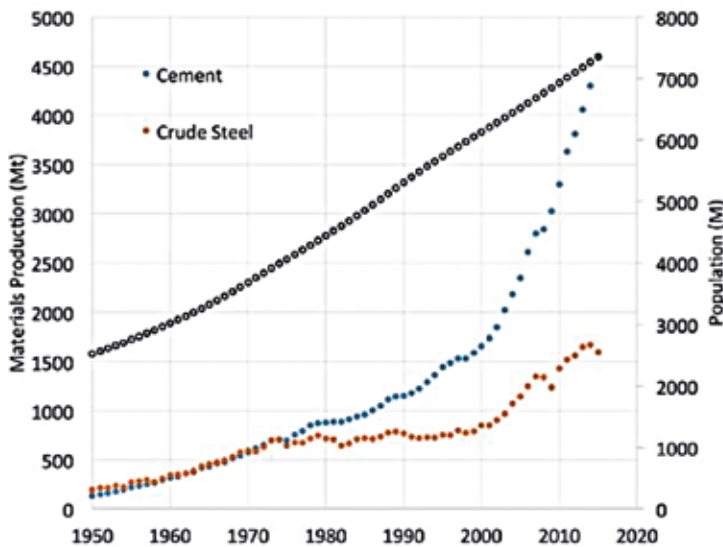


Dekarbonizacja w przemyśle cementowym – nowe podejście

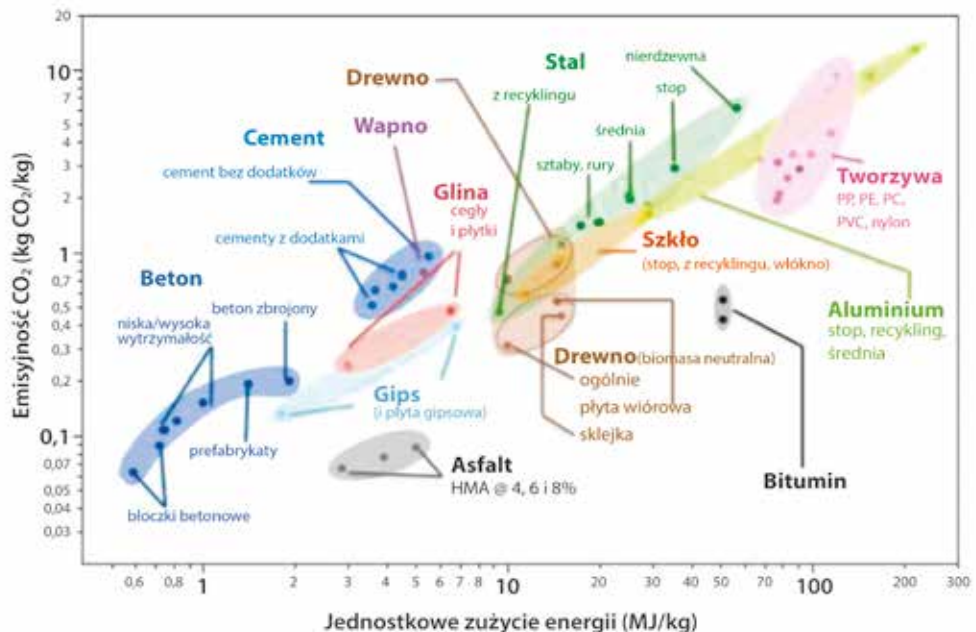
Walka z globalnym ociepleniem klimatu wiąże się głównie z ograniczeniem emisji CO₂ do atmosfery, czyli dekarbonizacją. Jest to proces na miarę kolejnej rewolucji przemysłowej w Europie. Dekarbonizacja to przestawienie gospodarki na bezemisyjne lub niskoemisyjne źródła energii i technologie, któremu musi towarzyszyć zmiana zachowań społecznych. To projekt systemowy, który uwzględnia różne podejścia, różne stopnie trudności realizacji celów w różnych dziedzinach, a co za tym idzie działania w różnych horyzontach czasowych – krótszym do 2025, średniookresowym do 2030 i długookresowym do 2050 r.

