

inż. Mariusz Sumionka, AG-CEL Laboratorium
mgr inż. Ireneusz Trzynski, AG-CEL Laboratorium
mgr inż. Piotr Rydygier, AG-CEL Laboratorium

Zastosowanie cementu niskoemisyjnego CEM II/C-M (V-F-LL) 32,5R do produkcji mieszanek związanych cementem wg PN-EN 14227-1 i WT-5 z wykorzystaniem produktu uzyskanego w ramach gospodarki obiegu zamkniętego z kopalni kruszyw.

Application of low-emission cement CEM II/C-M (V-F-LL) 32.5R for the production of cement-bound mixtures according to PN-EN 14227-1 and WT-5 using a product obtained in a closed-loop economy from aggregate mines.

Streszczenie

Mieszanki związane cementem są powszechnie stosowane do budowy nawierzchni drogowych na warstwy ulepszonego podłoża oraz podbudowy. Ich producenci, podobnie jak w przypadku betonu towarowego, stoją przed wyzwaniami związanymi z dekarbonizacją sektora budownictwa. Wśród działań zmierzających do obniżenia śladu węglowego produkowanych mieszanek wymienić można zastosowanie cementu o niższej emisyjności oraz wykorzystanie materiałów odpadowych powstających podczas produkcji kruszyw naturalnych. Jednocześnie należy mieć na uwadze spełnienie wymagań stawianych mieszankom związanym cementem przez dokumenty stosowane w budownictwie. W referacie przedstawiono wyniki badań mieszanek związanych cementem wytworzonych z zastosowaniem cementu niskoemisyjnego CEM II/C-M (V-F-LL) 32,5R oraz produktu uzyskanego w ramach gospodarki obiegu zamkniętego z odpadów powstających przy produkcji kruszyw naturalnych. Na podstawie uzyskanych wyników określono wpływ podjętych działań na obniżenie śladu węglowego analizowanych mieszanek związanych cementem.

Abstract

Cement-bound mixtures are commonly used for the construction of road surfaces for improved subgrade and base layers. Their producers, similarly to ready-mix concrete, face challenges related to the decarbonization of the construction sector. Among the actions aimed at reducing the carbon footprint of produced mixtures, one can mention the use of cement with lower emission and the use of waste materials generated during the production of natural aggregates. At the same time, it is necessary to take into account the compliance with the requirements set for cement-bound mixtures by documents used in construction. The paper presents the results of

tests of cement-bound mixtures manufactured using low-emission cement CEM II/C-M (V-F-LL) 32.5R and a product obtained within the framework of the closed-loop economy from waste generated during the production of natural aggregates. Based on the obtained results, the impact of the actions taken on reducing the carbon footprint of the analyzed cement-bound mixtures was determined.

1. Wprowadzenie

Powszechnie uważa się, że zmiany klimatu to najważniejsze wyzwanie naszych czasów [1]. Wychodząc im naprzeciw przyjęto ambitne cele mające prowadzić do dekarbonizacji gospodarki, w tym również sektora budownictwa. Producenci wyrobów budowlanych, w tym także mieszanek związanych cementem, stoją przed wyzwaniami związanymi ze zmniejszeniem śladu węglowego produkowanych przez nich materiałów przy jednoczesnym spełnieniu wymagań użytkowych. W tym celu poszukuje się nowych rozwiązań materiałowych, polegających m.in. na aplikowaniu surowców niskoemisyjnych oraz zagospodarowaniu odpadów. Branża cementowa oferuje coraz szerszą gamę cementów charakteryzujących się niższym śladem węglowym, głównie poprzez ograniczenie zawartości klinkieru portlandzkiego na rzecz innych składników. Jedną z takich propozycji jest cement CEM-II/C-M (V-F-LL) 32,5R zgodny z normą PN-EN 197-6 [2] zawierający w swym składzie pyły pochodzące z recyklingu betonu. W niniejszym artykule przedstawiono wyniki badań mieszanek związanych cementem, wykonanych w warunkach laboratoryjnych z zastosowaniem ww. cementu oraz różnych układów kruszyw.

