*mgr inż. Kamil Załęgowski**
*dr inż. Wioletta Jackiewicz-Rek**
*dr hab. inż. Andrzej Garbacz, prof. PW **
*prof. dr inż. Luc Courard***

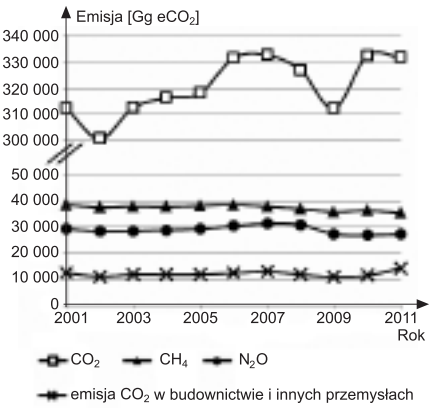
Ślad węglowy betonu

Carbon footprint of concrete

Przeciwdziałanie zmianom klimatu obecnie jest jednym z najistotniejszych elementów polityki światowej. Przyczynił się do tego wzrost średniej rocznej temperatury na Ziemi w ostatnim stuleciu o 0,7 °C (1 °C w Europie) oraz świadomość, że brak reakcji może doprowadzić do dalszego wzrostu nawet o 6,4 °C w ciągu następnych stu lat [1]. Ludzka działalność powoduje zwiększenie koncentracji gazów cieplarnianych w atmosferze, głównie CO_2,który utrudnia emisję ciepła w przestrzeń kosmiczną, tym samym przyczyniając się do globalnego ocieplenia i zmiany klimatu.

Obecnie we wszystkich sektorach przemysłu obserwuje się dążenia 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), **definiowany przez 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, oprócz emisji CO_2, głównego źródła wzmocnienia efektu cieplarnianego, obejmuje także metan, podtlenek azotu, fluorowęglowodory, perfluorowodory (rysunek 1).

Głównym źródłem emisji gazów cieplarnianych z ludzkiej aktywności jest spalanie paliw kopalnych w celu pozyskiwania energii elektrycznej, ogrzewania mieszkań i w transporcie. Znacznie mniejszym poziomem emisji cechuje się energia pozyskana ze źródeł odnawialnych (tabela 1). Ważnym czynnikiem jest też transport surowców do zakładów produkcyjnych, gdyż zużycie litra paliwa uwalnia do atmosfery ok. 2,3 kg CO_2, natomiast litra diesla 2,7 kg CO_2.



Rys. 1. Emisja gazów cieplarnianych w Polsce: CO_2, CH_4, N_2O, CO_2 w budownictwie i innych przemysłach [2]

W celu ujednolicenia jednostek i rozszerzenia pojęcia śladu węglowego na pozostałe gazy wprowadzono termin ekwiwalent dwutlenku węgla (eCO_2). 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 N_2O GWP wynosi 310, więc emisja 1 mln t N_2O odpowiada 310 mln t CO_2.

Tabela 1. Ślad węglowy wytworzenia przykładowych produktów

Źródło emisji	Wielkość emisji	Źródło danych
Energia z gazu	0,5 kg eCO_2/kWh	[3]
Energia z węgla	>1,0 kg eCO_2/kWh	[3]
Energia nukleama	0,005 kg eCO_2/kWh	[3]
Energia słoneczna	0,088 kg eCO_2/kWh	[4]
Energia geotermalna	0,015 – 0,053 kg eCO_2/kWh	[4]
Energia wiatru	0,020 – 0,096 kg eCO_2/kWh	[4]
Produkcja stali	1900 kg eCO_2/t	[5]

Tabela 2. Wartości wskaźnika GWP dla głównych gazów cieplarnianych [6]

Główne gazy cieplarniane	GWP
Dwutlenek węgla (CO_2)	1
Metan (CH_4)	21
Podtlenek azotu (N_2O)	310
Fluorowęglowodory (HCFs)	124 – 14800
Perfluorowęglowodory (PFCs)	7390 – 12200
Sześciofluorek siarki (SF_6)	22800