Rys. 1. Porównanie dynamiki wzrostu produkcji cementu i stali w odniesieniu do wzrostu liczby ludności na świecie

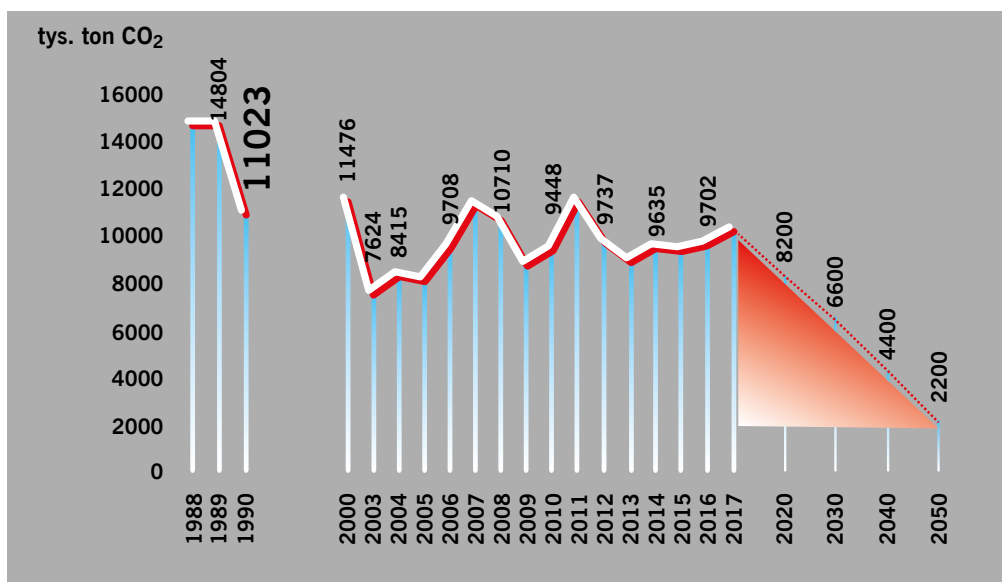
Dekarbonizacja odnosi się również do przemysłu cementowego. Przemysł cementowy na świecie emituje około 5% CO₂ antropogenicznego i ma 3,5% udział w emisji wszystkich gazów cieplarnianych.



Rys. 2. Emisyjność różnych materiałów budowlanych



Nie każdy jednak zdaje sobie sprawę z tego, że cement to materiał wytwarzany przez człowieka w największych ilościach na świecie – obecnie roczna produkcja wynosi około 4,6 mld ton. W ostatnich 65 latach ilość produkowanego na świecie cementu wzrosła prawie 34-krotnie i ten wzrost był znacznie wyższy niż w przypadku innych materiałów konstrukcyjnych, np. stali. Dla porównania, w tym okresie populacja ludności na świecie zwiększyła się trzykrotnie. Przewiduje się, że wraz z rosnącą populacją i urbanizacją produkcja cementu może wzrosnąć do 2050 r. o dalsze 12-23%. Realizacja imponujących projektów mostów, drapaczy chmur, wieżowców, dróg, linii kolejowych czy zapór wodnych wymaga coraz większych ilości betonu i właśnie ten materiał jest zużywany w największych ilościach na świecie, nie licząc wody. Warto zauważyć, że beton jako mieszanina cementu, kruszywa i wody ma stosunkowo niską emisyjność w porównaniu do innych materiałów – od 60 g dla bloczków betonowych o niskiej wytrzymałości do 200 g CO₂ na kg betonu dla betonu zbrojonego. Dekarbonizacja nie oznacza wyłącznie redukcji emisji CO₂ z procesu produkcyjnego, ale także w sposób pośredni wynika z oszczędzania energii. Z tego powodu tak istotna jest ocena całego cyklu życia wyrobów. Możliwości redukcji emisji poszukuje się nie tylko w ulepszeniu technologii produkcji, ale także poprzez ocenę materiału pod kątem oszczędzania energii w kolejnych cyklach jego życia. Wytwarzanie cementu stanowi tylko wycinek w całym cyklu życia konstrukcji betonowej. W procesie produkcji cementu około 40% CO₂ pochodzi ze spalania paliw, a 60% głównie z rozkładu węglanu wapnia do tlenku wapnia i CO₂. Z tego powodu realizacja celów redukcyjnych w sektorze cementowym jest tak bardzo trudna i nie będzie możliwa bez opracowania przełomowych i kosztownych technologii. Dlatego

