

Barbara ZAJĄC, Irena GOŁĘBIEWSKA

e-mail: zajacbar@poczta.onet.pl

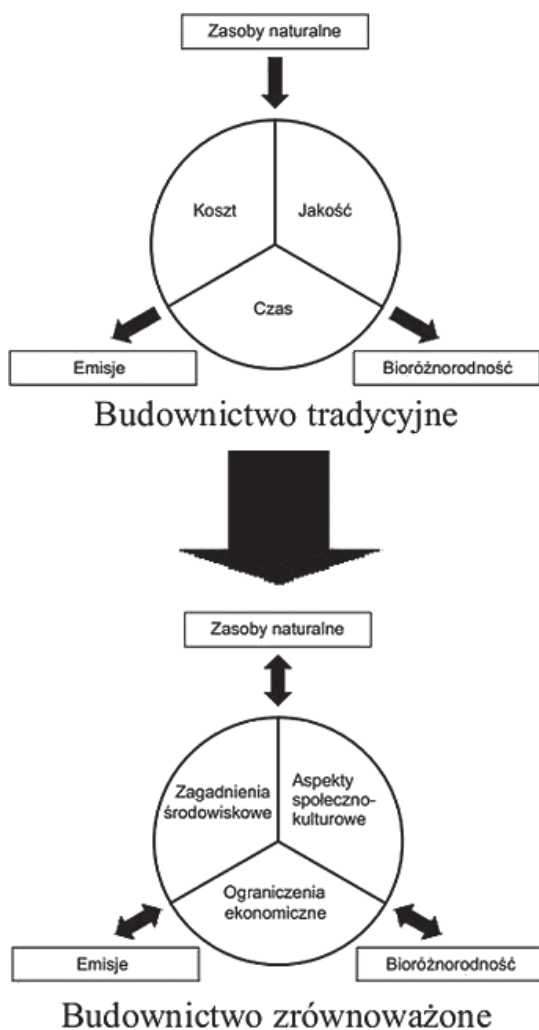
Katedra Konstrukcji Budowlanych, Wydział Budownictwa i Inżynierii Środowiska, Uniwersytet Technologiczno-Przyrodniczy, Bydgoszcz

## Ocena cyklu życia konstrukcji betonowej

### Wprowadzenie

Budownictwo jest jednym z głównych eksploatorów środowiska naturalnego. Ważne jest więc zachowanie równowagi w przyrodzie między zużyciem zasobów naturalnych a ich odnawialnością. Dynamicznie rozwijający się przemysł budowlany ma i będzie miał znaczny wpływ na przyszłe pokolenia ze względu na duże zużycie surowców naturalnych i energii. Dlatego też budownictwo musi być traktowane jako jeden z elementów rozwoju zrównoważonego, którego główną ideą jest całościowe zaspakajanie potrzeb oraz aspiracji rozwojowych obecnych pokoleń w sposób umożliwiający realizację tych samych dążeń następnym pokoleniom [Kawai i in., 2005; Zajac i Gołębiowska, 2010; Zajac i Gołębiowska, 2011].

Budownictwo tradycyjne jest nierozdzielnie związane z trzema czynnikami: jakością, kosztami i czasem. Natomiast budownictwo zrównoważone szczególną uwagę przywiązuje do istnienia współzależności: aspektów społeczno-kulturowych, ograniczeń ekonomicznych i zagadnień środowiskowych (Rys.1) [Environmental design, 2004]. Te trzy czynniki powinny być uwzględniane w projektowaniu, budowie, eksploatacji oraz na pozostałych etapach cyklu życia konstrukcji.