Obliczanie śladu węglowego betonu

Rozważania dotyczące emisji gazów cieplarnianych oraz działań na rzecz zrównoważonego rozwoju nie ominęły przemysłu materiałów budowlanych. Najpowszechniej stosowany jest beton. Przygotowanie mieszanki betonu zwykłego zanieczyszcza atmosferę ziemską o 140 – 310 kg CO_2 ekw./t. Jest to kilkakrotnie mniej niż w przypadku produkcji stali (~1900 kg CO_2 ekw./t). Wpływ betonu na środowisko naturalne przybiera na znaczeniu przy uwzględnieniu ogromnej ilości tego materiału produkowanego rocznie na świecie – ponad 3,8 bln m^3 [7].

Obliczanie śladu węglowego betonu opiera się na analizie cyklu życia, obejmującej najczęściej wydobycie i przygotowanie surowców, ich transport do betonowni, przygotowanie mieszanki betonowej, kończąc na jej transporcie na plac budowy [8]. Należy też uwzględnić etap użytkowania oraz tzw. drugie życie betonu, okres po eksploatacji, czyli rozbiórkę i ewentualne

* Politechnika Warszawska, Wydział Inżynierii Lądowej
** The University of Liege, ArGEnCo

ponowne użycie. Istotną kwestią, rzadko podejmowaną w ekologicznych debatach o materiałach na bazie cementu jest sekwestracja CO_2 następująca w procesie zwanym karbonatyzacją. W wyniku ekspozycji na powietrze, beton absorbuje atmosferyczny CO_2, który reaguje z wolnym wodorotlenkiem wapnia $Ca(OH)_2$ dając węglan wapnia $CaCO_3$:

$$Ca(OH)_2 + CO_2 \rightarrow CaCO_3 + H_2O \quad (1)$$

Wpływ karbonatyzacji na ogólny bilans CO_2 w cyklu życia betonu jest marginalny. Powodem jest mała głębokość absorpcji CO_2 i mała powierzchnia betonu w konstrukcji, np. wiadukt betonowy objętości 62 m^3 może pochłonąć 450 kg CO_2 [9]. Sekwestracja CO_2 na ośmiokrotnie wyższym poziomie zachodzi w czasie drugiego życia betonu, gdyż po rozbiórce obiektu wzrasta wielkość powierzchni eksponowanej na działanie powietrza. Brak jednolitego podejścia przy określaniu śladu węglowego jest powodem rozbieżności uzyskiwanych wyników. Dowodzi tego tabela 3, przedstawiająca zmiany wielkości emisji CO_2 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 CO_2/m^3 (tabela 3, poz. 1), natomiast zdaniem Wcisło i Kuniczuka [8] beton o wytrzymałości niższej jedynie o 5 MPa i zawierający popiół lotny (tabela 3, poz. 9) emituje o 54 kg CO_2/m^3 więcej. Nie uwzględnili oni jednak emisji związanej z magazynowaniem składników betonu, transportem paliwa oraz eksploatacją 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 małej ilości (max do 5% masy cementu) i ich wpływ na środowisko można oszacować na 220 kg CO_2/t [11]. Autorzy przeanalizowanych publikacji nie brali pod uwagę zmian CO_2 zachodzących w procesie karbonatyzacji i „drugim życiu betonu".