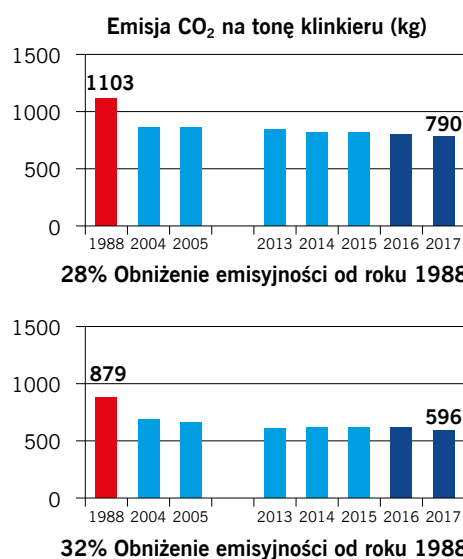


Rys. 3. Emisje CO₂ z przemysłu cementowego w Polsce

również jest konieczne podejście w horyzoncie czasowym do 2050 r. Poprawa efektywności procesu produkcyjnego cementu – czyli mniejsze jednostkowe zużycie ciepła, niższe zużycie energii elektrycznej, stosowanie paliw na bazie odpadów o niższej emisyjności nie wystarczą, aby sprostać ambitnym celom redukcji emisji CO₂ o 80% w odniesieniu do poziomu bazowego z roku 1990. Ślad węglowy produkcji cementu w przypadku zużycia energii zależy od kilku uwarunkowań: od średniej wydajności produkcyjnej zakładu, zawartości wilgoci i spiekalności surowców czy dostępności surowców wtórnych.

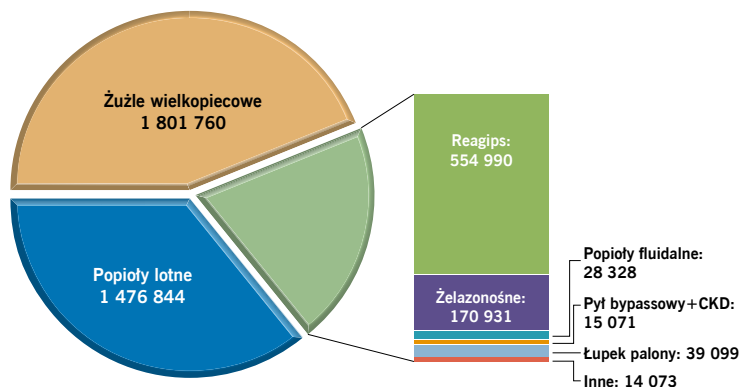
Wychwytywanie CO₂ i jego składowanie lub użycie (Carbon Capture and Storage/Carbon Capture and Usage – CCS/CCU) jest technologią przełomową i najbardziej skuteczną, ale jednocześnie jest najkosztowniejsze i wiąże się z bardzo znaczącym wzrostem zużycia energii elektrycznej. Jeszcze kilka lat temu wydawało się, że to jedyna droga do skutecznej redukcji CO₂ z przemysłu cementowego. Z opublikowanego w 2018 r. przez Cement Sustainable Initiative WBCSD i Światową Agencję Energii nowego Raportu „Technology Roadmap Low-Carbon Transition in the Cement Industry” wynika, że w ostatnich latach badania nad niskoemisyjnością cementów koncentrują się w równym stopniu na dalszym rozwijaniu technologii wychwytywania i składowania lub użycia CO₂, jak i na analizowaniu możliwości zastąpienia innymi materiałami klinkieru portlandzkiego – składnika cementu, który jest odpowiedzialny za główną emisję CO₂ z produkcji cementu. Stało się jasne, że trzeba poszukiwać innych technologii o znaczącym potencjale redukcji CO₂, a przy tym tańszych niż CCS/CCU. Obecnie przewiduje się, że w ciągu 20-30 lat coraz bardziej realna jest znacząca redukcja CO₂ bez wdrażania kosztownej i energochłonnej metody CCS/CCU. W badaniach zakłada się, że dominującym materiałem wiążącym nadal pozostaną cementy oparte na klinkierze portlandzkim.

