

mgr inż. Piotr Górak^{1*)}
 ORCID: 0000-0003-3479-7647
 mgr inż. Paweł Mofina¹⁾
 ORCID: 0000-0001-5189-0611
 mgr inż. Łukasz Guzikowski¹⁾

Zielony potencjał cementu wapiennego w aspekcie redukcji śladu węglowego wbudowanego w konstrukcjach mostowych

Green potential limestone cement in aspect of reduction embodied carbon footprint in bridge structures

DOI: 10.15199/33.2022.10.27

Streszczenie. W artykule przedstawiono wyniki badań, jakie uzyskano w przypadku betonu mostowego wykonanego na cementzie portlandzkim wapiennym CEM II/A-LL. Zastosowanie tego cementu pozwala na znaczną redukcję śladu węglowego wbudowanego w konstrukcjach mostowych, średnio o 12% w porównaniu z rozwiązaniami na bazie cementów CEM I. Kamień wapienny, jako główny składnik nieklinkierowy cementu, wprowadza do kompozytów cementowych wiele dodatkowych właściwości, które również zostały przedstawione w artykule. W przyszłości, w przypadku ograniczonej dostępności dobrej jakości innych, popularnych składników cementu (S, V) oraz wapienia i opartych na nim cementów może stać się naturalnym wyborem do redukcji śladu węglowego w betonie.

Słowa kluczowe: beton mostowy; wbudowany ślad węglowy; dekarbonizacja; trwałość; kamień wapienny; emisyjność.

Abstract. In this article presented test results which obtain for bridge concrete made on Portland limestone cement CEM II/A-LL. Deployment of this cement allows for significant embodied carbon footprint reduction in bridge structures averaging 12% in comparison for CEM I solutions. Limestone as a major non-clinker cement's constituent is characterized by a number of additional properties in cement composites, which were also presented in this article. In the near future, with the limited availability of good quality other popular ingredients of cement (S,V), limestone and cement based on it may become a natural choice for reduction of carbon footprint in concrete.

Keywords: bridge concrete; embodied carbon footprint; decarbonization; durability; limestone; emission.

Wbudowany ślad węglowy to parametr bardzo istotny z punktu widzenia strategii zrównoważonego budownictwa. To właśnie od jego redukcji powinna zaczynać się droga dekarbonizacji procesu budowlanego. Na wbudowany ślad węglowy składają się przede wszystkim emisyjność procesów związanych z wytworzeniem materiałów, ich transportem oraz wbudowaniem, czyli wg oceny cyklu życia zgodnej z [1, 2], to przede wszystkim fazy wyrobu A1-A3 oraz faza budowy A4-A5 oraz niekiedy faza eksploatacji B2-B5. Największy wpływ na wartość wbudowanego śladu węglowego mają materiały użyte do wzniesienia konstrukcji, a beton jako najpopularniejszy materiał budowlany odpowiada, wg różnych szacunków, za 55 ÷ 65% [3] całej jego wartości. Z kolei cement jako główny „emisyjny”

składnik betonu odpowiada za 75 ÷ 90% całego śladu węglowego tego kompozytu. Nietrudno zatem obliczyć, że czynnikiem determinującym stopień emisyjności betonu, a więc bezpośrednio wpływającym na wartość wbudowanego śladu węglowego jest **emisyjność zastosowanego cementu wyrażona, wg deklaracji środowiskowych typu III, jako wielkość potencjalnego wpływu na globalne ocieplenie ekwiwalentem kg CO₂ na tonę.**

W przypadku redukcji emisji w produkcji klinkieru podejmowanych jest wiele działań związanych ze stosowaniem surowców zdekarbonizowanych, poprawą efektywności energetycznej procesów produkcyjnych oraz stosowaniem paliw alternatywnych, zastępujących paliwa kopalne. Z kolei stosowanie cementów z mniejszą zawartością klinkieru jest jedną z najbardziej efektywnych dróg zmierzających do ograniczenia emisji CO₂ w produkcji cementu. Te dwa ogniwa łańcucha wartości 5C, czyli klinkier

i cement, odpowiadają w znaczny sposób za fazę A1-A3 cyklu życia konstrukcji, a więc za wbudowany ślad węglowy.

