

prof. dr inż. Andrzej Ajdukiewicz*

„Zielony beton” w konstrukcjach – aspekty projektowe i przykłady

Green Concrete Structures – design aspects and examples

Umowny termin „zielony beton” oznacza nie tylko materiał i jego składniki, ale beton odpowiednio zastosowany w konstrukcji, czyli tak, aby jego wpływ na środowisko podczas pełnego cyklu życia konstrukcji, włączając w to okres powstania, użytkowania i rozbiórkę, był zminimalizowany. To narzuca świadome współdziałanie wszystkich uczestników procesu powstawania konstrukcji, jeszcze bardziej skoordynowane niż w dotychczasowych sytuacjach, gdy celem były przede wszystkim funkcjonalność i ekonomia, a czasem estetyka. Schemat współdziałania poprzedzający użytkowanie pozostaje w zasadzie tradycyjny (rysunek 1), ale współcześnie wszystkie „tryby” w tym schemacie muszą być zorientowane także na problemy środowiskowe. Wskazania dotyczące rozważania kwestii środowiskowych w przypadku konstrukcji betonowych są sukcesywnie uściślane w dokumentach międzynarodowych, np. [1], [2]. Niektóre z nich przedstawiono w artykule.



Rys. 1. Ilustracja niezbędnego współdziałania przy powstawaniu obiektu budowlanego

Wybór kryteriów funkcjonalnych

Kryteria funkcjonalne wyrobu lub całej konstrukcji wynikają z ich roli i wymagań związanych z obiektem. Racjonalny wybór tych kryteriów ma zasadnicze znaczenie przy minimalizacji wpływu na śro-

dowisko naturalne. W przypadku budynku są to przede wszystkim wymagania wymiarowe, zakładana trwałość (w latach), procesy utrzymania, walory estetyczne, możliwości modernizacji itp.

W doborze kryteriów pomocne są zalecenia, a nawet normy, dotyczące pewnej klasy obiektów. Przykładem może być norma amerykańska [3] dotycząca wymagań inżynierii środowiskowej wobec dużych obiektów z betonu, przede wszystkim hydrotechnicznych, takich jak zapory, jazy, kanały, a także zbiorniki, osadniki itp.

Przykłady kompleksowego bilansu środowiskowego

Analiza oddziaływania konstrukcji na środowisko jest bardzo trudna, nawet wtedy, gdy beton jest materiałem dominującym w danej konstrukcji. **Zużycie energii i emisja CO₂ stanowią główne parametry kompleksowego bilansu środowiskowego w całym okresie istnienia konstrukcji**, zwanego w dokumentach międzynarodowych LCI (*life-cycle inventory*). W bilansie tym należy wykorzystywać informacje dostarczane przez wytwórców materiałów oraz dostawców mediów i ma on stanowić część deklaracji środowiskowej (*EPD – Environmental Product Declaration*) będącej niedługo niezbędnym elementem dokumentacji projektowej [4]. Zebranie wszystkich danych do takiego bilansu jest trudne,

zwłaszcza że w rzeczywistym obiekcie mamy do czynienia z kombinacją wielu materiałów budowlanych, które wzajemnie wpływają na elementy bilansu. Przygotowuje się więc wycinkowe przykłady bilansu zużycia energii lub emisji CO₂ poszczególnych fragmentów konstrukcji, biorąc pod uwagę dane z różnych źródeł. Ilustracją bilansu emisji CO₂ wg danych zestawionych w [1] jest tabela 1, dotycząca słabo zbrojonej konstrukcji żelbetowej, np. płyty żelbetowej na gruncie. Przykładowe dane materiałowe powinny pochodzić od producenta betonu towarowego i dostawcy stali, a dane transportowe wg oszacowania odległości i przewoźników.