Rys. 1. Przejście od budownictwa tradycyjnego do zrównoważonego

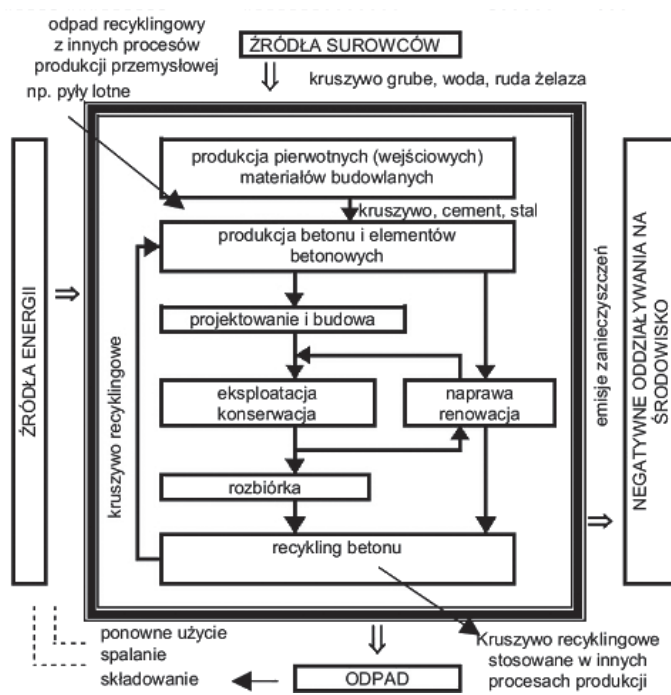
Konstrukcje betonowe powinny być zaprojektowane w taki sposób, aby spełniały wymagania dotyczące: niezawodności, trwałości, bezpieczeństwa i oddziaływania na środowisko w całym ich cyklu życia. Wymagania dotyczące oddziaływania konstrukcji na środowisko, prowadzą się najczęściej do wyboru: rodzaju materiałów, metod realizacji budowy, procedur konserwacji, procedur recyklingu, ilości zużywanego energii, granic emisji CO<sub>2</sub>, granic zanieczyszczenia wody i gruntu, granic zapylenia, ilości substancji chemicznych, poziomu drgań i hałasu, itp.

W projektowaniu budowli, według zasad rozwoju zrównoważonego, można stosować metodę oceny cyklu życia budowli LCA (Life Cycle Assessment) [PN-EN ISO, 2006, 2009a, 2009b]. Celem jej jest ocena potencjalnych zagrożeń środowiska przy stosowaniu danego produktu. LCA jest procesem oceny wpływu danego wyrobu na środowisko podczas całego cyklu życia tj. od pozyskania surowców, poprzez produkcję, użytkowanie aż do jego likwidacji.

W pracy przedstawiono opis oceny cyklu życia konstrukcji betonowej w kontekście jej podstawowych funkcji.

### Ocena cyklu życia konstrukcji betonowej

Ocena cyklu życia produktu, którym w rozważanym przypadku jest konstrukcja betonowa, dotyczy całego cyklu życia konstrukcji od wydobycia surowców i produkcji materiałów oraz elementów poprzez projektowanie, budowę, użytkowanie, rozbiórkę, recykling lub ponowne użycie aż do pozbycia się odpadów. Rys. 2 przedstawia charakterystykę cyklu życia konstrukcji betonowej z typowymi materiałami i przepływem energii oraz wynikłymi oddziaływaniami na środowisko [Environmental design, 2004].



Rys. 2. Charakterystyka cyklu życia konstrukcji betonowej

Metodologia LCA, zdefiniowana w normach [PN-EN ISO, 2006, 2009a, 2009b] jest iteracyjną metodą oceny. Składa się ona z czterech

faz: określenia celu i zakresu, analizy zbioru wejść i wyjść, oceny wpływu, interpretacji wyników.

**Określenie celu i zakresu.** Cel i zakres badań LCA musi być jasno zdefiniowany. Zakres badań musi odpowiadać przyjętemu aspektowi oraz kryteriom i powinien być tak sformułowany, aby zapewnić, że przyjęty model oceny i zestaw ocenianych danych są wiarygodne i wystarczające do realizacji postawionego celu. Najczęściej, jako kryterium oceny oddziaływania na środowisko przyjmowana jest emisja dwutlenku węgla (CO<sub>2</sub>), tlenków azotu (NO<sub>x</sub>), i tlenków siarki (SO<sub>x</sub>) [Environmental design, 2004].