2. Mieszanki związane cementem

Mieszanka związana cementem (CBGM, od ang. „cement bound granular mixtures”) jest to mieszanka, w której następuje wiązanie i twardnienie na skutek reakcji hydraulicznych [5, 6]. Normą wyrobu jest norma klasyfikacyjna PN-EN 14227-1 [5], natomiast dokumentami aplikującymi jej postanowienia do potrzeb naszego kraju są Wymagania Techniczne WT-5 2010 [6] oraz w postępowaniach przetargowych Warunki Wykonania i Odbioru Robót Budowlanych (WWIORB) [13]. Mieszanki CBGM są powszechnie stosowane do wykonywania warstw konstrukcji nawierzchni drogowych [6, 13]. W tabeli 1 przedstawiono układ warstw konstrukcji nawierzchni podatnych i półsztywnych zgodnie z KTKNPiP [11], natomiast w tabeli 2 – układ warstw konstrukcji nawierzchni sztywnych zgodnie z KTKNS [12]. Odcieniem szarości oznaczono warstwy, do budowy których zgodnie z odpowiednimi dokumentami [6, 11, 12, 13] można stosować mieszanki związane cementem.

Tabela 1. Układ warstw konstrukcji nawierzchni podatnych i półsztywnych.

Konstrukcja nawierzchni (nawierzchnia)	Warstwy górne konstrukcji nawierzchni	Warstwa ścieralna	
		Warstwa wiążąca	
		Podbudowa zasadnicza	Górna warstwa podbudowy zasadniczej
			Dolna warstwa podbudowy zasadniczej
	Warstwy dolne konstrukcji nawierzchni	Podbudowa pomocnicza	
		Warstwa mrozochronna	
Podłoże gruntowe nawierzchni	Warstwa ulepszanego podłoża		
	Grunt rodzimy w wykopie lub grunt nasypowy w nasypie		

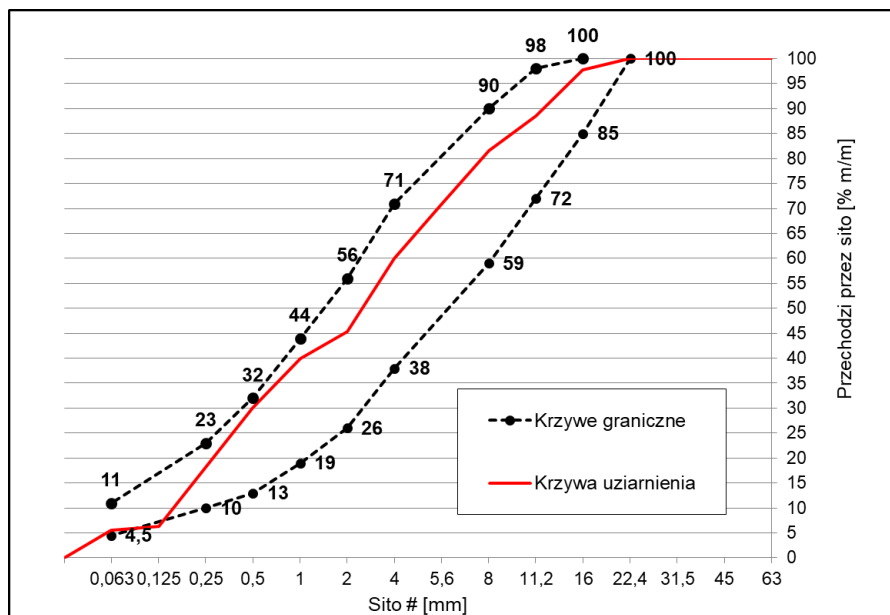
Tabela 2. Układ warstw konstrukcji nawierzchni sztywnych.

Konstrukcja nawierzchni (nawierzchnia)	Warstwy górne konstrukcji nawierzchni	Warstwa nawierzchniowa
		Warstwa poślizgowa
		Podbudowa zasadnicza
	Warstwy dolne konstrukcji nawierzchni	Podbudowa pomocnicza
		Warstwa mrozochronna
Podłoże gruntowe nawierzchni	Warstwa ulepszanego podłoża	
	Grunt rodzimy w wykopie lub grunt nasypowy w nasypie	

Do produkcji mieszanek CBGM stosowane są kruszywa (naturalne, sztuczne bądź z recyklingu) zgodne z normą PN-EN 12522 [10], cement pełniący funkcję spoiwa, woda oraz ewentualne dodatki i domieszki.

