

Barbara ZAJĄC, Irena GOŁĘBIOWSKA

e-mail: zajacbar@poczta.onet.pl

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

Możliwość redukcji CO₂ przez zastosowanie betonu zrównoważonego i kruszywa recyklingowego

Wstęp

Beton jest najpopularniejszym materiałem budowlanym na świecie, szczególnie szeroko stosowanym do realizacji infrastruktury budowlanej. W porównaniu z innymi materiałami budowlanymi, jego szkodliwy wpływ na środowisko jest stosunkowo mały. Jednak, ze względu na zawartość cementu jest on pośrednio odpowiedzialny za emisję CO₂, a z powodu zawartości kruszywa odpowiada za eksploatację nieodnawialnych zasobów naturalnych. Skład objętościowy betonu przedstawiono na rys. 1.

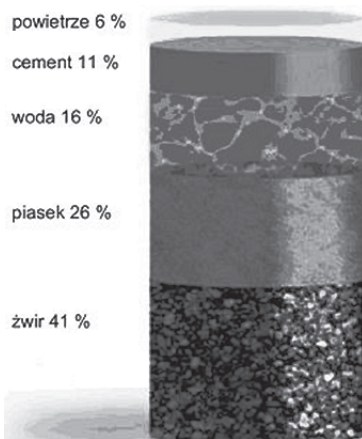
Produkcja jednej tony cementu powoduje powstanie jednej tony dwutlenku węgla [Liou i Chern, 2008]. Ciągłe wzrastająca produkcja betonu, związana z wysoką emisją CO₂ oraz znacznym zużyciem zasobów naturalnych, przyczyniła się w ostatnich latach do stosowania w budownictwie idei rozwoju zrównoważonego. Według tej idei na wszystkich etapach cyklu życia obiektu budowlanego (począwszy od fazy projektowania a kończąc na recyklingu) obok aspektów ekonomicznych i społecznych rozważa się również aspekt środowiskowy [Zajac i Gołębiowska, 2011]. Budownictwo zrównoważone to materiały i technologie przyjazne środowisku; tzn. oszczędzające zasoby naturalne, energię, redukujące emisję CO₂, chroniące środowisko poprzez: poprawę technologii produkcji cementu oraz stosowanie materiałów odpadowych do jego produkcji, recykling betonu i innych materiałów budowlanych oraz ponowne zastosowanie betonu wtórnego (recyklingowego). Ponadto maksymalną ochronę środowiska należy zapewnić przez ulepszenie istniejących technologii i materiałów gwarantujących wydłużenie życia obiektów budowlanych. Beton zrównoważony (proekologiczny) według koncepcji rozwoju zrównoważonego, to tworzywo trwałe, przyjazne środowisku i ludziom, wysokiej jakości, przy produkcji, którego zastosowano minimalną ilość surowców naturalnych i minimalną ilość energii. Produkcja betonu zrównoważonego powinna być cechować się minimalną emisją CO₂ oraz innych związków i metali ciężkich (szkodliwych dla zdrowia) i racjonalnymi nakładami finansowymi [Liou i Chern, 2008; Zajac i Gołębiowska, 2011].

W pracy analizowano fazy cyklu życia obiektu betonowego związane z emisją i absorpcją CO₂ oraz przedstawiono wybrane sposoby redukcji dwutlenku węgla poprzez obniżenie zużycia cementu w betonie i wykorzystanie absorpcyjnych właściwości kruszyw recyklingowych.

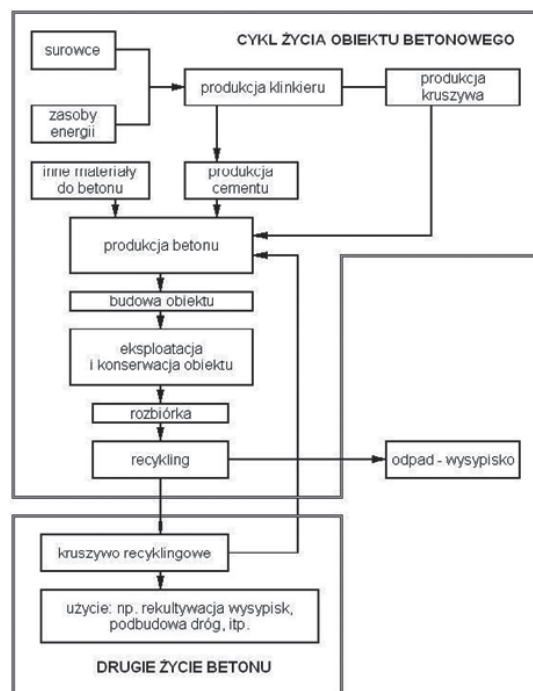
Fazy cyklu życia obiektu betonowego a CO₂

Poszczególne etapy cyklu życia obiektu betonowego, (uwzględniając również transport) związane są w różnym stopniu z emisją bądź absorpcją dwutlenku węgla (Rys. 2).