**Analiza zbioru wejść i wyjść.** Proces oceny oddziaływania konstrukcji betonowej na środowisko wymaga wprowadzenia danych związanych z materiałami budowlanymi i procesami wchodzącymi w skład realizacji budowy. Zestawy danych charakteryzują zniszczenie środowiska na początku i na końcu życia konstrukcji. Dane wejściowe, opisują zniszczenie środowiska związane z pobraniem energii, surowców, itd. Natomiast dane wyjściowe charakteryzują zniszczenie środowiska np. w postaci zrzutu szkodliwych substancji do wody, atmosfery lub gruntu.

**Ocena wpływu.** Do oceny wpływu konstrukcji na środowisko stosuje się kategorie oddziaływania i kategorie wskaźników powiązanych z wynikami analizy zbioru wejść i wyjść. Kategoriami oddziaływania są: globalne ocieplenie, wyczerpywanie ozonu, zakwaszenie, wyczerpywanie zasobów naturalnych, pozbywanie się odpadów, zanieczyszczenie powietrza wewnątrz i na zewnątrz konstrukcji, toksyczność. Biorąc pod uwagę cały cykl życia konstrukcji betonowej, oddziaływanie środowiskowe przy przyjętym kryterium może być wyrażone jako [Environmental design, 2004.]:

$$E_C = \sum_{i=1}^7 E_i \quad (1)$$

gdzie:

$E_i$  –  $i$ -ta składowa oddziaływania oznaczająca wpływ środowiskowy, odpowiednio:  $E_1$  – oddziaływanie początkowe,  $E_2$  – użytkowanie,  $E_3$  – konserwacja,  $E_4$  – naprawa,  $E_5$  – renowacja,  $E_6$  – rozbiórka,  $E_7$  – recykling.

Ponadto, oddziaływanie początkowe można przedstawić w następującej postaci:  $E_1 = E_{pmp} + E_{pk} + E_{pr}$ ,  
gdzie:

$E_{pmp}$  – wpływ środowiskowy związany z produkcją materiałów pierwotnych,  $E_{pk}$  – wpływ środowiskowy związany z produkcją betonu i elementów betonowych,  $E_{pr}$  – wpływ środowiskowy związany z projektowaniem i budową obiektu.

Składowe oddziaływania środowiskowe odnoszone do poszczególnych etapów cyklu życia, muszą być powiązane ze zniszczeniem środowiska, odpowiadającym istotnym kryteriom środowiskowym:

$$E_i = \sum_{j=1}^{7m} w_j Q_j \quad (2)$$

gdzie:

$w_j$  –  $j$ -ty wektor wag reprezentujący ważność kryteriów indywidualnych,

$m$  – liczba istotnych kryteriów środowiskowych,

$Q_j$  –  $j$ -ty wektor wartości kryteriów środowiskowych.

Rozważając przyjęte kryteria środowiskowe, oddziaływanie środowiskowe w każdej fazie cyklu życia można zapisać następująco:

$$E_i = w_1 Q_{CO_2} + w_2 Q_{SO_2} + \dots + w_m Q_m \quad (3)$$

gdzie:  $Q_{CO_2}$ ,  $Q_{SO_2}$  i  $Q_m$  są wartościami całkowitymi oznaczającymi emisję CO<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub> oraz innych substancji szkodliwych, odpowiednio.

Ocena rzeczywistego wpływu konstrukcji betonowych na środowisko powinna bazować na dokładnej analizie LCA przy zastosowaniu zbioru danych z uwzględnieniem warunków lokalnych.