Należy zwrócić uwagę, że w świetle przepisów [5, 6, 13] do produkcji mieszanek CBGM należy stosować cement zgodny z normą PN-EN 197-1 [4]. Poszukiwanie rozwiązań niskoemisyjnych spowodowało, że opracowane zostały kolejne normy [2, 3] dotyczące nowych rodzajów cementów, w tym cementów zawierających pył z recyklingu betonu [2]. W związku z powyższym dokumenty odnoszące się do mieszanek związanych hydraulicznie, w tym mieszanek związanych cementem, wymagają aktualizacji, by umożliwić w zgodzie z nimi produkcję mieszanek w oparciu o nowe, niskoemisyjne rozwiązania materiałowe.

Dobór kruszyw do mieszanek CBGM polega nie tylko na weryfikacji ich cech w kontekście wymagań stawianych przez WT-5 czy WWIORB [6, 13], ale także na skomponowaniu odpowiedniej krzywej uziarnienia mieszanki mineralnej, pozwalającej uzyskać odpowiednią szczelność zagęszczonej mieszanki CBGM. Na rys. 1 przedstawiono przykład uziarnienia mieszanki mineralnej na tle krzywych granicznych dla mieszanki 0/16 mm wg WT-5.



Rys. 1. Krzywa uziarnienia mieszanki mineralnej 0/16 mm.

Jednym z wymogów jest zapewnienie odpowiedniej ilości frakcji o wymiarze $<0,063$ mm. W praktyce uzyskuje się to przez zastosowanie dodatków np. popiołu lotnego, który spełnia w mieszance rolę mikrokruszywa, bądź zastosowanie kruszyw o podwyższonej zawartości pyłów w porównaniu do kruszyw płukanych. Alternatywą jest również wykorzystanie materiałów odpadowych powstających w wyniku wydobywania i przeróbki kruszyw naturalnych, np. w procesie płukania.

Procedura projektowania mieszanek CBGM oparta jest o badania laboratoryjne, przeprowadzone na tych samych składnikach, które mają być docelowo stosowane podczas produkcji. Po ustaleniu składu mieszanki spełniającego wymagania w zakresie uziarnienia oraz minimalnej zawartości cementu, wykonuje się badanie zagęszczalności metodą Proctora zgodnie z PN-EN 13286-2 [7] celem określenia maksymalnej gęstości objętościowej szkieletu mieszanki oraz optymalnej zawartości wody, przy której uzyskuje się największe zagęszczenie. Podstawą określenia przydatności mieszanki jest wynik badania wytrzymałości na ściskanie wg PN-EN 13286-41 [8] po 28 dniach pielęgnacji, przeprowadzonego na próbkach walcowych wykonanych zgodnie z PN-EN 13286-50 [9]. Zasady pielęgnacji próbek do badań określają zapisy WT-5. Badanie wytrzymałości można dodatkowo wykonywać w celach kontrolnych po innym czasie pielęgnacji, jednak w procesie oceny zgodności wyrobu wiążące pozostają wymagania dotyczące wytrzymałości po 28 dniach pielęgnacji. Dodatkowym wymaganiem stawianym mieszankom CBGM w zależności od przeznaczenia w konstrukcji nawierzchni drogowej jest mrozoodporność, charakteryzowana przez wskaźnik mrozoodporności, który określa się przez porównanie wytrzymałości na ściskanie próbek po 28 dniach pielęgnacji oraz próbek poddanych po tym okresie dodatkowo 14 cyklom zamrażania i odmrażania, zgodnie z zapisami WT-5.

