości materiałów z wykazu materiałów (BOM – Bill of Materials)	NIE	Podstawa uzyskiwania certyfikatów takich jak DGNB, LEED, BREEAM, EPD	Tak – pokazuje koszty życia konstrukcji na mapie etapów życia	14000+ pozycji, specjalne rozszerzenie dla budownictwa (2640 pozycji) – procesy i materiały z całego świata w tym 118 pozycji z polski; na bieżąco walidowana i aktualizowana	Oferują usługi konsultingu środowiskowego
Nakładka dla REVITA na BIM 360 AUTODESK	TAK	NIE	NIE	Baza materiałów certyfikowanych EPD	Generuje heat map dla emisji poszczególnych elementów konstrukcji; aktualnie mocno lobbowany i dofinansowany projekt (m.in. przez Billa Gatesa)
NIE	NIE	EPD	nd	Korzysta z wielu zintegrowanych baz danych	Wielu użytkowników może pracować jednocześnie nad tym samym projektem; pokazuje punkty krytyczne inwestycji budowlanej
NIE	NIE	BREEAM, LEED, GRIHA	TAK	Korzysta m.in. z bazy impact prowadzonej przez BRE (Building Research Establishment)	Prowadzą audyty konstrukcji kwalifikowanych do rozbiórki aby określić co i jak odzyskać/podać recyklingowi/zniszczyć
REVIT	TAK	Przygotowuje zestaw raportów, które mogą służyć przy certyfikacji środowiskowej	nd	Korzysta m.in. z bazy impact prowadzonej przez BRE (Building Research Establishment) I The Australasian LCI	Prowadzą konsulting LCA





jak również potencjału recyklingowego budowli.

Podejście do określania śladu węglowego betonu staje się coraz bardziej kompleksowe, uwzględniające „główne życie” (pozyskiwanie surowców, ich transport, produkcję materiału, transport na plac budowy, układanie itp.), „drugie życie” (rozbiórka i ewentualny recykling), a także sekwestrację CO₂ w procesie karbonatyzacji. Pomocne tu są obecnie dostępne systemy komputerowego wspomaganie liczenia śladu węglowego nie tylko dla betonu, ale dla całej konstrukcji. Dotyczy to także najnowszych rozwiązań materiałowo-technologicznych w obszarze mieszanek betonowych.

Bibliografia

- [1] Zmiana klimatu i środowisko naturalne, Dokumenty informacyjne o Unii Europejskiej 2013
- [2] Krajowy Raport Inwentaryzacyjny – Inwentaryzacja gazów cieplarnianych w Polsce dla lat 1988-2011, Krajowy Ośrodek Bilansowania i Zarządzania Emisjami, 2013
- [3] Carbon Footprint of Electricity Generation, Parliamentary Office of Science and Technology 268, 2006
- [4] Carbon Footprint of Electricity Generation, Parliamentary Office of Science and Technology 383, 2011
- [5] Kundak M., Łazić L., Crnko J.: CO₂ emissions in the steel industry, *Metalurgia* 48, 2009, s. 193-197
- [6] Załęgowski K., Jackiewicz-Rek W., Garbacz A., Courard L., *Materiały Budowlane*, 2013 (12), s.34-36
- [7] Wasilewski M.: Wprowadzenie do zagadnienia metodyki wyliczania carbon footprint, Podsumowanie seminarium Ministerstwa Gospodarki i CSRinfo, 2009
- [8] Concrete CO₂ fact sheet, National ready Mixed Concrete Association, 2012
- [9] Woyciechowski P., Jackiewicz-Rek W.: Ecological aspects of concrete carbonation, Central European Congress on Concrete Engineering, 2013
- [10] Marceau M.L., Nisbet M.A., VanGeem M.G.: Life Cycle Inventory of Portland Cement Concrete, Portland Cement Association, 2007
- [11] Wcisło A., Kuniczuk K.: Eco-SCC, Green-SCC – ekonomiczna i ekologiczna alternatywa dla betonów samozagęszczalnych, Dni Betonu, Wisła, październik 2012,
- [12] Cement and Concrete Institute, Concrete Industry, Greenhouse Gas Emissions, InEnergy, 2010
- [13] Turner L.K., Collins F.C.: Carbon dioxide equivalent (CO₂-e) emissions: A comparison between geopolimer and OPC cement concrete, *Construction and Building Materials* 43, 2013, s. 125-130
- [14] A.P.Fantilli, O.Mancinelli, B.Chiaia: The carbon footprint of normal and high-strength concrete used in low-rise and high-rise buildings, *Case Studies in Construction Materials*, 2019, <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2019.e00296>
- [15] G. Habert, N. Roussel, Study of two concrete mix-design strategies to reach carbon mitigation objectives, *Cem. Concr. Compos.*, 2009, pp. 397-402