W cementowni podstawowym surowcem do produkcji klinkieru portlandzkiego jest węgiel wapnia, który podgrzany do temperatury około 900°C rozkłada się na tlenek wapnia i CO₂. Dalszy wzrost temperatury w piecu cementowym powoduje, że CaO reaguje z SiO₂ i Al₂O₃ pochodzącymi z glino-krzemianów obecnych w zestawie surowcowym,



Rys. 4. Emisyjność CO₂ z przemysłu cementowego w Polsce

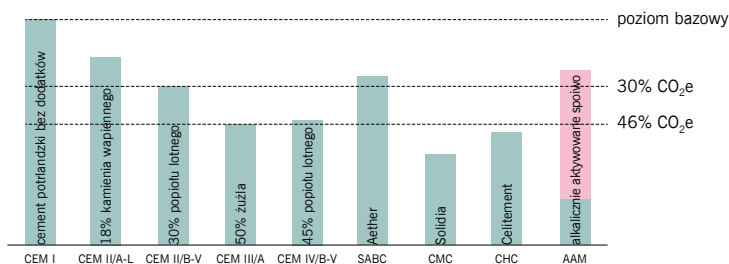
prowadząc do powstania krzemianów i glinianów wapnia. Te minerały w procesie hydratacji warunkują pożądane parametry użytkowe cementu, jak np. jego wytrzymałość. Dodatkowy produkt reakcji rozkładu węgla wapnia – CO₂ jest emitowany do atmosfery, stanowiąc 2/3 całej emisji z produkcji cementu. Pozostały CO₂ pochodzi z paliw, których spalanie dostarcza ciepła do przeprowadzenia reakcji klinkieryzacji w piecu cementowym. Zmniejszenie udziału klinkieru portlandzkiego w cemencie bez pogarszania jego parametrów użytkowych przynosi podwójną korzyść w działaniach na rzecz redukcji CO₂ – z jednej strony ogranicza się emisję pochodzącą z rozkładu surowców, a z drugiej strony redukuje się także ilość ciepła potrzebną do wytworzenia minerałów klinkierowych. Reakcja prowadząca do powstania krzemianu trójwapniowego (alitu) zachodzi w temperaturze 1450°C, natomiast powstanie krzemianu dwuwapniowego (belitu) wymaga już o około 100°C mniej. Belit ma jednak niższą aktywność hydrauliczną niż alit i w sposób istotny wpływa na wytrzymałość dopiero po 28 dniach hydratacji. W zakresie ograniczenia w cemencie zawartości typowego klinkieru portlandzkiego zawierającego przewagę najbardziej energochłonnej fazy ali-



Rys. 5. Zużycie surowców odpadowych w przemyśle cementowym w 2016 r. (w tonach)