Inżynierskie obiekty drogowe to konstrukcje, w których o wbudowanym śladzie węglowym decydują przede wszystkim beton i stal. Niestety bardzo często ten rodzaj konstrukcji wymyka się z „zielonej” strategii oraz idei zrównoważonego budownictwa, ponieważ aspekty środowiskowe nie są odpowiednio „wyceniane” przez inwestorów. Powoduje to trwanie w tradycyjnych i wysokoemisyjnych rozwiązaniach materiałowych, bez możliwości wykorzystania zapisów zmieniających się dokumentów technicznych [4, 5].

Materiały do badań

Przedstawione w artykule wyniki badań uzyskano podczas kontynuacji projektu „zielony beton mostowy”, opisanego w artykule [6], przyjmując do weryfikacji użyteczności w betonach mostowych cement portlandzki wapienny CEM II/A-LL 42,5 R-NA VERTUA®

¹⁾ CEMEX Polska Sp. z o.o.
^{*)} Adres do korespondencji:
 piotr.gorak@cemex.com

Plus. W Polsce znane i powszechnie stosowane są cementy, w których obok klinkieru głównymi składnikami są krzemionkowy popiół lotny (V) oraz granulowany żużel wielkopiecowy (S), czyli surowce zdekarbonizowane poprawiające wiele właściwości cementów. Jednak z roku na rok dostępność na rynku takich surowców o dobrej jakości jest coraz bardziej ograniczona. Obecnie renesans przeżywa kamień wapienny jako główny składnik cementu, a także jako stabilny pod względem jakości dodatek typu I do betonu.

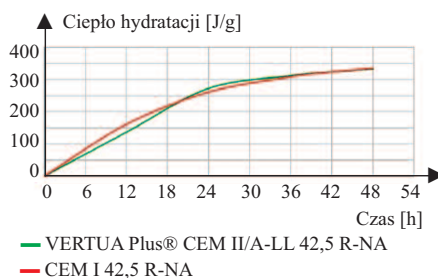
Wymagania dotyczące kamienia wapiennego, stosowanego jako składnik główny cementu, są zdefiniowane w normie PN-EN 197-1 [7] i przedstawiają się następująco:

- zawartość $\text{CaCO}_3 \geq 75,0\%$;
- zawartość gliny i ilów $\leq 1,2 \text{ g}/100 \text{ g}$ kamienia wapiennego;
- zawartość ogólna węgla organicznego (TOC): kamień wapienny LL $\leq 0,20\%$ masy kamienia; kamień wapienny L $\leq 0,50\%$ masy kamienia.

Dzięki lepszej mielności wapienia możliwe jest uzyskanie cementów o dużej powierzchni właściwej i nieco innych rozkładach ziarna niż w przypadku cementów bez dodatku kamienia wapiennego. Ten parametr z pozoru wydaje się wadą cementu ze względu na potencjalne zwiększenie wodoządności mieszanek betonowych lub zapraw. Nie jest to jednak prawdziwe przekonanie, ponieważ nowoczesne systemy mielące oraz dodatkowo stosowane aktywatory przemiału pozwalają na przygotowanie cementu nieróżniącego się znacznie zapotrzebowaniem na wodę, a zapewniającego zdecydowanie lepsze jej utrzymanie i homogenizację mieszanki niż cementy z grup CEM I o mniejszej powierzchni właściwej. Dodatkowo drobno zmielone ziarna kamienia wapiennego pełnią funkcję mikrowypełniacza w matrycy cementowej, zapewniając dużą szczelność i odporność na penetrację mediów korozyjnych. Ponadto przy zawartości do 14 ÷ 15% kamienia wapiennego w składzie cementu występuje nieznaczne zwiększenie wytrzymałości wczesnej (do 10 ÷ 15%) w porównaniu z cementem CEM I wykonanym na tym samym klinkierze. To zjawisko można wytłumaczyć dużą powierzchnią rozwinię-

cia ziaren i łatwym dostępem wody niezbędnej do przebiegu reakcji hydratacji, jak również efektem zarodnikowania opisanym w [7 ÷ 10], gdzie ziarna węgla wapnia zachowują się jak zarodniki fazy C-S-H, wpływając epitaksjalnie na jej krystalizację i kształtując tym samym wytrzymałość oraz trwałość matrycy.