Popularnym kryterium środowiskowym do oceny oddziaływania (LCA) konstrukcji betonowej na środowisko jest emisja CO<sub>2</sub>. Beton jest najpowszechniej stosowanym materiałem budowlanym na świecie

a mimo tego, w porównaniu z innymi materiałami budowlanymi, jego szkodliwy wpływ na środowisko jest stosunkowo mały. Każdy kilogram cementu wytworzony do produkcji betonu związany jest z emisją do atmosfery 0,87 kg CO<sub>2</sub> co powoduje, że przemysł cementowy emituje do atmosfery ok. 7.7% całkowitej emisji CO<sub>2</sub> spowodowanej wszystkimi gałęziami światowej produkcji przemysłowej [Environmental design, 2008.]. Zużycie cementu do produkcji betonu można ograniczyć przez zastosowanie zamiennych materiałów odpadowych w postaci popiołów lotnych, mielonych żużli, mikrokrzemionki, itd.

**Interpretacja wyników.** Polega ona na analizie i ocenie oddziaływania środowiskowego, powiązanej ze zdefiniowanym celem i zakresem LCA oraz na opracowaniu zrozumiałej, kompletnej i spójnej prezentacji wyników. Interpretacja wyników powinna zawierać również ocenę kompletności i spójności otrzymanych wyników oraz wnioski i zalecenia.

Do oceny środowiskowej cyklu życia produktu opracowano wiele programów komputerowych [Environmental design, 2004.; Environmental design, 2008]. Są to m.in.: *Sima Pro LCA*, *BEES*, *GEMIS*. Program *Sima Pro LCA* służy do zbierania, analizy i monitorowania informacji o produkcji i obsłudze. Zawiera on bazę danych wejściowych i wyjściowych dla powszechnie stosowanych materiałów i procesów. Program *BEES* (*Building for Environmental and Economic Sustainability*) jest oparty na analizie porównawczej alternatywnych produktów budowlanych i stosowaniu modelu przepływu wybranych danych wejściowych i wyjściowych w celu oceny oddziaływania środowiskowego budowlanej na poszczególnych etapach cyklu życia. Do pomiaru kombinacji oddziaływań środowiskowych stosowane jest podejście polegające na ustalaniu wag. Program *GEMIS* służy do oceny porównawczej negatywnych oddziaływań środowiskowych oraz do analizy kosztów.

## Podstawowe funkcje elementów konstrukcji budowlanej

W technice projektowania cyklu życia konstrukcji brana jest pod uwagę wartość zasobów naturalnych w stosowanych materiałach oraz system produkcji odwrotnej (rozbiórka), który powinien następować po długim życiu konstrukcji z zachowaniem jej składowych materiałów. Dlatego też, ważne jest wyjaśnienie istotnych funkcji elementów konstrukcji obiektu budowlanego [Tomosawa i in., 2005].

W tab. 1 przedstawiono związek między elementami konstrukcji ramowej budynku i podstawowymi funkcjami tych elementów oraz projektowanymi czynnikami. Projektowane czynniki – redukcja zużycia materiałów wejściowych i energii, konserwacja, ponowne użycie materiałów lub elementów tam gdzie jest to możliwe oraz recykling (odzyskiwanie materiałów lub surowców po przetworzeniu materiału rozbiórkowego) – mogą zwiększyć trwałość konstrukcji betonowych i przyczynić się do zmniejszenia negatywnego oddziaływania konstrukcji na środowisko [Tomosawa i in., 2005].

Rys. 3 pokazuje porządek zależności w cyklu życia składającego się z oddzielnie projektowanych czynników. Górny trójkąt przedstawia kolejność realizacji procesu budowlanego, odpowiednio: surowce, materiały, poszczególne elementy i budynek. Rys. 3 jest graficzną interpretacją tab. 1.

Podstawowe elementy konstrukcji budynku mogą być zdeterminowane przez 8 funkcji konstrukcji i 4 projektowane czynniki od A do D.