3. Program i wyniki badań

Z uwagi na kwestie ekonomiczne, do produkcji mieszanek CBGM najczęściej stosowany jest cement portlandzki popiołowy CEM-II/B-V 32,5R. Na potrzeby niniejszej pracy posłużył on jako cement referencyjny. W celu oceny możliwości zastosowania cementu niskoemisyjnego CEM II/C-M (V-F-LL) 32,5R jako alternatywnego spoiwa do produkcji mieszanek CBGM, przeprowadzono badania na trzech seriach mieszanek (oznaczonych jako seria 1, seria 2 oraz seria 3) o różnym składzie kruszywowym. W składzie mieszanek serii 1 zastosowano kruszywa polodowcowe frakcji 0/2, 2/8 i 8/16 mm, pochodzące z Żwirowni Ostrowite. W składzie mieszanek serii 2, część kruszywa drobnego 0/2 mm zastąpiono kruszywem wapiennym 0/4 mm pochodzącym z kopalni Wapienno, w celu uzupełnienia wymaganej przez WT-5 zawartości frakcji <0,063 mm (zawartość pyłów w kruszywie wapiennym 0/4 mm wynosiła 15% m/m). W mieszankach serii 3, część kruszywa drobnego 0/2 mm zastąpiono produktem uzyskanym z płukania nadawy w ramach gospodarki obiegu zamkniętego w kopalni kruszyw Głazica. Produkt ten, stanowiący kruszywo drobne frakcji 0/0,5 mm o zawartości pyłów 30% m/m, zastosowano analogicznie jak kruszywo wapienne w celu uzupełnienia wymaganej przez WT-5 zawartości frakcji <0,063 mm. Dla każdej z trzech serii mieszanek opracowano dwa warianty różniące się rodzajem zastosowanego cementu: wariant B z zastosowaniem cementu CEM-II/B-V 32,5 R-HSR/NA oraz wariant F z zastosowaniem cementu CEM II/C-M (V-F-LL) 32,5R. W tabelach 1÷3 przedstawiono składy receptur badanych mieszanek.

Tabela 1. Skład mieszanek serii 1

Mieszanka CBGM 0/16 - seria 1		
Składniki	Wariant 1-B	Wariant 1-F
Piasek 0/2 (Żwirownia Ostrowite, HOLCIM)	41,4%	41,4%
Żwir 2/8 (Żwirownia Ostrowite, HOLCIM)	39,0%	39,0%
Żwir 8/16 (Żwirownia Ostrowite, HOLCIM)	15,0%	15,0%
Kruszywo wapienne 0/4 mm (Kopalnia Wapienno, HOLCIM)	0,0%	0,0%
Kruszywo drobne 0/0,5 mm (Kopalnia Głazica)	0,0%	0,0%
Cement CEM-II/B-V 32,5R-HSR/NA (Cementownia Kujawy, HOLCIM)	4,6%	0,0%
Cement CEM-II/C-M (V-F-LL) 32,5R (Cementownia Kujawy, HOLCIM)	0,0%	4,6%

Tabela 2. Skład mieszanek serii 2

Mieszanka CBGM 0/16 - seria 2		
Składniki	Wariant 2-B	Wariant 2-F
Piasek 0/2 (Żwirownia Ostrowite, HOLCIM)	16,4%	16,4%
Żwir 2/8 (Żwirownia Ostrowite, HOLCIM)	39,0%	39,0%
Żwir 8/16 (Żwirownia Ostrowite, HOLCIM)	15,0%	15,0%
Kruszywo wapienne 0/4 mm (Kopalnia Wapienno, HOLCIM)	25,0%	25,0%
Kruszywo drobne 0/0,5 mm (Kopalnia Głazica)	0,0%	0,0%
Cement CEM-II/B-V 32,5R-HSR/NA (Cementownia Kujawy, HOLCIM)	4,6%	0,0%
Cement CEM-II/C-M (V-F-LL) 32,5R (Cementownia Kujawy, HOLCIM)	0,0%	4,6%

Tabela 3. Skład mieszanek serii 3

Mieszanka CBGM 0/16 - seria 3		
Składniki	Wariant 3-B	Wariant 3-F
Piasek 0/2 (Żwirownia Ostrowite, HOLCIM)	29,4%	29,4%
Żwir 2/8 (Żwirownia Ostrowite, HOLCIM)	39,0%	39,0%
Żwir 8/16 (Żwirownia Ostrowite, HOLCIM)	15,0%	15,0%
Kruszywo wapienne 0/4 mm (Kopalnia Wapienno, HOLCIM)	0,0%	0,0%
Kruszywo drobne 0/0,5 mm (Kopalnia Głazica)	12,0%	12,0%
Cement CEM-II/B-V 32,5R-HSR/NA (Cementownia Kujawy, HOLCIM)	4,6%	0,0%
Cement CEM-II/C-M (V-F-LL) 32,5R (Cementownia Kujawy, HOLCIM)	0,0%	4,6%

Dla każdej receptury wykonano zaroby mieszanek w warunkach laboratoryjnych. W pierwszej kolejności określono maksymalną gęstość objętościową szkieletu mieszanek oraz optymalną zawartość wody wg PN-EN 13286-2. Wyniki badania przedstawiono w tabelach 1÷3.