Prefabrykacja betonowa krokiem w kierunku budownictwa o obiegu zamkniętym

dr hab. inż. **Wit Derkowski**, prof. PK

Wydział Inżynierii Lądowej, Politechnika Krakowska
Instytut Budownictwa, Linnaeus University, Szwecja
fib COM6 „Prefabrication”

W Polsce prefabrykację betonową wciąż postrzega się przez pryzmat budownictwa wielkopłytowego z drugiej połowy XX w., któremu często przypisywana jest bardzo niska jakość i brak komfortu, a niekiedy nawet pewności co do bezpieczeństwa użytkowania. Przykłady z krajów wysokorozwiniętych wskazują, że stereotyp ten nie jest uzasadniony, wręcz przeciwnie – prefabrykacja pozwala na przełamywanie barier i tworzenie atrakcyjnych architektonicznie form spełniających wygórowane życzenia klientów, co do estetyki,

kosztów, tempa realizacji oraz jakości obiektu.

Prefabrykacja konstrukcji betonowych jest uprzemysłowionym procesem o bardzo dużym potencjale na przyszłość. Do tej pory była jednak zazwyczaj traktowana przez uczestników procesu budowlanego jako alternatywy wariant wykonania budynku projektowanego jako konstrukcja monolityczna. W takim podejściu, prefabrykacja oznacza jedynie fakt realizowania poszczególnych elementów konstrukcji w wyspecjalizowanych zakładach, po czym montowania ich na

miejscu budowy w taki sposób, aby pozostawać jak najbliżej koncepcji konstrukcji monolitycznej. Ten punkt widzenia jest nieefektywny, powoduje niemożność wykorzystania wszystkich zalet prefabrykacji. Każda koncepcja budynku ma swoje indywidualne właściwości, które w większym lub mniejszym stopniu wpływają na jego cechy, w tym na układ konstrukcyjny, rozpiętości, zapewnienie sztywności przestrzenną, ale także na długotrwałe

projektanci powinni określić ich cele i potrzeby w stosunku do całej konstrukcji, jak i poszczególnych jej fragmentów tak, aby możliwe było dobranie właściwych technologii i należyte opracowanie rysunków warsztatowych dla producenta elementów. Dlatego, w przypadku konstrukcji prefabrykowanych, pełna dokumentacja wykonawcza musi być wykonana wcześniej niż zwykle jest to realizowane dla konstrukcji monolitycznych – fakt ten

Prefabrykacja pozwala na przełamywanie barier i tworzenie atrakcyjnych architektonicznie form spełniających wyśrubowane życzenia klientów.

efekty jej oddziaływania na środowisko. Dla uzyskania najlepszych rezultatów, projektowanie obiektu od samego początku powinno być kompleksowe i uwzględniać szereg szczegółowych wymagań wszystkich branż. Oznacza to, iż już we wczesnym etapie projektowania inwestor, architekt oraz poszczególni