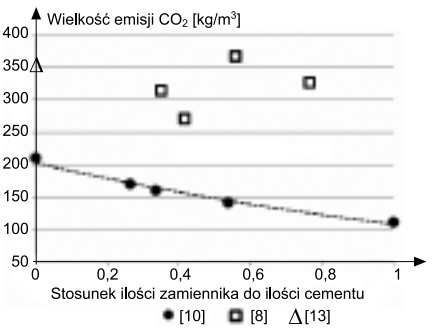
Kruszywo (drobne i grube), popiół lotny, czy woda mogą stanowić do 90% masy mieszanki betonowej. Wydobycie i rozdrobnienie materiałów kamiennych, mieszanie składników, transport materiałów lub mieszanki na budowę wymagają małych ilości energii i emitują relatywnie małą ilość CO_2 – odpowiednio 5,4; 1,5; 0,9 kg CO_2/t [11]. Czynnikiem determinują-

Tabela 3. Emisja CO_2 w zależności od uwzględnionych źródeł emisji

Lp.	f_{cm} [MPa]	Skład spoiwa [m^3] [literatura]	Źródła emisji CO_2																			łączna emisja CO_2 [kg/m^3]
			cement			kruszywo			woda	dodatki		domieszki		paliwa		eksploatacja betoniarni	beton			karbonatyzacja	„drugie życie betonu"	
			produkcja	transport	magazynowanie i podawanie	produkcja	transport	magazynowanie i podawanie	transport	popiół lotny	zużel wielkopiecowy	produkcja	transport	produkcja	transport		przygotowanie mieszanki	transport na budowę	układanie i wykańczanie			
										transport	transport											
1	35	Cement – 335 kg [10]																				313
2	25	Cement – 279 kg [10]																				262
3	20	Cement – 223 kg [10]																				211
4	20	Cement – 179 kg, popiół lotny – 44 kg [10]																				171
5	20	Cement – 167 kg, popiół lotny – 56 kg [10]																				161
6	20	Cement – 145 kg, żużel – 78 kg [10]																				142
7	20	Cement – 112 kg, żużel – 112 kg [10]																				112
8	25	Cement – 300 kg, popiół – 230 kg [8]																				327
9	30	Cement – 340 kg, popiół – 190 kg [8]																				367
10	25	Cement – 240 kg, popiół – 100 kg [8]																				271
11	30	Cement – 285 kg, popiół – 100 kg [8]																				315
12	40	Cement – 328 kg [13]																				354

uwzględniono źródła emisji CO_2 ☐ nie uwzględniono źródła emisji CO_2

cym stopień oddziaływania betonu na środowisko jest udział cementu w mieszance betonowej. Produkcja klinkieru portlandzkiego jest procesem wysokoemisyjnym – 700 kg CO_2/t cementu [12], wymaga dużej ilości energii do kalcynacji węglanu wapnia zachodzącej w temperaturze dochodzącej do 1500 °C, a produktem ubocznym wypalania obok tlenku wapnia jest CO_2. Redukcja ilości cementu w mieszance betonowej powoduje prawie liniowy spadek ilości CO_2 oddawanego do atmosfery przez beton (rysunek 2). W roli substytutów cemen-



Rys. 2. Zależność emisji CO_2 od stosunku ilości zamiennika (popiół lotny, żużel wielkopiecowy) do ilości cementu

tu stosowane są np.: popiół lotny, żużel wielkopiecowy, mikrokrzemionka. Są to materiały odpadowe powstające w procesie spalania węgla kamiennego w elektrowni, wytapiania rudy żelaza, czy produkcji krzemu i żelazokrzemu, zatem źródłem emisji w tym przypadku jest jedynie ich transport do betonowni. Coraz powszechniej stosowanym sposobem otrzymywania bardziej korzystnego ekwiwalentu CO_2 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 na bazie geopolimerów (zastosowanie ich w produkcji betonu wg Turnera pozwoli na co najmniej 10% redukcję emisji CO_2 [13]), wychwytywanie CO_2 ze spalania paliw [14] i dekompozycji węglanu wapnia w cementowniach [15], czy sekwestrację CO_2 w prefabrykatach betonowych [16] itd.