Emisja CO₂ następuje podczas wydobycia surowców, produkcji klinkieru związanej ze zużyciem energii i z wypalaniem, produkcji betonu, w trakcie budowy, rozbiórki i recyklingu oraz transportu.

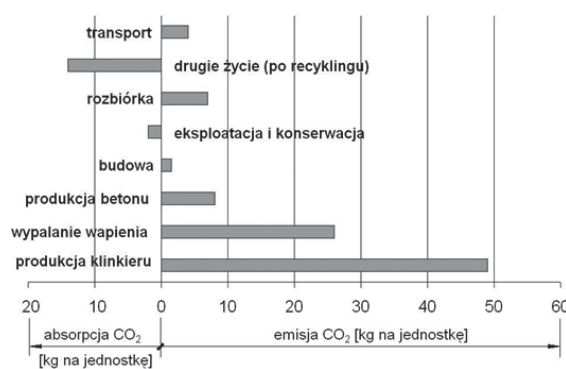


Rys. 1. Skład objętościowy betonu



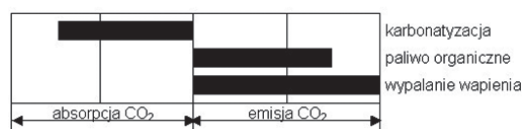
Rys. 2. Cykl życia obiektu betonowego i drugie życie betonu

Natomiast absorpcja CO₂ zachodzi podczas procesu eksploatacji obiektu betonowego oraz podczas drugiego życia betonu jako kruszywa recyklingowego lub betonu z kruszywem recyklingowym. Na rys. 3 przedstawiono przykład emisji i absorpcji CO₂ dla belki żelbetowej o wytrzymałości większej niż 35 MPa i masie 502 kg/m, przy założeniu, że cykl życia elementu wynosi 70 lat, a jego drugie życie po recyklingu osiąga 30 lat [Pomer i Pade, 2005].

Rys. 3. Emisja i absorpcja CO₂ podczas pierwszego i drugiego cyklu życia belki żelbetowej [Pomer i Pade, 2005]

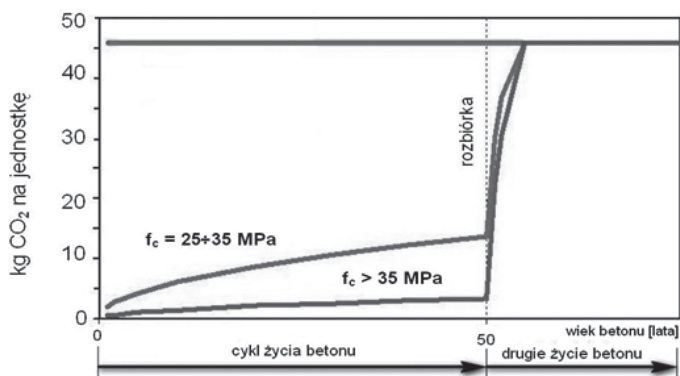
Redukcja emisji, dla badanego przypadku, wyniosła 18% w ciągu 100 lat pierwszego i drugiego życia belki. Największa absorpcja CO₂ zachodzi po rozbiórce i pokruszeniu betonu. Na rys. 4 pokazano najważniejsze czynniki wpływające na wielkość emisji i absorpcji dwutlenku węgla [Pomer i Pade, 2005].

Wysoki poziom emisji CO₂ związany jest ze zużyciem paliwa organicznego stosowanego do produkcji klinkieru, oraz z wypalaniem



Rys. 4. Główne czynniki wpływające na wielkość emisji i absorpcji CO₂ [Pomer i Pade, 2005]

wapienia. Natomiast absorpcja CO₂ zachodzi głównie podczas procesu karbonatyzacji w czasie użytkowania budowli oraz produkcji i stosowania recyklingowych kruszyw betonowych. Na rys. 5 przedstawiono ilości pochłoniętego przez beton dwutlenku węgla w zależności od jego wieku i klasy.