należałoby jednak zacząć postrzegać jako zaletę, a nie wadę. Beton prefabrykowany różni się tym, że jest produkowany w fabryce przez doświadczony personel, który stosuje rygorystyczne zasady kontroli jakości. W warunkach fabrycznych, przy praktycznie niezmiennych warunkach termiczno-wilgotnościowych, można stosować niski stosunek wodno-cementowy mieszanki betonowej, co nie jest możliwe w przypadku betonu wytwarzanego na miejscu budowy. Jedną z głównych różnic jest jednak kształtowanie węzłów. W konstrukcjach monolitycznych przyjmuje się pełną zgodność przemieszczeń poszczególnych elementów dochodzących do węzła, we wszystkich trzech kierunkach, a nośność złącza (węzła) monolitycznego musi być nie mniejsza niż nośność poszczególnych elementów. W konstrukcjach prefabrykowanych te założenia nie



muszą obowiązywać, natomiast bezpieczeństwo i trwałość konstrukcji zapewniana jest przez inne, łatwiejsze do uzyskania w procesie montażu, rozwiązania (np. odpowiednie kształtowanie wieńców, ścian usztywniających, powłokową pracę płyt stropowych, itp.).

Nieustający rozwój budownictwa wiąże się z potrzebą sprostania dzisiejszym potrzebom społeczeństw w zakresie obniżania kosztów realizacji i utrzymania obiektów mieszkalnych, użyteczności publicznej oraz przemysłowych, przy jednoczesnej poprawie ich jakości. Pojęcie jakości rozumiane jest nie tylko jako odpowiadająca wysokim standardom jakość materiałów i wykonania, ale również jako łatwość i komfort użytkowania budynku w całym okresie jego trwałości. Obszar prefabrykacji jest jednym z najbardziej otwartych na wdrażanie innowacyjnych rozwiązań w budownictwie, zarówno w zakresie wdrażania nowych materiałów i technologii, coraz nowszych narzędzi, maszyn i akcesoriów, jak i wciąż udoskonalanych metod projektowania i wznoszenia obiektów. Niewątpliwie postęp w najbliższych latach będzie następował głównie o obszarze przechowywania i przetwarzania informacji o budynkach i ich elementach składowych [1].

Aktualnie, technologia prefabrykacji ponownie zaczyna odgrywać ważną rolę w budownictwie, w tym również mieszkaniowym [2]. Przyczynia się ona do przyspieszenia procesu budowlanego, poprawy jakości obiektu, optymalnego wykorzystania właściwości poszczególnych materiałów, a także lepiej

wpisuje się w ograniczenia związane z szeroko rozumianą ochroną środowiska. Współczesna prefabrykacja, w odróżnieniu od poprzednich generacji budownictwa wykorzystujących elementy prefabrykowane, to kompleksowa inżynieria uwzględniająca komplet wymagań nie tylko konstrukcyjnych, ale i tych związanych z funkcją i formą budynku oraz jej oddziaływaniem na otoczenie.

Cele zrównoważonego rozwoju środowiskowego, gospodarczego i społecznego zaczęły być kształtowane stosunkowo dawno temu. Już w raporcie Komisji ONZ Brundtland z 1987 roku „Nasza wspólna przyszłość”, zrównoważony rozwój zdefiniowany został jako „rozwój, który zaspokaja obecne potrzeby bez uszczerbku dla zdolności przyszłych pokoleń do zaspokajania ich własnych potrzeb” [3]. Ma on zachęcać do rozważnego korzystania z zasobów naturalnych i ochrony środowiska w długofalowej perspektywie, a przez to stanowi nie lada wyzwanie dla branży budowlanej. Świadomość dbania o bieżące potrzeby społeczne jest łączona w harmonijny sposób z troską o ochronę środowiska naturalnego – staje się to obecnie jedną z głównych cech krajów wysokorozwiniętych. Ograniczenie wytwarzania nowych przedmiotów i budowania nowych obiektów staje się obecnie jednym z dominujących kierunków działań proekologicznych. Budownictwo przyjazne środowisku naturalnemu i człowiekowi uwzględnić powinno przede wszystkim oszczędną gospodarkę zasobami naturalnymi oraz przeciwdziałanie