Kamień wapienny normowo pełni w cemencie CEM II/A-LL 42,5 R-NA funkcję składnika głównego inertnego, ale dzięki opisanym mechanizmom oddziaływania oraz odpowiedniemu procesowi mielenia w obecności specjalnego dodatku aktywatora możliwe jest uzyskanie znacznie większej wytrzymałości wczesnej niż w porównywalnym (wykonanym na tym samym klinkierze) cemencie CEM I 42,5 R-NA przy jednoczesnej znacznej redukcji śladu węglowego. Co ciekawe, zwiększenie wytrzymałości wczesnej cementów CEM II/A-LL nie jest związane ze znacznym wzrostem ciepła hydratacji w początkowej fazie twardnienia (rysunek 1).



Rys. 1. Porównanie ciepła hydratacji CEM I 42,5 R-NA i CEM II/A-LL 42,5 R-NA
Fig. 1. Comparison heat of hydration CEM I 42,5 R-NA and CEM II/A-LL 42,5 R-NA

Zgodnie z normą PN-EN 206 [11] oraz krajowym uzupełnieniem do tej normy, a mianowicie PN-B 06265:2018-10 [12], cement CEM II/A-LL 42,5 R-NA można stosować we wszystkich klasach ekspozycji z wyjątkiem XA2 i XA3. Dodatkowo, na podstawie dokumentów technicznych [4, 5], cement CEM II/A-LL 42,5 R-NA jest dopuszczony do stosowania w drogowych obiektach inżynierskich oraz jednowarstwowych nawierzchniach betonowych w przypadku kategorii obciążenia ruchem do KR3. W badaniach, do wykonania receptur na konstrukcyjny beton mostowy wykorzystano cementy o właściwościach fizyczno-chemicznych zaprezentowanych w tabeli 1.

Tabela 1. Podstawowe właściwości cementów użytych w badaniach

Tabel 1. Basic properties of cements used in the tests

Właściwości	CEM I 42,5 R-NA	VERTUA® Plus CEM II/A-LL 42,5 R-NA
Początek wiązania [min]	151	150
Koniec wiązania [min]	193	190
Powierzchnia właściwa [cm^2/g]	3 760	5 300
Wodoządność [%]	27,1	27,5
Zawartość SO_3 [%]	2,59	2,70
Zawartość Cl^- [%]	0,046	0,034
Zawartość $\text{Na}_2\text{O}_{\text{eq}}$ [%]	0,48	0,46
Wytrzymałość na ściskanie po 2 dniach [MPa]	24,8	28,4
Wytrzymałość na ściskanie po 28 dniach [MPa]	59,1	58,8

Rozwiązania recepturowe

W ramach projektu badawczego wykorzystano zapisy WWiORB 13.01.00 [4] dopuszczające wykonanie betonu konstrukcyjnego w drogowym obiekcie inżynierskim z wykorzystaniem receptur na bazie CEM II/A-LL 42,5 R-NA oraz receptur betonów referencyjnych z cementem CEM I 42,5 R-NA wg założeń:

- C35/45 XC4, XA1, XD3, XF3;
- C50/60 XC4, XA1, XD3, XF4.