Tabela 4. Wyniki badań maksymalnej gęstości objętościowej szkieletu mieszanki i optymalnej zawartości wody – seria 1.

Mieszanka CBGM 0/16 - seria 1		
Cecha	Wariant 1-B	Wariant 1-F
Maksymalna gęstość objętościowa szkieletu mieszanki [g/cm ³]	2175	2,174
Optymalna zawartość wody [%]	5,6	5,4

Tabela 5. Wyniki badań maksymalnej gęstości objętościowej szkieletu mieszanki i optymalnej zawartości wody – seria 2.

Mieszanka CBGM 0/16 - seria 2		
Cecha	Wariant 2-B	Wariant 2-F
Maksymalna gęstość objętościowa szkieletu mieszanki [g/cm ³]	2,194	2,198
Optymalna zawartość wody [%]	6,0	5,7

Tabela 6. Wyniki badań maksymalnej gęstości objętościowej szkieletu mieszanki i optymalnej zawartości wody – seria 3.

Mieszanka CBGM 0/16 - seria 3		
Cecha	Wariant 3-B	Wariant 3-F
Maksymalna gęstość objętościowa szkieletu mieszanki [g/cm ³]	2,190	2,186
Optymalna zawartość wody [%]	6,7	6,4

Następnie, dla każdego wariantu zaformowano po 9 próbek w stalowych formach walcowych o wymiarach nominalnych $H = 120 \text{ mm}$ i $D = 100 \text{ mm}$, zgodnie z PN-EN 13286-50 w celu określenia następujących cech:

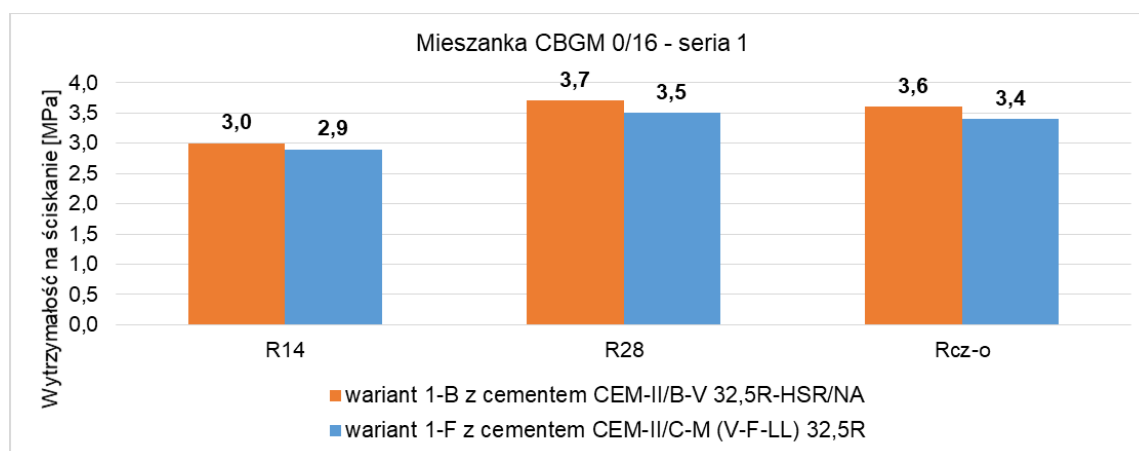
- wytrzymałości na ściskanie po 14 dniach pielęgnacji R_{14} ,
- wytrzymałości na ściskanie po 28 dniach pielęgnacji R_{28} ,
- wytrzymałości na ściskanie po 28 dniach pielęgnacji oraz po 14 cyklach zamrażania i odmrażania R_c^{Z-0} .