zanieczyszczeniu gleby, powietrza i wody. Rosnąca liczba państw wprowadza przepisy w zakresie emisyjności materiałów, ograniczania zużycia surowców, odzyskiwania lub utylizacji odpadów budowlanych, emisji hałasu czy pyłu lub zanieczyszczenia gruntu substancjami chemicznymi [4]. Coraz częściej zaczyna mówić się o tym, aby istniejące budynki w pierwszej kolejności starać się ocalić i ewentualnie przystosować do nowej funkcji. Od właściciela czy zarządcy powinno się wymagać wykazania, że istniejącego budynku nie da się zaadaptować do nowych funkcji zamiast wykazywania jego nieprzydatności. Innymi słowy, pierwszą opcją, którą należy rozpatrzyć jest pozostawienie budynku, a rozwiązania ostateczne, jak wyburzenie, powinny być odpowiednio udokumentowane z uwzględnieniem dbałości o środowisko. Projektując nowe obiekty należy już na etapie koncepcyjnym rozważyć takie rozwiązania architektoniczno-konstrukcyjne, które umożliwią w przyszłości łatwe zmiany sposobu użytkowania lub rozbiórkę obiektu i ponowne wykorzystanie jego komponentów. Również zużycie energii w budownictwie zaczyna odgrywać duże znaczenie, szczególnie z punktu widzenia coraz bardziej rygorystycznych ograniczeń emisji dwutlenku węgla wprowadzanych w Europie [5]. Stąd, już zostały wdrożone, a w najbliższej przyszłości pojawiać się będą coraz bardziej surowe ograniczenia nałożone na procesy budowlane, na przykład w odniesieniu do emisyjności materiałów, ograniczania zużycia

surowców, wyrzucania odpadów, emisji hałasu itp. Dlatego właśnie budownictwo zrównoważone traktowane powinno być nie, jako fanaberia niepoważnie traktowanych ekologów, ale jako szansa rozwoju tej branży gospodarki dająca realne korzyści dla zainteresowanych stron, jak i całego społeczeństwa. Charakteryzowane jest ono zazwyczaj przez „4R”, czyli cztery główne hasła rozpoczynające się w języku angielskim od litery „r”:

- reduce – zmniejszenie zużycia zasobów naturalnych, energii czy ilości materiałów,
- reuse – ponowne wykorzystanie całego obiektu lub jego elementów konstrukcyjnych,
- recycle – odzyskiwanie materiałów i surowców z odpadów produkcji,
- renewable – odnawialność, zarówno w stosunku do źródeł energii, jak i surowców do produkcji materiałów budowlanych.

„Budownictwo o obiegu zamkniętym” jest swoistego rodzaju przeciwieństwem tradycyjnego „budownictwa liniowego”, w którym panuje zasada „weź → wykorzystaj → wrzuć”. Dążąc do jak najlepszego efektu należy już na etapie projektowania zadbać o to, aby w prefabrykacjach [6]:

- zminimalizować udział substancji toksycznych (najczęściej ich źródłem są elementy wykończeniowe i akcesoria),
- przyjmować rozwiązania konstrukcyjne umożliwiające demontowalność (cecha konstrukcji i elementu, zapewniająca łatwy demontaż i ponowny montaż),

- zapewnić dostępność informacji – bez precyzyjnej informacji o budynku i jego komponentach, np. dotyczącej materiałów składowych, technologii realizacji czy nośności, trudno będzie w przyszłości optymalnie wykorzystać możliwości demontowanych elementów. Krokiem w przyszłość być może tworzenie inteligentnych prefabrykatów, które będą posiadać wbudowane czujniki, umożliwiające ciągły monitoring ich pracy – tego typu informacje dodatkowo poszerzają możliwości najefektywniejszego ponownego ich użycia.

Takie podejście wymaga przede wszystkim jednak zmiany sposobu myślenia o budynku i jego roli, a także częściowego odejścia od osiągnięć ostatnich lat w udoskonalaniu obiektów (np. pełnym zintegrowaniu prefabrykatów konstrukcyjnych z instalacjami) tak, aby to cechy budynków zrównoważonych stały się nadrzędne w stosunku do chęci zaspokajania najbardziej wygórowanych potrzeb inwestorów. Idea budownictwa o obiegu zamkniętym jest właśnie tą, która stwarza ogromne możliwości dla konstrukcji prefabrykowanych, w tym przede wszystkim tych wykonanych z betonu.