Na potrzeby weryfikacji rozwiązań założono, że beton w elementach konstrukcji powinien wykazywać odporność na działanie mrozu, oznaczoną wg PN-B-06265 stopniem mrozoodporności F150 w klasie ekspozycji XF3 oraz F200 w klasie ekspozycji XF4, a także odporność na penetrację wody pod ciśnieniem wg PN-EN 12390-8 i uzyskać maksymalną głębokość penetracji nie większą niż 40 mm. Ponadto zdecydowano się na badanie odporności na cykliczne zamrażanie/odmrażanie betonu w obecności soli odładzających (Załącznik O normy PN-B-06265). Jako stałe parametry umożliwiające porównanie rozwiązań cementowych przyjęto ilości składników w stałych proporcjach oraz wyjściowe parametry mieszanki betonowej, których kryteria oceny wraz z kryteriami oceny właściwości betonu stwardniałego zestawiono w tabeli 2.

Tabela 2. Kryteria akceptacji wyników badań mieszanki betonowej i betonu
Table 2. Acceptance criteria for test results of fresh mix and concrete

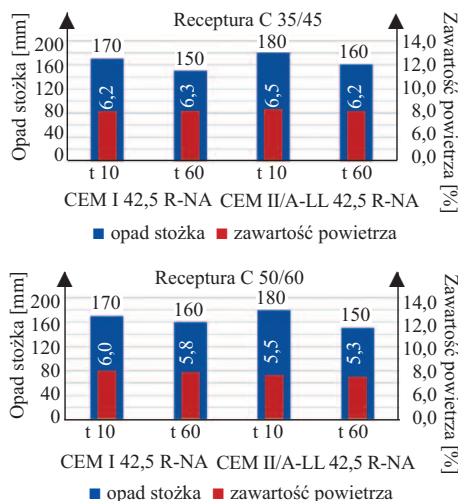
Właściwości mieszanki betonowej – badanie po 60 min		Właściwości betonu – badanie po 28 dniach dojrzewania	
Konsystencja (opad stożka) wg PN-EN 12350-2	160 +/-20 mm	wytrzymałość na ściskanie wg PN-EN 12390-3	$f_{ck} + 6$ MPa
Zawartość powietrza wg PN-EN 12350-7	6,0 +/- 1,0%	stopień mrozoodporności wg PN-B 06265 Załącznik N	F150 / F200
		kategoria mrozoodporności wg PN-B 06265 Załącznik O	FT2
		głębokość penetracji wody pod ciśnieniem wg PN-EN 12390-8	< 40 mm

Do wykonania betonów w prezentowanym projekcie zastosowano kruszywa drobne i grube, których właściwości były zgodne z wymaganiami dokumentu technicznego WWiORB 13.01.00 [4].

Analiza wyników badań

Badania cech reologicznych mieszanek betonowych, wyrażonych konsystencją i zawartością powietrza, wykonano w przypadku wszystkich receptur w czasie 5 i 60 min od zadozowania wody zarobowej. Do osiągnięcia zakładanej konsystencji w mieszance betonowej zarówno w recepturach z CEM I 42,5 R-NA, jak i z CEM II/A-LL 42,5 R-NA zastosowano identyczne ilości kombinacji domieszki uplastyczniającej (BV) i upłynniającej na bazie eterów polikarboksylanowych (PCE). W przypadku konieczności uzyskania takiego samego poziomu napowietrzenia, receptury mieszanki betonowej na cemencie CEM II/A-LL 42,5 R wymagały zwiększenia domieszki napowietrzającej o 100% w porównaniu z recepturami na CEM I 42,5 R-NA. Ocena wyników badań właściwości mieszanki betonowej (konsystencja, napowietrzenie) po 60 min potwierdziła spełnienie założeń projektowych dotyczących wszystkich badanych receptur. Graficzne zestawienie wyników badań zaprezentowano na rysunku 2.