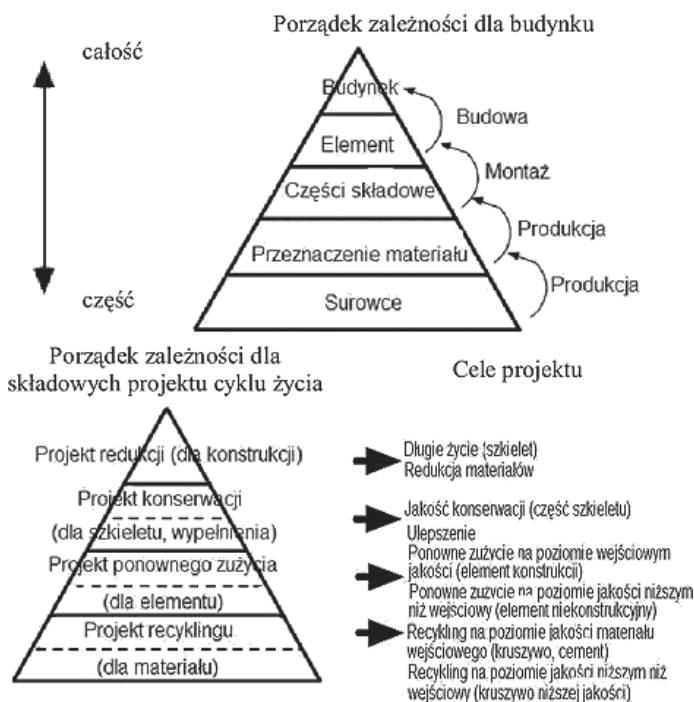
Redukcja (A) zużycia materiałów przy budowie konstrukcji ramowej polega na zapewnieniu ramie długiego życia, czyli odpowiedniej trwałości (1). Konstrukcja powinna być odporna na kataklizmy przy racjonalnej gospodarce zasobami naturalnymi (2).

Konserwacja (B) ramy i elementów konstrukcji polega na utrzymaniu ich na żądanym poziomie jakości technicznej (3) oraz na ich ulepszeniu (4).

Ponowne użycie elementów i betonu (C) polega odpowiednio, na ponownym wykorzystaniu zużytych elementów na takim samym poziomie jakościowym jak dotychczas (5) oraz na ponownym wykorzystaniu

Tab. 1. Istotne funkcje elementów budynku oraz powiązane z nimi czynniki projektowane

Elementy budynku	Podstawowe funkcje elementów budynku		Czynniki projektowane
Konstrukcja ramowa	Długość życia, trwałość i odporność na trzęsienia ziemi	(1) Długie życie	Redukcja A
	Stosowanie optymalnej ilości surowców naturalnych w konstrukcji	(2) Zachowanie zasobów naturalnych	
Konstrukcja ramowa, belki, słupy	Utrzymanie odpowiedniego poziomu jakości pod kątem wymaganych warunków eksploatacji	(3) Jakość utrzymania	Konserwacja B
	Łatwa zmiana na wyższy poziom jakości przy wymianie	(4) Ulepszenie	
Belki, słupy i beton	Ponowne użycie elementów bez obniżenia ich jakości	(5) Ponowne użycie na wejściowym poziomie jakości	Ponowne użycie C
	Ponowne użycie elementów o obniżonej jakości	(6) Ponowne użycie na poziomie jakości niższym od wejściowego	
Beton i materiały składowe	Użycie materiału recyklingowego bez obniżenia jakości	(7) Równoważny poziom jakości materiału w stosunku do jakości wejściowej	Recykling D
	Użycie materiału recyklingowego o obniżonej jakości w stosunku do jakości wejściowej	(8) Niższy poziom jakości materiału w stosunku do jakości wejściowej	



Rys. 3. Porządek zależności w projektowanym cyklu życia budynku

zużytych materiałów ale na niższym niż dotychczas poziomie jakości (6).

Recykling (D) betonu i materiałów składowych polega, na ponownym ich użyciu po ich przetworzeniu przy zachowaniu jakości odpowiadającej jakości wejściowej (7) oraz ponownym użyciu przetworzonych materiałów i betonu, których jakość będzie niższa od wejściowej (8).