WT-5 określa sposób pielęgnacji próbek przeznaczonych do badania wytrzymałości R_{28} oraz $R_{c^{z-o}}$, nie określa natomiast procedury postępowania z próbkami przeznaczonymi do badania wytrzymałości na ściskanie po innym okresie pielęgnacji. Dla potrzeb niniejszych badań, kierując się literaturą przedmiotu [14], próbki przeznaczone do badania wytrzymałości R_{14} przechowywano do momentu badania w komorze klimatycznej, w wilgotności 95% - 100% i temperaturze $20 \pm 2^\circ\text{C}$.

Wyniki badań wytrzymałości na ściskanie po 14 i 28 dniach pielęgnacji oraz po 14 cyklach zamrażania i odmrażania przedstawiono w tabelach 7÷9 oraz graficznie na rysunkach 2÷4.

Tabela 7. Wyniki badań wytrzymałości na ściskanie próbek mieszanek serii 1.

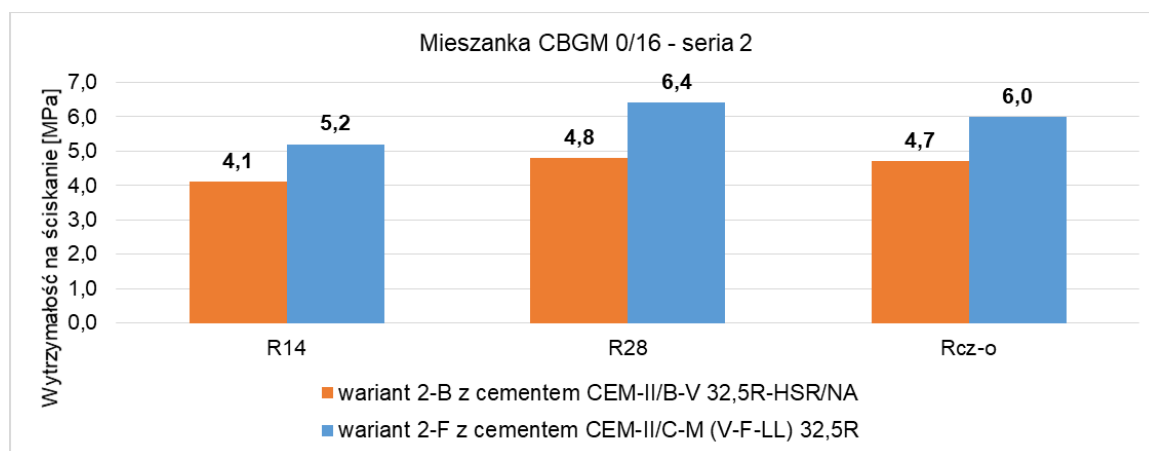
Wyniki badań mieszanki CBGM 0/16 - seria 1		
Cecha	Wariant 1-B	Wariant 1-F
	CEM-II/B-V 32,5R-HSR/NA	CEM-II/C-M (V-F-LL) 32,5R
R_{14} [MPa]	3,0	2,9
R_{28} [MPa]	3,7	3,5
$R_{c^{z-o}}$ [MPa]	3,6	3,4
$R_{c^{z-o}} / R_{28}$ [-]	0,97	0,97



Rys. 2. Porównanie wytrzymałości na ściskanie mieszanek w wariantach 1-B i 1-F.

Tabela 8. Wyniki badań wytrzymałości na ściskanie próbek mieszanek serii 2.