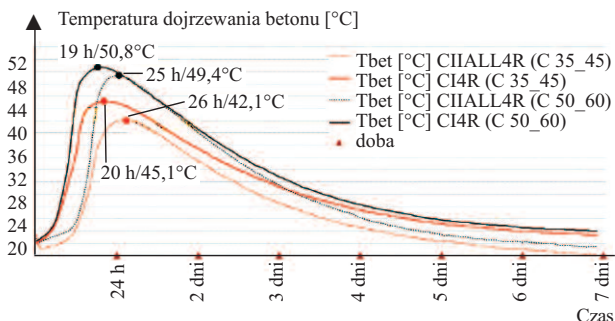
W przypadku konstrukcyjnych betonów mostowych często bardzo istotną rolę odgrywa **ciepło hydratacji**, a w zasadzie ilość i szybkość wydzielania ciepła z egzotermicznej reakcji uwodnienia cementu. Określenie takiej wartości pozwala wykonawcy dobrać metodę pielęgnacji młodego betonu i zaplanować jej czas, aby uniknąć ryzyka spękań elementu w wyniku skurczu pochodzenia termicznego. Badanie ciepła hydratacji polega na umieszczeniu formy walcowej zalanej mieszanką betonową w izolowanej „kabinie” hydratacyjnej i prowadzeniu reje-



Rys. 2. Wyniki badań konsystencji i zawartości powietrza w sprawdzanych rozwiązaniach recepturowych

Fig. 2. Results of consistency and air content tests in tested recipe solutions

stracji temperatury dojrzewającego betonu. Rejestracja temperatury odbywała się przez 7 dni z interwałem 60 min, co umożliwiło wyznaczenie krzywej rozwoju temperatury w dojrzewającym betonie z punktem charakterystycznym dla maksimum za pomocą programu 4C-Heat. Otrzymane dane pozwoliły na wykreślenie krzywej rozwoju ciepła hydratacji mieszanki betonowej (rysunek 3).

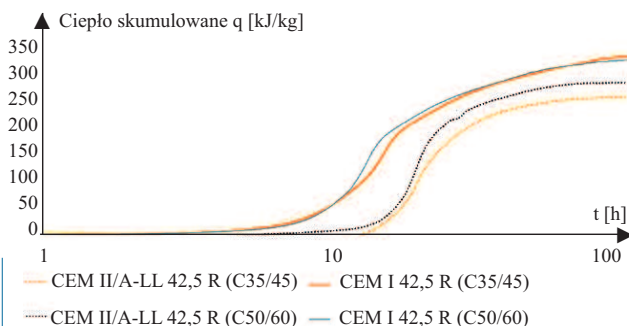


Rys. 3. Porównanie rozwoju temperatury betonów klas C35/45 i C50/60 wykonanych na porównywanych cementach CEM I 42,5 R-NA i CEM II/A-LL 42,5 R-NA

Fig. 3. Comparison of the temperature development of C35 / 45 and C50 / 60 class concretes made on the compared cements CEM I 42,5 R-NA and CEM II/A-LL 42,5 R-NA

Porównując krzywe narastania temperatury w twardniejących betonach stwierdzono, że uzyskanie maksymalnej temperatury betonów wykonanych na cemencie CEM II/A-LL 42,5 jest przesunięte w czasie o ok. 6 h w porównaniu z betonami na cemencie CEM I 42,5 R-NA. Ponadto w przypadku betonów na cemencie portlandzkim wapiennym zarejestrowana maksymalna temperatura jest niższa o 1,4°C w przypadku klasy C 50/60 oraz o 3,0°C w przypadku klasy C 35/45 niż betonów wykonanych na cemencie portlandzkim CEM I. Z rysunku 4 wynika, że ilość skumulowanego ciepła wydzielanego w egzotermicznej reakcji hydratacji cementu, wyrażonego w kJ/kg cementu, jest wyraźnie niższa w badanych betonach na cemencie portlandzkim wapiennym niż na cemencie portlandzkim CEM I. Pomimo pewnego przesunięcia w czasie momentu zainicjowania reakcji hydratacji, zaobserwowanego w przypadku CEM II w porównaniu z CEM I, wytrzymałość wczesna betonów z CEM II/A-LL jest znacznie większa pomimo mniejszej zawartości klinkieru. Jest to potwierdzeniem zjawiska zarodnikowania fazy C-S-H opisanego wcześniej w przypadku cementów zawierających drobno zmielony kamień wapienny.