Przykładowo, jeżeli budynek jest realizowany na podstawie projektowania jakości na poziomie wejściowym D7 – to wówczas są wybierane materiały recyklingowe bez obniżonej jakości oraz są wybierane stosowne metody rozbiórki i składowania o niskim nakładzie pracy. Stosowanie materiałów recyklingowych (np. kruszyw recyklingowych) pozwala na zmniejszenie zużycia zasobów naturalnych a więc na ograniczenie negatywnego oddziaływania konstrukcji betonowej na środowisko.

Poziom jakości wykonania konstrukcji betonowej na danym etapie cyklu życia jest określony poprzez początkową jakość konstrukcji. Wyższy wkład początkowy w celu osiągnięcia wyższej jakości, powinien skutkować niższymi kosztami użytkowania i niższymi ogólnymi kosztami środowiskowymi i ekonomicznymi na końcu cyklu jej życia.

### Wnioski

- Redukcja zużycia materiałów budowlanych, której celem jest ograniczenie konsumpcji źródeł energii i surowców nieodnawialnych, przy wzrastającym udziale użycia materiałów recyklingowych jest jednym z podstawowych założeń projektowania konstrukcji, uwzględniających wymagania budownictwa zrównoważonego.
- Zastosowanie materiałów odpadowych do produkcji cementu i kruszyw recyklingowych pozwala na znaczną redukcję zużycia zasobów naturalnych a tym samym na ograniczenie negatywnego oddziaływania konstrukcji betonowych na środowisko.
- Projektowanie cyklu życia konstrukcji betonowej z uwzględnieniem recyklingu (np. kruszywa) polega na założeniu:
  - Zachowania zasobów naturalnych i przedłużenia życia konstrukcji, poprzez stosowanie bez ograniczeń materiałów recyklingowych o właściwościach wejściowych o nie obniżonej jakości. Kruszywo wysokiej jakości może być stosowane do produkcji betonu konstrukcyjnego.
  - Zachowania zasobów naturalnych z ograniczeniami dotyczącymi stosowania materiałów recyklingowych. Spowodowane jest niską jakością kruszywa recyklingowego otrzymywanego z recyklingu rozbranych konstrukcji betonowych. Kruszywo to jest stosowane do produkcji betonu niekonstrukcyjnego i jako materiał na podbudowę dróg.
- Ocena wpływu na środowisko konstrukcji betonowej w całym jej cyklu życia może być przeprowadzona przy użyciu metodologii LCA opisanej szczegółowo w normie PN-EN ISO 14040/2009. Analiza LCA może być źródłem dla optymalizacji projektu środowiskowego konstrukcji i innych procesów decyzyjno-wykonawczych.

### LITERATURA

Environmental design – State of art report. *FIB Bulletin* 28 CEB/2004. 41p.

Environmental design of concrete structures – General principles. Technical Report. *FIB Bulletin* 47 CEB/2008. 74p.

Kawai K., Sugimaya T., Kabayashi K., Sano S.. 2005: A proposal of concrete structure design methods considering environmental performance. *J. Adv. Tech.* 3, nr 1, 41-51. DOI: 10.3151/jact.3.41

PN-EN ISO 14047/2006 – Zarządzanie środowiskowe – Ocena wpływu cyklu życia – Przykłady stosowania ISO 14042

PN-EN ISO 14040/2009 – Zarządzanie środowiskowe – Ocena cyklu życia – Zasady i struktura

PN-EN ISO 14044/2009 – Zarządzanie środowiskowe – Ocena cyklu życia – Wymagania i wytyczne

Tomosawa F., Naguchi T., Tamura M., 2005. The Way Concrete Recycling Should Be. *J. Adv. Tech.* 3, nr1, 3-16. DOI: 10.3151/jact.3.3

Zajac B., Gołębiowska I., 2010. Nowoczesne metody recyklingu betonu. *Inż. Ap. Chem.* 49, nr 5, 136-137

Zajac B., Gołębiowska I., 2011. Projektowanie konstrukcji betonowych z uwzględnieniem ich oddziaływania na środowisko. *Ekologia i Technika*, nr 6, 348-355