Najłatwiej jest to pokazać na przykładach, w jaki sposób poszczególne hasła zrównoważonego budownictwa są już obecnie wdrażane w światowej prefabrykacji betonowej.

Ograniczenie zużycia zasobów naturalnych i energii

Monolityczne konstrukcje żelbetowe zazwyczaj wykonywane są

w całości z jednakowych materiałów. W konstrukcjach prefabrykowanych możliwe jest jednak precyzyjne dopasowanie właściwości mechanicznych betonu i zbrojenia do wymagań stawianych poszczególnym elementom. Dzięki komputerowo sterowanym procesom produkcyjnym istnieje duża łatwość dozowania wszelkich składników mieszanki betonowej dla danego wyrobu oraz formowania, zagęszczania i dojrzewania betonu w optymalnych warunkach. Stwarza to możliwości np. optymalizacji stosunku wodno-cementowego w recepturze betonu – zazwyczaj waha się on między 0,35 do 0,40. Odpowiednio stosowane popioły lotne, żużle i krzemionki, które powstają jako odpady i trafiałyby na wysypiska śmieci, mogą zmniejszyć ilość cementu stosowanego w betonie. Całkowite zastąpienie cementu portlandzkiego tymi materiałami wynosić może obecnie nawet powyżej 20%. Rezultatem tych zaawansowanych procesów technologicznych jest nie tylko wyraźnie lepsza jakość betonu prefabrykowanego w stosunku do betonu układanego na miejscu budowy, ale i zmniejszenie zużycia cementu, którego produkcja jest odpowiedzialna za sporą emisję gazów cieplarnianych.

Redukcji zużycia zasobów naturalnych i energii sprzyja ograniczanie ilości betonu i stali na skutek optymalizacji ich właściwości oraz minimalizacji wymiarów przekrojów poprzecznych elementów. Rozwijające się obecnie badania nad konstrukcjami betonowymi zbrojonymi włóknami węglowymi pokazują bardzo obiecujące rezultaty w tym

zakresie – możliwe jest stosowanie bardzo smukłych przekrojów cienkościennych, choć ich projektowanie i realizacja wymaga bardzo dużej precyzji [7]. Stosowanie zoptymalizowanych kształtów np. drążonych przekrojów poprzecznych może prowadzić nawet do 50% oszczędności betonu i stali zbrojeniowej. Dodatkowym efektem takich działań jest zmniejszenie ciężaru konstrukcji, prowadzące do dalszych oszczędności, np. zmniejszenia fundamentów lub uniknięcia konieczności wzmocnienia podłoża gruntowego.

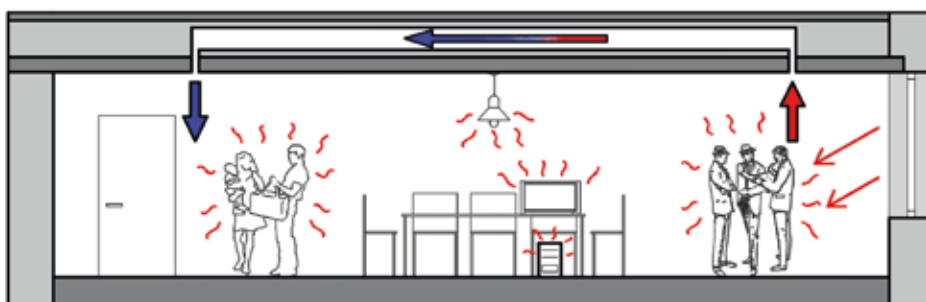
Bardzo obiecującym rozwiązaniem jest beton samozagęszczający się. Zazwyczaj wykorzystywany jest w elementach cienkościennych, o nietypowych przekrojach poprzecznych, posiadających silnie skoncentrowane zbrojenie, ponieważ do prawidłowego zagęszczenia nie potrzebuje on żadnych wibracji i jednocześnie jest łatwy w aplikacji. Coraz częściej podkreślany jest fakt, że stosowanie betonów SCC obniża poziom hałasu w fabryce oraz przyspiesza proces betonowania [8].