W praktyce tak proste przykłady dotyczą niewielu sytuacji. Najczęściej trzeba rozważać wielomateriałowe elementy konstrukcji i przeprowadzać wariantowe porównania, obejmujące rozwiązania konstrukcyjne, izolacyjne, ekonomiczne i wreszcie ekologiczne. Bilans emisji CO₂ w przypadku dwóch różnych rozwiązań warstwowej ściany zewnętrznej budynku przedstawiają tabele 2 i 3. Wykorzystano w nich dane skandynawskie i brytyjskie zebrane w [1]. W pierwszym przypadku (tabela 2) chodzi o ścianę typu ciężkiego o układzie warstw: elewacyjna warstwa murowana z cegły na zaprawie (11 cm); izolacyjna warstwa wełny mineralnej (15 cm) i warstwa nośna w postaci prefabrykowanych płyt (12 cm). W drugim przy-

Tabela 1. Bilans emisji CO₂ w przypadku 1 m³ materiałów do realizacji słabo zbrojonej konstrukcji żelbetowej wg [1]

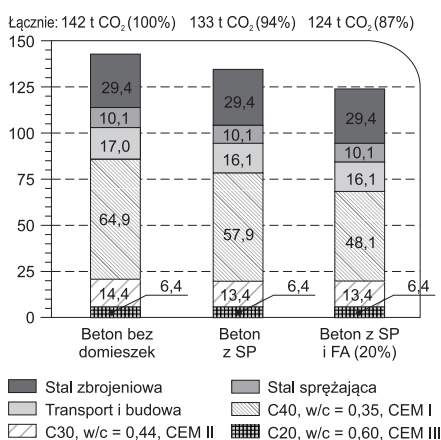
Składniki konstrukcji	Wytworzenie – wskaźniki			Transport na budowę – wskaźniki		
	A	B	A · B	C	D	A · C · D
	emisja CO ₂ kg/m ³	kg/kg	kg/m ³	dystans km	emisja CO ₂ kg/kg-km	emisja CO ₂ kg/m ³
Cement PC	300	0,8 – 0,9	240 – 270	100	0,1 · 10 ⁻³	3
Dodatek FA	30	–	–	100	0,1 · 10 ⁻³	0,3
Piasek	660	0,003	2,0	20	0,1 · 10 ⁻³	1,3
Żwir	1170	0,003	3,5	20	0,1 · 10 ⁻³	2,3
Woda	145	–	–	–	–	–
Stal	30	1,0	30	500	0,1 · 10 ⁻³	1,5
Beton	2400	0,04	96	30	0,1 · 10 ⁻³	7,2
Razem = 372-402				Razem = 16		
				Łącznie = 388-418		

* Politechnika Śląska

padku (tabela 3) rozwiązanie alternatywne ściany o szkieletie stalowym, z warstwami: elewacyjna warstwa murowana z cegły na zaprawie (11 cm); szczelina powietrzna (3 cm); dwie płyty gipsowe (2 x 13 mm) na szkieletie stalowym z warstwą izolacyjną z wełny mineralnej (15 cm).

Podane bilanse emisji CO₂ obejmują realizację określonego fragmentu budynku i nie uwzględniają etapu użytkowania, rozbiórki i recyklingu. Wprawdzie izolacyjność termiczna ścian jest w przybliżeniu taka sama, ale dwa inne aspekty środowiskowe nie są tak podobne; chodzi o pojemność termiczną ścian i o tłumienie dźwięków. Obydwa te kryteria są korzystniejsze w przypadku ściany cięższej, natomiast bilans emisji CO₂ przemawia zdecydowanie za ścianą lżejszą.

W przypadku konstrukcji jednorodnych, zwłaszcza obiektów inżynierskich wykonywanych w całości z betonu, podawane są wyniki porównań dotyczących wpływu na środowisko. Na podstawie danych japońskich [5], na rysunku 2 porównano emisję CO₂ tej samej konstrukcji mostowej zaprojektowanej z różnych mieszanek betonowych – bez domieszek, z domieszkami upłynniającymi (SP) oraz z domieszkami



Rys. 2. Porównanie emisji CO₂ w przypadku mostu betonowego z różnym udziałem domieszek w mieszance betonowej

i w przypadku zastąpienia 20% cementu portlandzkiego (CEM I) popiołami lotnymi (FA).