Rys. 5. Absorpcja CO₂ przez beton w zależności od jego wieku i klasy

W trakcie cyklu życia budowli betonowej, ilość zaabsorbowanego w procesie karbonatyzacji CO₂ zależy od klasy betonu – im wytrzymałość betonu jest wyższa, tym absorpcja mniejsza. Największą ilość CO₂ absorbuje kruszywo recyklingowe nie zastosowane do nowego betonu. Stopień karbonatyzacji betonu z kruszywem wtórnym jest niewielki. Na poziom absorpcji CO₂ znaczący wpływ ma stopień rozdrobnienia kruszywa recyklingowego [Kikuchi i Kuroda, 2011]. Im większy stopień rozdrobnienia kruszywa recyklingowego, tym większa powierzchnia karbonatyzacji i absorpcji CO₂.

Cement produkowany jest w piecu obrotowym, w procesie wypalania kamienia wapiennego i innych surowców (np. kredy, gliny, łupków) do temperatury 1400–1500°C. Paliwa takie jak węgiel i olej są stosowane do dostarczania ciepła w procesie spalania [Liou i Chern, 2008]. W procesie wypalania wapień (CaCO₃) rozkłada się na tlenek wapnia CaO i dwutlenek węgla CO₂. Następnie, dwutlenek węgla uwalniany jest do atmosfery, a tlenek wapnia reaguje ze składnikami pozostałych surowców wejściowych, tworząc klinkier portlandzki. Klinkier mieszany jest z małą ilością gipsu i powstaje produkt końcowy – cement. Produkcja klinkieru jest najważniejszym czynnikiem mającym wpływ na emisję CO₂ [Liou i Chern, 2008].

Podczas produkcji cementu 50% CO₂ jest wyzwolane w trakcie wypalania klinkieru, 45% przy spalaniu paliwa, a tylko 5% podczas innych działań związanych z wytworzeniem cementu [Pade i Guimaraes, 2007].

Produkcja betonu wymaga cementu, kruszywa, wody i innych materiałów (np. domieszek, dodatków) oraz energii. Na budowie, elektryczność i paliwo potrzebne są do produkcji wyrobu oraz do transportu, który jest znaczącym konsumentem energii. Ilość emitowanego dwutlenku węgla zależy od rodzaju pojazdu. Na przykład – samochody z silnikiem diesla, używane do transportu kruszywa i betonu emitują około 0,1 kg CO₂/tonę ładunku/km, a statki 10 razy mniej [Nielsen i Glavind, 2007].

W przypadku przebudowy obiektu betonowego, uzyskuje się znaczącą redukcję CO₂, gdy beton rozbiórkowy jest przerabiany na miejscu budowy na kruszywo recyklingowe, które jest tam ponownie używane. Stosując kruszywo recyklingowe na miejscu jego wytwarzania unika się przewozów związanych z emisją CO₂. Taka opcja, zamiast tradycyjnej polegającej na składowaniu odpadu na składowisku i imporcie kruszywa, powoduje zmniejszenie emisji CO₂ o 1/3 [Thomas i Lombardi, 2009].

Istotne różnice w emisji CO₂, w przypadku stosowania kruszyw recyklingowych są głównie związane z ich jakością. Im wyższa jakość kruszywa, tym większe zużycie energii, a więc większa emisja CO₂. Z kolei im wyższa jakość kruszywa, tym większa trwałość budowli, a więc ograniczenie ilości zużycia zasobów naturalnych [Zajac i Golebiowska, 2010]. W takiej sytuacji wybór rozwiązania jest trudny i wymaga wnikliwej analizy.

Redukcja CO₂ poprzez zastąpienie cementu materiałami odpadowymi i poprzez karbonatyzację

Z roku na rok wzrasta produkcja cementu na świecie. W 2002 roku wynosiła ona 1,685 mld ton, w 2020 roku prognozuje się 2,132 mld ton, a w 2050 roku od 4 do 6 mld ton. W celu zredukowania produkcji cementu powodującej dużą emisję CO₂ do atmosfery, należy ograniczyć ten składnik w betonie poprzez stosowanie materiałów zastępczych (dodatków) [Liou i Chern, 2008; Nielsen i Glavind, 2007]. Jako materiały zastępcze wykorzystywane są przemysłowe produkty uboczne takie jak:

- pył lotny otrzymany z elektrowni węglowych,
- mielony żużel wielkopiecowy, uzyskiwany przy produkcji stali,
- mikrokrzemionka powstająca podczas produkcji stopów żelazo-krzemianu,
- materiały pucolanowe i innego rodzaju pyły np. pyły kamienia wapiennego, pyły ze spalania odpadów domowych, itp.