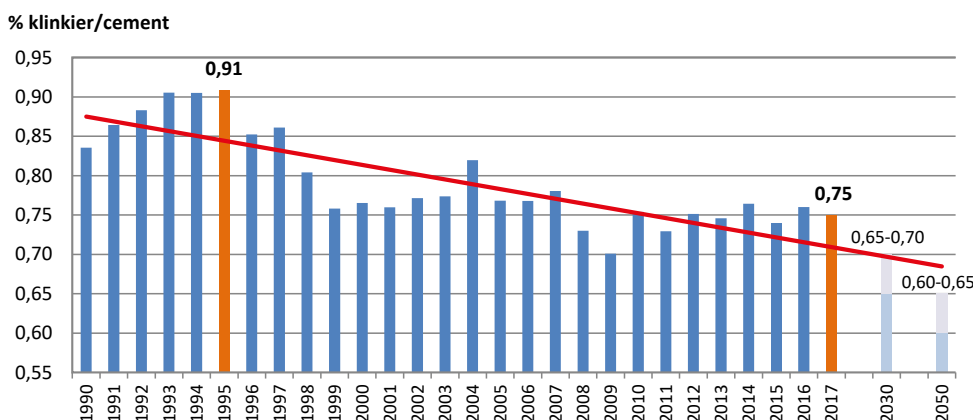
tu (> 60%) wraca się do technologii, które były przedmiotem badań kilkanaście lub kilkadziesiąt lat temu. Typowe cementy na bazie klinkieru portlandzkiego z dodatkami mineralnymi, takimi jak popiół lotny, żużel wielkopiecowy czy kamień wapienny, to przykład spoiw niskoemisyjnych. Analizy dotyczące średniego składu cementu muszą uwzględnić regionalne uwarunkowania dotyczące dostępności dodatków, jak żużel wielkopiecowy czy popioły lotne. Przewiduje się, że dostępność tych dodatków, szczególnie popiołów lotnych, będzie w przyszłości znacznie ograniczona. Nadal ważnym czynnikiem pozostaną preferencje konsumentów, którzy mogą wymagać cementów bez dodatków. Oczekiwania dotyczące zmniejszenia śladu węglowego materiałów budowlanych powodują, że wiele badań skupia

Rys. 6. Emisja CO₂ dla różnych rodzajów cementu w odniesieniu do cementu portlandzkiego bez dodatków



się na opracowaniu nowych dodatków do cementu, które mogłyby zastąpić klinkier portlandzki, zachowując normowe parametry cementu. W tych badaniach bierze się pod uwagę waloryzację bardzo różnych materiałów, jak żużel z pieca łukowego, popioły z różnych źródeł, pozostałości boksytu czy odpady z działalności wydobywczej. Głównym czynnikiem rozwoju nowych cementów jest ich niższy ślad węglowy w porównaniu do cementu bez dodatków, produkowanego na bazie klinkieru portlandzkiego. Warto zauważyć, że w przypadku tradycyjnych ce-

Rys. 7. Wskaźnik klinkier/cement w przemyśle cementowym w Polsce



mentów portlandzkich z dodatkami ślad węglowy może być na podobnym poziomie, jak w przypadku nowych, alternatywnych cementów.

Nowe cementy muszą spełniać przede wszystkim wymagania użytkowe oczekiwane od materiału mineralnego, który po zmieleniu do postaci drobnego proszku jest w stanie reagować odpowiednio szybko z wodą i/lub CO₂. W rezultacie uzyskuje się stwardniałą masę, która może być użyta jako materiał wiążący w betonie lub jako zaprawa. Dodatkowo, proces twardnienia powinien przebiegać odpowiednio szybko, aby można było zastosować takie cementy w nowoczesnych konstrukcjach w zastępstwie cementów produkowanych na bazie konwencjonalnego klinkieru portlandzkiego. Atrakcyjne z punktu widzenia niższej temperatury obróbki termicznej mogą być spoiwa, opracowane wiele lat temu, jak cementy glinosiarczanowe, glinokrzemianowe spoiwa autoklawizowane, cementy belitowe czy spoiwa żużlowo-alkaliczne. Poszukiwania alternatywnych materiałów zastępujących klinkier w cemencie pozwoliły na opracowanie mieszaniny skalcyonowanej gliny i mielonego kamienia wapiennego. Materiał o takim składzie jest stosunkowo niedrogi i dostępny w szerokim zakresie i bez straty wytrzymałości może zastąpić do 50% klinkieru w cemencie. Wyliczono, że zastąpienie klinkieru tą mieszaniną na poziomie 40% pozwoliłoby uniknąć około 400 mln ton CO₂ rocznie.