Wskaźniki środowiskowe w przypadku materiałów konstrukcyjnych

Beton i stal w różnych rodzajach konstrukcji betonowych i żelbetonowych różnią się wytrzymałością, trwałością, odpornością na korozję, izolacyjnością, a także

wpływem na środowisko. Podstawowe wskaźniki środowiskowe materiałów konstrukcyjnych określone są masą emisji CO₂ na jednostkę masy materiału [kg/kg] lub na jednostkę objętości [kg/m³]. Ponadto stosuje się wskaźnik „wytrzymałościowej efektywności środowiskowej”, czyli stosunek wytrzymałości do gęstości materiału pomnożonej przez masę emitowanego CO₂ przy jego uzyskaniu. W przypadku materiałów kruchych (betony) bierze się pod uwagę wytrzymałość na ściskanie, a w przypadku materiałów ciągliwych (stal) – wytrzymałość na rozciąganie (tabela 4). Umowny wskaźnik wytrzymałościowej efektywności środowiskowej pozwala na porównanie, jakim kosztem emisji CO₂ uzyskuje się jednostkę wytrzymałości. Wiadoczną jest przewaga tego wskaźnika dla zwykłego betonu w stosunku do stali.

Wskaźniki środowiskowe odniesione do cech termicznych

Kwestie termiczne w budynkach dotyczą etapu użytkowania i sprowadzają się do dwóch głównych zagadnień:

- **izolacyjności termicznej**, która wpływa na zużycie energii, a więc pośrednio i emisję CO₂; w klimacie umiarkowanym chodzi o ogrzewanie w porze zimowej i wentylację/klimatyzację w porze letniej;
- **pojemności cieplnej**, czyli wolnego nagrzewania się i zdolności czasowego magazynowania ciepła, oddawanego z przesunięciem czasowym; ta kwestia dotyczy zmian dobowych i dotychczas w projektowaniu obiektów.

Izolacyjność obiektów jest związana zarówno z rodzajem materiałów, jak i z ich układem w przegrodach poziomych lub pionowych. W projektowaniu uwzględnia się praktycznie tylko współczynnik przewodnictwa cieplnego materiałów, natomiast nie bierze się pod uwagę kwestii środowiskowych związanych z ich uzyskaniem. W najprostszym przypadku przegrody o grubości t z jednego materiału, którego przewodnictwo cieplne wynosi λ , opór cieplny na jednostkę powierzchni przegrody to $R = t/\lambda$. Wartość λ jest powiązana z gęstością materiału. Na rysunku 3 podano przykładowy wykres tej relacji w przypadku popularnych materiałów termoizolacyjnych i betonów stosowanych w konstrukcjach. Ten sam opór cieplny można więc uzyskać za pomocą przegrody różnej grubości z różnych materiałów, dla których wskaź-

Tabela 2. Bilans emisji CO₂ w przypadku 1 m² warstwowej ściany zewnętrznej z żelbetową warstwą nośną

Elementy ściany	Wytworzenie – wskaźniki			Transport na budowę – wskaźniki		
	A	B	A · B	C	D	A·C·D
	emisja CO ₂		emisja CO ₂	dystans	emisja CO ₂	emisja CO ₂
	kg/m ²	kg/kg	kg/m ²	km	kg/kg·km	kg/m ²
Mur z cegły	130	0,25	33	100	0,10·10 ⁻³	1,3
Zaprawa	85	0,13	11	20	0,15·10 ⁻³	0,3
Wełna mineralna	5	1,0	5	100	0,10·10 ⁻³	0,1
Prefabrykaty żelbetowe*	290	0,20	58	–	–	–
	510	Razem = 107		–	Razem = ~2	
				Łącznie = 109		

* transport specjalny wliczony przez producenta w wytwarzanie

Tabela 3. Bilans emisji CO₂ w przypadku 1 m² ściany zewnętrznej ze szkieletem stalowym

Elementy ściany	Wytworzenie – wskaźniki			Transport na budowę – wskaźniki		
	A	B	A · B	C	D	A·C·D
	emisja CO ₂		emisja CO ₂	dystans	emisja CO ₂	emisja CO ₂
	kg/m ²	kg/kg	kg/m ²	km	kg/kg·km	kg/m ²
Mur z cegły	130	0,25	33	100	0,10·10 ⁻³	1,3
Zaprawa	85	0,13	11	20	0,15·10 ⁻³	0,3
Wełna mineralna	5	1,0	5	100	0,10·10 ⁻³	0,1
Płyty gipsowe (2x)	17	0,3	5	50	0,10·10 ⁻³	0,1
Profile stalowe zimnogięte	4	0,7	3	500	0,10·10 ⁻³	0,2
	241	Razem = 57		–	Razem = ~2	
				Łącznie = 59		