Dzięki użyciu tych materiałów do produkcji betonu unika się ich składowania oraz oszczędza zasoby surowców naturalnych.

Bieżąca, światowa produkcja roczna pyłów lotnych wynosi 900 mln ton. Największe ich ilości produkują Chiny, Indie i USA. Zawartość pyłów lotnych w betonie jest różna w zależności od kraju i zastępują one od 5 do 15% (i więcej) cementu w mieszance betonowej. Według przeprowadzonych badań amerykańskich, przy zastosowaniu pyłów lotnych można otrzymać betony wysokowytrzymałe [Kikuchi i Kuroda, 2011]. W przypadku $W/C = 0,3$ (lub niższego) w mieszance betonowej z superplastyfikatorem, w celu otrzymania długoterminowych właściwości mechanicznych i trwałości, można do 60% cementu portlandzkiego zastąpić popiołem lotnym. W tab. 1 przedstawiono skład betonu o dużej zawartości pyłów lotnych. Wytrzymałość takiego betonu po 1, 28, 182 dniach wyniosła odpowiednio 8, 55 i 80 MPa a moduł Younga, pełzanie, skurcz oraz mrozoodporność betonu są porównywalne do odpowiednich parametrów betonu z cementem portlandzkim. Beton taki ma również dużą odporność na penetrację jonów chlorkowych.

Tab. 1. Skład mieszanki betonowej o dużej zawartości pyłów lotnych w betonie [Liou i Chern, 2008]

Material	Ilość
Cement portlandzki	150 kg/m ³
Pył lotny (według ASTM typ F)	200 kg/m ³
Woda	102 kg/m ³
Kruszywo grube	1220 kg/m ³
Kruszywo drobne	810 kg/m ³
Superplastyfikator	7 l/m ³
W/CM*	0,29

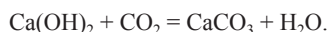
*CM – suma masy cementu i popiołu lotnego

Światowa produkcja roczna żużla wielkopiecowego wynosi 100 mln ton, ale tylko 25 mln ton jest przetwarzana na granulację, który ma właściwości podobne do cementu. Stosowanie granulowanego żużla do betonu, znacząco redukuje ryzyko zniszczenia betonu przez reakcję alkalia – krzemionka, oraz redukuje ryzyko korozji zbrojenia i powoduje wysoką odporność na atak siarczanów i innych chemikaliów. Granulowany żużel wielkopiecowy może być stosowany jako zamiennik cementu w betonie lub jako zamiennik klinkieru w cementzie. W przypadku zastosowania granulowanego żużla wielkopiecowego w cementzie, w ilości 6–95% masy cementu, otrzymywany jest cement portlandzki żużlowy i portlandzki wieloskładnikowy – CEMII oraz cement hutniczy CEMIII i cement wieloskładnikowy CEMV. Z badań laboratoryjnych betonu z zastosowaniem cementu żużlowego w ilości 455 kg/m³ mieszanki betonowej (powierzchnia właściwa cementu 405 m²/kg,

zawierającego 77,8% żużla granulowanego) o $W/C = 0,28$, otrzymano wytrzymałość na ściskanie betonu w wieku 1, 2, 7, 28 dni odpowiednio: 13, 37, 58 i 91 MPa [Liou i Chern, 2008]. Badany beton wykazywał również wysoką odporność na karbonatyzację, penetrację płynów organicznych, cykliczne za- i odmrażanie oraz łuszczenie pod wpływem soli.

Światowa produkcja roczna mikrokrzemionki wynosi około 2 mln ton. Z powodu niewielkiej produkcji i względnie wysokiej ceny w stosunku do cementu i innych materiałów zastępczych, mikrokrzemionka stosowana jest głównie do poprawiania właściwości betonu, tzn. do otrzymywania betonów o wysokiej wytrzymałości lub trwałości lub jednocześnie jednego i drugiego. Ponadto stosowana jest do produkcji betonów o dużej wodoszczelności i małej nasiąkliwości, wykorzystywanych w nawierzchniach parkingów i mostów, oraz do naprawy konstrukcji hydraulicznych zniszczonych przez ścieranie.