To, co w sposób istotny ogranicza wykorzystanie na większą skalę różnych alternatywnych rodzajów cementu, to często brak długoterminowych badań dotyczących szczególnie wytrzymałości konstrukcji przy ich wykorzystaniu.

W przewidywaniach na rok 2030 zakłada się, że wskaźnik klinkier/cement będzie wynosił w Europie 0,65, obecnie średni poziom to 0,75. Warto zwrócić uwagę, że najniższy wskaźnik klinkier/cement jest w Chinach i w 2014 wyniósł średnio 0,58; przewiduje się, że do 2030 ten poziom się nie zmieni.

Podejście polegające na analizie całego cyklu życia betonu, od wydobycia surowców na jego wyprodukowanie po rozbiórkę konstrukcji budowlanej i ponowne wykorzystanie materiału odpadowego, pozwala dostrzec kilka możliwości obniżenia emisyjności tego materiału budowlanego:

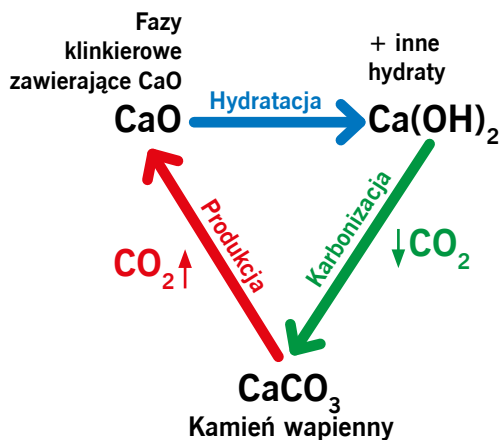
- zoptymalizowanie składu mieszanki betonowej w konstrukcji w taki sposób, aby dostosować jej parametry do warunków pracy w danej konstrukcji – bez niepotrzebnego przewartościowania jej parametrów
- maksymalne wydłużenie czasu życia konstrukcji, aby służyła jak najdłużej, ale jednocześnie wymagała jak najmniej napraw, a jej design i funkcjonalność pozostały nowoczesne

- możliwość redukcji zużycia energii podczas eksploatacji budynku, dzięki masie termicznej samego betonu
- powierzchnie betonowe ze względu na swoją jasną barwę mają lepszą zdolność odbijania promieni słonecznych (albedo), co powoduje, że nie nagrzewają się w miastach w takim stopniu jak ciemniejsze powierzchnie, a z drugiej strony dzięki albedo mniej energii potrzeba na oświetlenie np. tuneli
- beton z rozbiórki w postaci całych elementów czy jako kruszywo może być z powodzeniem ponownie wykorzystany, co ogranicza potrzebę produkowania nowych materiałów i w efekcie redukcję emisji do atmosfery gazów cieplarnianych
- rekarbonizacja betonu ma miejsce w obecności CO_2 , który jest absorbowany i chemicznie wiązany w strukturze betonu. Jest to powolny proces, który można przyspieszyć poprzez rozwinięcie powierzchni reakcji, np. w przypadku pokruszonego betonu. Z punktu widzenia redukcji emisji CO_2 proces karbonizacji betonu jest bardzo korzystny i do pewnego stopnia może skompensować ilość CO_2 wyemitowanego podczas produkcji cementu. Ilość pochłoniętego CO_2 będzie głównie zależała od czasu życia tej konstrukcji i jej fazy odpadu – im dłużej będzie trwał proces karbonizacji, tym więcej CO_2 zostanie pochłonięte. Może mieć również korzystny wpływ na poprawę wytrzymałości betonu, ponieważ produkt karbonizacji – CaCO_3 , ze względu na większą objętość w porównaniu z Ca(OH)_2 reagującym z CO_2 , szczelniej wypełnia pory w strukturze betonu. Beton, który staje się odpadem budowlanym, w dalszym ciągu ma zdolność absorpcji CO_2 , a przy większym rozwinięciu powierzchni w wyniku pokruszenia reakcja jest zintensyfikowana. Warto jednak pamiętać, że ta sama reakcja korzystna dla struktury betonu w betonie zbrojonym może prowadzić do depastywacji tego zbrojenia.