Zmniejszenie zapotrzebowania na energię i emisji gazów cieplarnianych

Eksplatacja budynku w okresie użytkowania jest o wiele bardziej

energochłonna niż sama jego budowa. Można powiedzieć, że większość emisji gazów cieplarnianych w całym cyklu życia obiektu budowlanego powstaje w trakcie jego eksploatacji. W przypadku betonowych konstrukcji prefabrykowanych, emisja dwutlenku węgla, który powstaje podczas produkcji cementu, jest później równoważona przez minimalizację działań w zakresie utrzymania komfortu cieplnego (ogrzewanie, klimatyzacja) w porównaniu do konstrukcji stalowych czy drewnianych, oraz pewne pochłanianie przez dwutlenku węgla w wyniku karbonatyzacji betonu, zachodzącej przez cały okres użytkowania konstrukcji. Duża pojemność termiczna konstrukcji betonowych pozwala na powolne pochłanianie i uwalnianie ciepła z otoczenia, co jest wykorzystywane w niektórych rozwiązaniach stropowych [9] – dzięki temu zmniejszane jest zapotrzebowanie na energię niezbędną do ogrzewania, wentylacji i klimatyzacji.

W okresie ostatnich 10 lat, w zakładach prefabrykacji w Wielkiej Brytanii, zużycie energii obniżone zostało o około 10%. Dodatkowym aspektem proekologicznym jest fakt, iż coraz większa część używanej energii elektrycznej pochodzi ze źródeł odnawialnych [10].



Ponowne wykorzystanie budynku lub jego elementów

Ponieważ demontaż istniejących budynków powoduje zarówno duże koszty finansowe (rosnące z uwagi względu na coraz bardziej rygorystyczne przepisy dotyczące hałasu czy produkcji zanieczyszczeń) i społeczne (będące wynikiem np. problemów komunikacyjnych czy innych niedogodności), to rosnąć będzie zainteresowanie właścicieli modernizacją obiektu (na przykład poprzez zapewnienie mu nowej elewacji, która mogłaby być atrakcyjniejsza estetycznie i efektywniejsza z punktu widzenia ochrony cieplnej). Stąd, koncepcja projektowa budynku powinna od samego początku uwzględniać możliwość mała kłopotliwego przeprowadzania różnego rodzaju zmian. W przypadku budynków biurowych, a także centrów handlowych, obiektów magazynowych czy przemysłowych szczególnie ważne jest takie kształtowanie podstawowego układu

nośnego, aby w trakcie użytkowania pozostawała możliwość łatwego dostosowania obiektu do zmieniających się funkcji. Również w przypadku budynków mieszkalnych, szczególnie w dobie postępujących zmian demograficznych, pożądana jest możliwość swobodnego sytuowania ścianek działowych lub też łączenia lub dzielenia mieszkań. Najbardziej odpowiednim rozwiązaniem w tym zakresie jest stworzenie uwolnionych przestrzeni wewnętrznych, nieposiadających elementów konstrukcyjnych ograniczających możliwość przyszłej zmiany. Współczesne rozwiązania stropów prefabrykowanych bardzo często bazują na technologii strunobetonu, która oprócz możliwości znaczącego zwiększenia rozpiętości elementów, skutkuje również poprawą trwałości i estetyki konstrukcji. Dzięki dobrej przyczepności strun sprężających do betonu wysokiej wytrzymałości, realizacja sprężenia jest tańsza niż w konstrukcjach kablobetonowych



Tabela 1. Przykłady oceny rozwiązań konstrukcyjnych z uwagi na demontowalność.

	korzystne +	pośrednie ~	niekorzystne -
Typ połączenia	 <p>połączenie „na klik”</p>	 <p>połączenie śrubowe</p>	 <p>połączenie „na mokro”</p>
Dostępność złącza	 <p>złącze słupów w 1/3 wysokości kondygnacji</p>	 <p>ukryte złącze belka – słup</p>	 <p>złącze kielicha z podstawą stopy fundamentowej</p>
Zintegrowanie elementów	 <p>swobodne podparcie elementów</p>	 <p>uciąglenie elementów kablami sprężającymi</p>	 <p>zintegrowanie instalacji ze stropem</p>

– wymaga ona mniejszego nakładu pracy ludzkiej oraz nie potrzebuje stosowania kosztownej armatury kotwiącej.