Beton poddany działaniu powietrza przez cały jego cykl życia, oraz na etapie wtórnego życia betonu, jako kruszywa recyklingowego, będzie absorbował CO_2 z atmosfery na skutek procesu karbonatyzacji. Efektem dyfuzji dwutlenku węgla jest obniżenie pH betonu i destabilizacja wszystkich produktów hydratacji cementu (hydratów CSH, AFt i AFm). Wodorotlenek wapnia $Ca(OH)_2$ powstający w procesie hydratacji cementu reaguje z dwutlenkiem węgla tworząc węglan wapnia $CaCO_3$ – wynik karbonatyzacji [Liou i Chern, 2008; Maliński i in., 1986; Piasta i Piasta, 1994]:



Z punktu widzenia trwałości, karbonatyzacja betonu jest postrzegana jako mechanizm niszczący beton, ponieważ obniża ona wskaźnik pH (z $pH 12 \div 13,5$ na $pH 8 \div 10$). W elemencie żelbetowym niskie pH powoduje utratę elektrochemicznej ochrony stali zbrojeniowej przez beton, co może zapoczątkować korozję zbrojenia [Pomer i Pade, 2005]. Korozja zbrojenia powoduje wzrost jego objętości, łuszczenie powierzchniowe i utratę przyczepności z betonem. W przypadku betonu niezbrojonego wpływ karbonatyzacji jest nieistotny a w betonach wysokowytrzymałych i szczelnych karbonatyzacja jest niewielka.

Dotychczasowe badania związane z karbonatyzacją betonu skupiały się głównie na jego trwałości, natomiast rzadko dotyczyły korzyści płynących z tego procesu pod kątem redukcji CO_2 .

Karbonatyzacja betonu zaczyna się od powierzchni zewnętrznej i przesuwa się stopniowo do wnętrza. Proces karbonatyzacji odbywa się bardzo długo i może trwać dziesiątki a nawet setki i tysiące lat [Maliński i in., 1986]. Według badań USA oraz krajów skandynawskich, najbardziej intensywny proces karbonatyzacji ma miejsce w ciągu pierwszych 50 lat cyklu życia betonu. Głębokość karbonatyzacji może osiągnąć 18 mm i 25 mm, odpowiednio według badań amerykańskich i angielskich. Karbonatyzacja betonu zależy od: jego jakości, wielkości powierzchni wystawionej na oddziaływanie powietrza, czasu ekspozycji i jakości powietrza (wilgotność, zanieczyszczenie, itp.). Karbonatyzację określają trzy podstawowe parametry [Pade i Guimaraes, 2007]:

1. głębokość karbonatyzacji

$$d = kt^{0,5} \alpha \text{ [m]}$$

gdzie: d – głębokość karbonatyzacji, k – stały mnożnik karbonatyzacji, zależny od składu cementu i wilgotności, (maksymalna wartość tego mnożnika jest osiągana przy wilgotności 40÷80%), t – czas, α – współczynnik korekcyjny uwzględniający skład betonu, jego klasę i warunki ekspozycji, ($\alpha = 1,05 \div 1,3$).

2. objętość skarbonatyzowanego betonu

$$V = \sum [(A_{\text{płyty}} d) + (A_{\text{ściany}} d) + (A_{\text{fundamentu}} d) + \dots] \text{ [m}^3\text{]}$$

gdzie: V – objętość skarbonatyzowanego betonu, A – pole powierzchni elementów konstrukcyjnych, ilość CO_2 zaabsorbowanego przez skarbonatyzowany beton

$$I_{CO_2} = 0,75 m_C m_{CaO} M_{CO_2} / M_{CaO} \text{ [kg } CO_2 / m^3 \text{ betonu]}$$

gdzie: I – ilość zaabsorbowanego CO_2 , m_C – masa cementu w m^3 betonu, m_{CaO} – masa CaO w cemencie, M_{CO_2} i M_{CaO} – masy molowe odpowiednio dwutlenku węgla i tlenu wapnia.

Z przeprowadzonych analiz teoretycznych wynika, że procent absorpcji CO_2 w ciągu cyklu życia betonu pierwotnego (70 lat) wynosi

37%, a po rozbiórce, w drugim życiu betonu (30 lat) następuje skokowy wzrost absorpcji o 50% w kruszywie recyklingowym (przy wskaźniku recyklingu równym 90%) [Nielsen i Glavind, 2007; Pade i Guimaraes, 2007; Pomer i Pade, 2005].