Badania wytrzymałości na ściskanie przeprowadzono odpowiednio po 2, 7 i 28 dniach dojrzewania próbek w warunkach normowych (tabela 3). Porównanie wyników badań wytrzymałości na ściskanie po 28 dniach twardnienia betonów wykonanych na różnych cementach pokazuje, że w obrębie tej samej klasy wytrzymałości C35/45 i C50/60 dzięki zamianie cementu CEM I 42,5 R-NA na cement niskoklinkierowy CEM II/A-LL 42,5 R-NA uzyskano zwiększenie wytrzymałości końcowej o 1 ÷ 4% w zależności od receptury. Uzyskane wyniki badań **głębokości penetracji wody pod ciśnieniem** wg PN-EN 12390-8, **mrozoodporności wewnętrznej** wg Załącz-



Rys. 4. Ciężko skumulowane (q) w zależności od rodzaju zastosowanego cementu i klasy wytrzymałości betonu

Fig. 4. Cumulated heat (q) depending on the type of cement used and the strength class of the concrete

Tabela 3. Wyniki badań i ocena wytrzymałości na ściskanie

Table 3. Test results and assesment of compressive strength

Rodzaj cementu	Klasa wytrzymałości	Wytrzymałości na ściskanie [MPa]			Kryterium $f_{ck} + 6$ [MPa]	Rozwój wytrzymałości f_{c2}/f_{c28}	
		f_{c2}	f_{c7}	f_{c28}			
CEM I 42,5 R-NA	C35/45	24,5	40,3	52,2	TAK	0,47	umiarkowany
CEM II/A-LL 42,5 R-NA		27,0	46,7	54,6	TAK	0,49	umiarkowany
CEM I 42,5 R-NA	C50/60	38,9	62,3	75,1	TAK	0,52	szybki
CEM II/A-LL 42,5 R-NA		44,2	74,6	76,0	TAK	0,59	szybki

nika N [12] oraz mrozoodporności powierzchniowej betonów wg Załącznika O [12], wykonanych na porównywanych cementach, potwierdzają uzyskanie betonów szczelnych i odpornych na warunki zimowe (tabela 4).

Na podstawie danych od producenta cementów wykorzystanych do badań, emisyjność wyrażona ekwiwalentem CO₂ w przypadku 1 tony cementu VERTUA® Plus CEM II/A-LL 42,5 R-NA została zmniejszona o 12% w porównaniu z cementem CEM I 42,5 R-NA [13]. Taka redukcja pozwala na obniżenie poziomu śladu węglowego wbudowanego w przypadku przeciętnej objętości betonu 1500 m³ o prawie 40 ton po zastąpieniu cementu CEM I 42,5 R-NA cementem CEM II/A-LL 42,5 R-NA. Dodatkowo zaproponowaliśmy szczególną analizę emisyjności rozwiązania w funkcji wytrzymałości betonu, czyli obliczenie kosztu środowiskowego wyrażonego w kg CO₂ w przypadku 1 MPa wytrzymałości betonu (1 m³ betonu), wy-

Tabela 4. Wyniki badania trwałości

Table 4. Durability test results

Rodzaj cementu	Klasa wytrzymałości	Głębokość penetracji wody pod ciśnieniem [mm]	Uzyskany stopień mrozoodporności wg PN-B 06250:2018-10 – Załącznik N	Uzyskana kategoria mrozoodporności wg PN-B 06250:2018-10 – Załącznik O
CEM I 42,5 R-NA	C35/45	< 40	F150	FT2
CEM II/A-LL 42,5 R-NA		< 40	F150	FT2
CEM I 42,5 R-NA	C50/60	< 40	F200	FT2
CEM II/A-LL 42,5 R-NA		< 40	F200	FT2

konanego na cementcie CEM I i CEM II/A-LL. Taką analizę przedstawiono na rysunku 5.

Wnioski

Od inwestorów, wykonawców oraz nadzoru budowlanego zależy, czy i kiedy powszechnie stanie się stosowanie cementów niskoemisyjnych w budownictwie drogowo-mostowym.