W przypadku konieczności demontażu konstrukcji należy rozważyć ponowne użycie prefabrykatów. W badaniach realizowanych w TU Delft w Holandii wykazano, że ponowne użycie zdemontowanych kanałowych płyt stropowych może zmniejszyć emisję dwutlenku węgla do atmosfery o 60 – 85 % w stosunku do emisji związanej z wyprodukowaniem nowych prefabrykatów stropowych o tych samych parametrach [11]. Zasady projektowania z uwagi na demontowalność

elementów, wprowadzane w ramach systemu wielokryterialnej certyfikacji budynków BREEM, określiła już Holenderska Rada Budownictwa Ekologicznego (DGBC). Przyjmują one wskaźnikową ocenę zastosowanych złączy w konstrukcji prefabrykowanej. Ocenie poddane są typy połączeń, dostępność do złączy oraz wzajemne zintegrowanie elementów konstrukcyjnych jak i elementów wyposażenia budynku [6]. Przykłady takiej oceny pokazano w tabeli 1.

Odzyskiwanie materiałów i surowców

Po zakończeniu okresu eksploatacji konstrukcje prefabrykowane mogą

być w pełni poddane recyklingowi. Zdemontowane prefabrykaty, których nie da się ponownie wykorzystać zgodnie z pierwotną ich funkcją mogą znaleźć inne, różne od pierwotnego, zastosowania (w języku angielskim dobrze to opisuje słowo „downcycling” – wytwarzanie produktów/obiektów, które powstają z odpadów, ale ich cechy są gorsze od pierwotnych – np. wykorzystanie starych płyt stropowych jako płyt drogowych lub produkcja kruszywa ze starych prefabrykatów betonowych).

Badania [12] wykazały, że właściwości kruszyw pochodzących z recyklingu są odpowiednie do produkcji nowego, dobrego jakościowo betonu samozagęszczającego się. Możliwe jest wyprodukowanie betonu o wysokiej wytrzymałości i dużej trwałości na bazie kruszywa pochodzącego z recyklingu prefabrykatów, uzyskując zadowalające

wyniki nawet przy 100% jego udziale. Tego typu kruszywo powoduje co prawda pewien wzrost skurczu, ale praktycznie nie ma wpływu na właściwości termiczne czy ścieralność betonu. W zachodnioeuropejskiej prefabrykacji kruszywa wtórne stanowią obecnie już około jednej piątej używanych kruszyw.

Wysoce skuteczne systemy recyklingu stosowane w zakładach prefabrykacji umożliwiają odzyskanie praktycznie całej wody technologicznej, szlamu, kruszyw lub cementu i ponowne wykorzystanie ich w produkcji (np. w procesach wykończeniowych, takich jak: polerowanie i gładzenie można wykorzystywać odzyskiwaną wodę). Oznacza to funkcjonowanie niemalże zamkniętego systemu obiegu, który minimalizuje ilość odpadów wywożonych na wysypiska, a zużycie wody z sieci wodociągowej może być skutecznie obniżone.



Odpady

Ponieważ prefabrykaty betonowe są produkowane fabrycznie, gdzie stosuje się technologie dokładnego dozowania, w zakładzie powstaje niewiele odpadów. Dodatkowo, są one łatwiejsze do ponownego użycia, ponieważ cały proces odbywa się w jednym miejscu. Minimalizacji ilości odpadów sprzyja też stosowanie nowoczesnych szalunków (np. wykonanych z włókien szklanych), które mogą być znacznie dłużej wykorzystywane. Dane z Wielkiej Brytanii pokazują, że w ostatniej dekadzie ilość odpadów w zakładach prefabrykacji zmalała o około 20% i tylko 1% z nich trafił na wysypisko (około 3 kg na tonę wyrobów) [10].