W przypadku betonu jego cykl życia nie kończy się na rozbiórce konstrukcji betonowej, ponieważ elementy betonowe z tej rozbiórki mogą być ponownie wykorzystane lub zużyty beton może dalej pełnić użyteczną funkcję jako kruszywo.

Dodatkowe efekty w postaci niższej emisji CO_2 przynosi również bardziej efektywne użycie klinkieru w betonie i zaprawie, m.in. dzięki kontrolowanej przemysłowo produkcji mieszanek betonowych i suchych zapraw:

- optymalne zaprojektowanie mieszanki betonowej może poprawić tzw. ekowydajność określoną jako ilość CO_2 na m^3 na MPa wytrzymałości na ściskanie. Oznacza to uzyskanie odpowiednich parametrów mieszanki betonowej przy mniejszym udziale klinkieru poprzez odpowiednie upakowanie w mieszance betonowej cząstek o różnych rozmiarach przy użyciu odpowiednich środków dyspergujących i dodatek wypełniaczy
- tam, gdzie to jest uzasadnione, powinno się wykorzystywać beton o wyższej wytrzymałości w celu zredukowania całkowitej ilości materiałów w konstrukcji
- przemysłowa produkcja betonu i zapraw (na przykład betonu towarowego czy suchych mieszanek) w porównaniu do słabo kontrolowanego przygotowywania betonu na placu budowy, mogą zapewnić dalsze oszczędności.



Rys. 8. Cykl węglowy cementu i betonu – rekarbonizacja

W dłuższej perspektywie dalsze możliwości w zakresie redukcji emisji pojawią się wraz z wdrożeniem na większą skalę cyfrowych systemów produkcji, dzięki którym będzie możliwe bardziej efektywne pod względem zużycia materiałów projektowanie i wykonywanie elementów konstrukcji budowlanej.

Niezbrojone konstrukcje betonowe zbudowane przez Rzymian, jak Panteon w Rzymie czy akwedukty, przetrwały ponad 2000 lat i nadal są w dobrym stanie. Zrównoważony beton to taki, z którego powstają konstrukcje, które nie wymagają remontów i służą jak najdłużej, dzięki czemu oszczędza się energię i zasoby surowców i ogranicza emisję do atmosfery.

dr inż. Bożena Środa

Stowarzyszenie Producentów Cementu

Literatura:

1. *Eco-efficient cements: Potential economically viable solutions for a low- CO_2 cement-based materials industry*, UN Environment 2017
2. *Raport „Technology Roadmap Low-Carbon Transition in the Cement Industry Low*, CSI WBCSD&IEA, 2018
3. *World Cement Association, some developments in cements by Raman Mangabhai*
4. *Cement and Carbon Emissions*, Laurent Barcelo, John Kline, Gunther Walenta & Ellis Gartner Lafarge Canada, Lafarge Research Center – France
5. *Next generation cements*, Concrete Quarterly nr 256, 2016
6. *Low carbon cements and concretes in modern construction*, John W. Harrison, www.tececo.com
7. *Making Concrete Change Innovation In Low-carbon Cement and Concrete*, Chatham House Report 2018

konstrukcje z betonu o wysokiej wytrzymałości

Rys. 9. Trójkąt Mehty ograniczenia śladu węglowego betonu