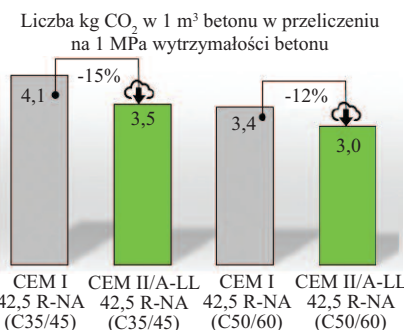
nia materiałowe są dowodem, że aspekt środowiskowy może gwarantować także wymierne korzyści w postaci poprawy niektórych właściwości betonu.

Rozwiązania materiałowe na bazie cementów niskoemisyjnych powinny stać się normą w przypadku inwestycji infrastrukturalnych w Polsce, ponieważ emisyjność obecnych rozwiązań kosztuje i jest to koszt, który ponosimy wszyscy, zmagając się ze skutkami globalnego ocieplenia. Z tego powodu „zielone” rozwiązania materiałowe należy promować za pomocą odpowiednich przepisów np. w formie dodatkowej punktacji w przetargach.

Literatura

[1] PN-EN 15804+A2:2020-03 (Eng.) Zrównoważenie obiektów budowlanych – Deklaracje środowiskowe wyrobu – Podstawowe zasady kategoryzacji wyrobów budowlanych.
 [2] PN-EN ISO 14067:2018-10 (Eng.) Gazy cieplarniane – Ślad węglowy wyrobów – Wymagania i wytyczne dotyczące kwantyfikacji.
 [3] <https://plgbc.org.pl/wp-content/uploads/2021/06/Mapa-drogowa-dekarbonizacji-2050.pdf>.
 [4] GDDKiA Warunki wykonania i odbioru robót budowlanych WWiORB M-13.01.00 v03. Beton konstrukcyjny w drogowych obiektach inżynierskich – Warszawa 30 września 2019.
 [5] GDDKiA Warunki wykonania i odbioru robót budowlanych WWiORB D-05.03.04 v02. Nawierzchnia z betonu cementowego – Warszawa 30 września 2019.
 [6] Górak P, Gaudy J, Wójcik A. Zielony beton mostowy. Materiały Budowlane. 2021; DOI: 10.15199/33.2021.09.07.
 [7] PN-EN 197-1:2012 Cement. Część 1: Skład, wymagania i kryteria zgodności dotyczące cementów powszechnego użytku.
 [8] Péra J, Husson S, Guilhot B. Influence of finely ground limestone on cement hydration. Cement and Concrete Composites. 1999; 21: 99 – 105.
 [9] Tsivilis S, Chatoniakis E, Kakali G, Voglis N. Portland-limestone cements. Their properties and hydration compared to those of other composite cements. Cement and Concrete Composition. 2005; 27 (2): 191 – 196.
 [10] Giergiczny Z, Piechówka M, Sokołowski M. Cementy z dodatkiem kamienia wapiennego. Materiały Budowlane. 2009; 10: 30 – 32.
 [11] PN-EN 206+A1:2016-16 Beton. Wymagania, właściwości, produkcja i zgodność.
 [12] PN-B 06265:2018-10. Beton – Wymagania, właściwości, produkcja i zgodność – Krajowe uzupełnienie PN-EN 206+A1:2016-12.
 [13] <https://www.cemex.pl/deklaracje-srodowiskowe>.
 Prawa autorskie © 2022/CEMEX Innovation Holding Ltd., Szwajcaria; Wszystkie prawa zastrzeżone.

Przyjęto do druku: 9.08.2022 r.



Rys. 5. Emisyjność rozwiązania materiałowego (1 m³ betonu) w odniesieniu do kosztu środowiskowego 1 MPa wytrzymałości na ściskanie betonu

Fig. 5. Emissivity of the material solution (1 m³ of concrete) with reference to the environmental cost of 1 MPa of the compressive strength of concrete

Normy oraz aktualne specyfikacje techniczne umożliwiają stosowanie rozwiązań bazujących na cementach o małej emisyjności, a uzyskiwane w kolejnych projektach badawczych wyniki badań potwierdzają ich uniwersalność i użyteczność. Bardziej „zielone” rozwiąza-