Według japońskich badań laboratoryjnych, wykonanych przy zastosowaniu termo-grawimetrycznej metody różnic skończonych, ilość absorbowanego CO_2 jest tym większa, im mniejsze są frakcje pokruszonego betonu recyklingowego oraz, gdy stosuje się cykliczne nawilżanie i suszenie tego betonu [Kikuchi i Kuroda, 2011]. Z badań tych wynika jednak, że ilość zaabsorbowanego przez kruszywo recyklingowe CO_2 wynosi tylko 5,5%.

Wnioski

Aby obniżyć poziom emisji CO_2 związany z całym cyklem życia obiektu betonowego począwszy od wydobycia surowców naturalnych, poprzez transport, budowę, utrzymanie obiektu włącznie z drugim życiem, po recyklingu betonu, należy:

- zminimalizować zużycie energii na poszczególnych etapach cyklu życia budowli, a szczególnie w fazie produkcji cementu (zastosowanie np. nanokatalizatorów do redukcji temperatury wypalania klinieru),
- ograniczyć zawartość cementu w betonie poprzez zastosowanie zastępczych, odpadowych materiałów przemysłowych (dodatków),
- wprowadzić nowoczesne technologie i betony o dużej trwałości i wytrzymałości, pozwalające na minimalizowanie ilości zużytych materiałów, np. poprzez zastosowanie nanospoiw zamiast cementów, nanomateriałów zamiast kruszyw oraz nanorurek węglowych zamiast stali w elementach żelbetowych,
- zmniejszyć eksploatację naturalnych zasobów kruszyw przez maksymalne wykorzystanie kruszyw recyklingowych, szczególnie na miejscach przebudowy obiektów,
- wykorzystać w maksymalnym stopniu transport wodny,
- wykorzystać absorpcyjne właściwości kruszyw recyklingowych np. do rekultywacji wysypisk oraz budowy zielonych tarasów, dachów, ścieżek itp. W miastach o dużym zapyleniu beton może być stosowany do oczyszczania powietrza ze względu na zdolność betonu do absorbowania CO_2 z atmosfery.

LITERATURA

- Kikuchi T., Kuroda Y., 2011. Carbon Dioxide uptake in demolished and crushed concrete. *Journal of Advanced Concrete Technology* 9 nr 1, 115 DOI: 10.3151/jact.9.115
- Liu T.C., Chern J.Ch., 2008. Sustainable concrete technology for the 21st Century. *The 3rd ACF International Conference – ACF/VCA, 1168-1174* <http://www.vncold.vn/modules/cms/upload/10/New%20folder/vca/Proceeding/Session%20D/D23.pdf>
- Maliński St. i inni: *Ochrona przed korozją. Poradnik*. Wyd. Komunikacji i Łączności, Warszawa
- Nielsen C.V., Glavind M., 2007. Danish Experiences with a Decade of Green Concrete. *Journal of Advanced Concrete Technology* 5, nr 1, 3–12. DOI: 10.3151/jact.5.3
- Pade C., Guimaraes M., 2007. The CO_2 uptake of concrete in a 100 year perspective. *Cement and Concrete research* 37, 1348 – 1356. DOI: 0.1016/j.cemconres.2007.06.009
- Piasta J., Piasta G., 1994. *Beton zwykły*. Arkady W-wa
- Pomer K., Pade C., 2005. *Guidelines – Uptake of carbon dioxide in the life cycle inventory of concrete*. Danish Technological Institute. ISBN: 87-7756-757-9. <http://www.dti.dk/co2-uptake-during-the-concrete-life-cycle/objectives/14460>
- Thomas A., Lombardi D.R., 2009. Estimating carbon dioxide emissions for aggregate use. *Proceedings of Institution of Civil Engineers. Engineering Sustainability* 162, 135 – 144. DOI: 10.1680/ensu.2009.162.3.135
- Zając B., Gołębiowska I., 2010. Ewolucja technologii recyklingu betonu. *Inż. Ap. Chem.* 49, nr 5, 134-135
- Zając B., Gołębiowska I., 2011. Projektowanie konstrukcji betonowych z uwzględnieniem ich oddziaływania na środowisko. *Ekologia i Technika*. 19, nr 6, 323-332