Podsumowanie

Podejście do określania śladu węglowego betonu powinno stać się bardziej kompleksowe i uwzględniać „główne życie" (pozyskiwanie surowców, ich transport, produkcję materiału, transport na plac budowy, układanie itp.), „drugie życie" (rozbiórka i ewentualny recykling), a także sekwestracje CO_2 w procesie karbonatyzacji. Dokładne zdefiniowanie warunków obliczania śladu węglowego jest konieczne w celu umożliwienia obliczania i porównania śladów węglowych różnych betonów na drodze poszukiwań jak największej redukcji CO_2 w przemyśle betonowym. Pomocne może być to również w opracowywanych coraz powszechniej kalkulatorach emisji CO_2.

Artykuł przygotowano w ramach realizacji Pracy Statutowej nr 504P 1088 1307 i został wygłoszony na konferencji naukowo-technicznej PZITB „Ekologia a Budownictwo 2013".

Literatura

[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., Lazić L., Crnko J.: CO_2 emissions in the steel industry, Metalurgia 48, 2009, s. 193 – 197.

[6] Wasilewski M.: Wprowadzenie do zagadnienia metodyki wyliczania carbon footprint, Podsumowanie seminarium Ministerstwa Gospodarki i CSRinfo, 2009.

[7] www.cement.org/basics/concretebasics_lessonone.asp.

[8] Wcisło A., Kuniczuk K.: Eco-SCC, Green-SCC – ekonomiczna i ekologiczna alternatywa dla betonów samozagęszczalnych, Dni Betonu, Wisła, październik 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] Cement and Concrete Institute, Concrete Industry, Greenhouse Gas Emissions, In-Energy, 2010.

[12] Uliasz-Bocheńczyk A., Mokrzycki E.: Emisja dwutlenku węgla w przemyśle cementowym, Polityka Energetyczna t. 6, 2003, s. 367 – 375.

[13] Turner L. K., Collins F. C.: Carbon dioxide equivalent (CO_2-e) emissions: A comparison between geopolymer and OPC cement concrete, Construction and Building Materials 43, 2013, s. 125 – 130.

[14] Baker D. J. Turner S. A., Napier-Moore P. A., Clark M., Davison J. E.: CO_2 capture in the cement industry, Energy Procedia 1, 2009, s. 87 – 94.

[15] Rodriguez N., Alonso M., Grasa G., Abanades J. C.: Process for capturing CO_2 arising from the calcination of the $CaCO_3$ used in cement manufacture, Environmental Science and Technology 42, 2008, s. 6980 – 6984.

[16] Hamilton T. A.: Concrete fix to global warming – A new process stores carbon dioxide in precast concrete. Technology review – a publication of MIT, 2008.

Streszczenie

W artykule przeanalizowano różne podejścia do obliczania śladu węglowego betonu rozumianego jako *całkowita ilość CO_2 i innych gazów cieplarnianych emitowana w trakcie całego cyklu życia procesów i produktów*. Wykazano, iż w zależności od przyjętego stopnia szczegółowości obliczeń, wartość emisji CO_2 może się znacznie różnić. Ponadto zwrócono szczególną uwagę na możliwości obniżenia śladu węglowego betonu w wyniku redukcji zawartości cementu, poprzez jego substytucję dodatkami mineralnymi. Przeanalizowano również wpływ innych czynników, takich jak rodzaj stosowanego kruszywa, warunki transportu i wbudowania, czy też możliwości sekwestracyjne betonu w czasie jego *życia pierwotnego i wtórnego*.

Słowa kluczowe: ślad węglowy betonu, emisja CO_2, sekwestracja CO_2.

Abstract

Different approaches of carbon footprint of concrete estimation were investigated. It was shown that value of CO_2 emissions varies depending on accepted specificity of calculations. Special attention was focused on possibilities of production of concrete with decreased „carbon footprint". Reduction of cement content by mineral additives replacement in concrete mixture as well as influence of aggregate type used, conditions of concrete transport and built in and CO_2 sequestration via carbonation process during „primary and second life" of concrete were also taken into consideration.

Keywords: concrete carbon footprint, CO_2 emission, CO_2 sequestration.