Podsumowanie

Prefabrykacja betonowa daje ogromne możliwości tworzenia budownictwa o obiegu zamkniętym. Już na etapie projektowania można przewidywać takie rozwiązania konstrukcyjne, które przyniosą wymierne korzyści dla środowiska – mowa tu zarówno o optymalizacji materiałowej i geometrycznej elementów konstrukcyjnych, jak i doborze ich złączy z uwagi na demontowalność. Zrównoważony rozwój na etapie produkcji prefabrykatów betonowych polega na poprawie efektywności wykorzystania zasobów, redukcji odpadów i zapewnieniu utrzymania systemów zarządzania środowiskiem zgodnych z obowiązującymi przepisami, na przykład z Systemem Zarządzania Środowiskowego ISO 14001. Użycie prefabrykatów na placu budowy powoduje mniejsze zanieczyszczenie powietrza oraz redukcję hałasu.

Deskowania na budowie są zredukowane lub wyeliminowane, a ilość prac wykończeniowych obniżona, dzięki czemu tempo realizacji budynku znacząco rośnie, przy jednoczesnej minimalizacji zużytej energii. Ponadto znacznie zmniejszona jest ilość odpadów na budowie. To, co dzieje się po zakończeniu budowy, może również wnieść znaczący wkład w strategię zrównoważonego budownictwa. Zapewniając rozwiązania o dużej trwałości, umożliwiające łatwą przebudowę lub modernizację obiektu, np. przez zmniejszenie ilości podpór i zastosowanie stropów dużej rozpiętości, wydłuża się prawdopodobny okres użytkowania obiektu. Niebagatelny jest też końcowy etap cyklu życia konstrukcji, kiedy podejmowane są decyzje o rozbiórce, ponownym użyciu komponentów lub odzyskaniu materiałów i surowców.

Bibliografia

- [1] Derkowski W. et al., Obiekty kubaturowe mieszkalne i inne, w których głównym układem konstrukcyjnym są ściany, Prefabrykacja: jakość, trwałość, różnorodność, Z. 3, Stowarzyszenie Producentów Betonu, 2017
- [2] Derkowski W., *Large panels buildings – the possibilities of modern precast industry*, Cement, Wapno, Beton, 2017 (5), pp. 414-425
- [3] *Our Common Future*, Report of the World Commission on Environment and Development: WCED, 1987
- [4] Skupień P., Nieszczyński M., Derkowski W., *Ściany warstwowe – efektywne rozwiązanie nowoczesnej prefabrykacji*, Materiały Budowlane (536), 2017 (4), pp. 30-32
- [5] *Neutralność klimatyczna do 2050 r. Strategiczna długoterminowa wizja zamożnej, nowoczesnej, konkurencyjnej i neutralnej dla klimatu gospodarki UE*, Komisja Europejska, 2018
- [6] *A framework for circular buildings*, Dutch Green Building Council, August 2018
- [7] Flaga K., Derkowski W., Surma M., *Concrete strength and elasticity of precast thin-walled elements*, Cement, Wapno, Beton, 2016(5), pp. 310-317
- [8] Elliott K., *Precast Concrete Structures*, CRC Press, 2019
- [9] Derkowski W., *New solutions for prefabricated floor slabs*, Cement, Wapno, Beton 24, 2019 (5), pp. 372-382
- [10] *Sustainability Matters* reports, British Precast, 2018-2020
- [11] Naber, N.R., *Reuse of hollow core slabs from office buildings to residential buildings*, Master's thesis, TU Delft, 2012
- [12] Fiol F. et al., *Influence of Recycled Precast Concrete Aggregate on Durability of Concrete's Physical Processes*, Appl. Sci. 10, 2020, 7348



Zakłady cementowe w Polsce

Stowarzyszenie Producentów Cementu





Stowarzyszenie Producentów Cementu
ul. Lubelska 29, 30-003 Kraków
tel. +48 12 423-33-55
e-mail: wydawnictwo@polskicement.pl
www.polskicement.pl



www.dnibetonu.com

ISBN: 978-83-61331-42-1