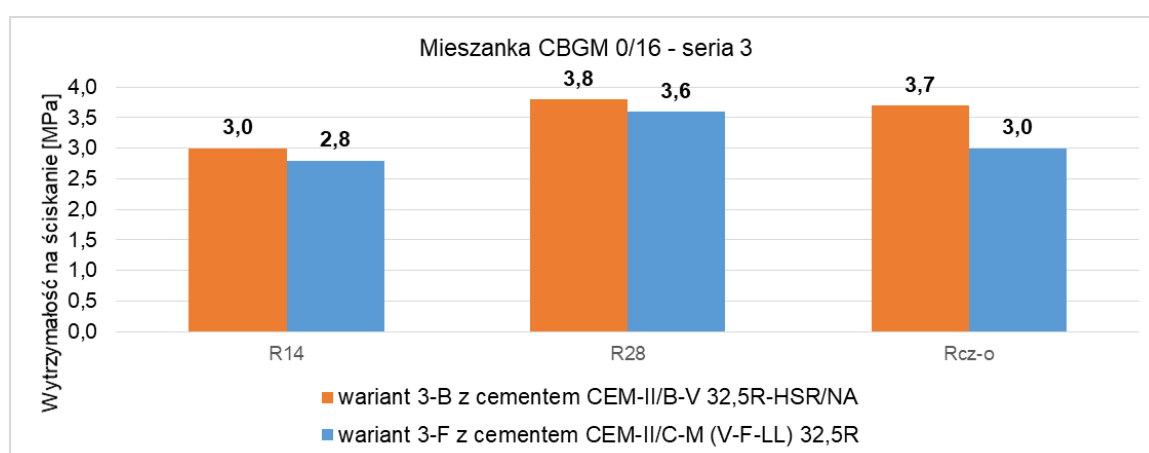
Wyniki badań mieszanki CBGM 0/16 - seria 2		
Cecha	Wariant 2-B	Wariant 2-F
	CEM-II/B-V 32,5R-HSR/NA	CEM-II/C-M (V-F-LL) 32,5R
R_7 [MPa]	4,1	5,2
R_{28} [MPa]	4,8	6,4
$R_{c^{z-o}}$ [MPa]	4,7	6,0
$R_{c^{z-o}} / R_{28}$ [-]	0,98	0,94



Rys. 3. Porównanie wytrzymałości na ściskanie mieszanek w wariantach 2-B i 2-F.

Tabela 9. Wyniki badań wytrzymałości na ściskanie próbek mieszanek serii 3.

Wyniki badań mieszanki CBGM 0/16 - seria 3		
Cecha	Wariant 3-B	Wariant 3-F
	CEM-II/B-V 32,5R-HSR/NA	CEM-II/C-M (V-F-LL) 32,5R
R ₇ [MPa]	3,0	2,8
R ₂₈ [MPa]	3,8	3,6
R _{c^{Z-o}} [MPa]	3,7	3,0
R _{c^{Z-o}} / R ₂₈ [-]	0,97	0,83



Rys. 4. Porównanie wytrzymałości na ściskanie mieszanek w wariantach 3-B i 3-F.

W przypadku mieszanek serii 1, wytrzymałość wczesna R₁₄ mieszanki wykonanej z zastosowaniem cementu CEM-II/C-M (V-F-LL) 32,5R (wariant 1-F) była o 3,3% niższa niż wytrzymałość R₁₄ mieszanki wykonanej z zastosowaniem cementu CEM-II/B-V 32,5R-HSR/NA (wariant 1-B). Dla wytrzymałości normowej R₂₈ różnica ta wyniosła 5,4% na korzyść mieszanki z zastosowaniem cementu CEM-II/B-V 32,5R-HSR/NA (wariant 1-B). Oba warianty mieszanki, niezależnie od rodzaju

zastosowanego cementu, spełniły wymagania dla klasy wytrzymałości C1,5/2. Wskaźnik mrozoodporności, czyli stosunek $R_{c^{z-o}}$ do R_{28} , dla obu wariantów wyniósł 0,97. Wartość wskaźnika mrozoodporności spełniła wymagania WT-5 zarówno dla podbudowy pomocniczej ($\geq 0,6$) jak i podbudowy zasadniczej ($\geq 0,7$).

W przypadku mieszanek serii 2, wytrzymałość wczesna R_{14} mieszanki wykonanej z zastosowaniem cementu CEM-II/C-M (V-F-LL) 32,5R (wariant 2-F) była o 26,8% wyższa niż wytrzymałość R_{14} mieszanki wykonanej z zastosowaniem cementu CEM-II/B-V 32,5R-HSR/NA (wariant 2-B). Dla wytrzymałości normowej R_{28} różnica ta wyniosła 33,3% na korzyść mieszanki z zastosowaniem cementu CEM-II/C-M (V-F-LL) 32,5R (wariant 2-F). Mieszanka z cementem CEM-II/B-V 32,5R-HSR/NA spełniła wymagania dla klasy wytrzymałości C3/4, natomiast mieszanka z cementem CEM-II/C-M (V-F-LL) 32,5R spełniła wymagania dla klasy wytrzymałości C5/6. Wskaźnik mrozoodporności wyniósł 0,98 dla wariantu 2-B oraz 0,94 dla wariantu 2-F. Wartość wskaźnika mrozoodporności dla obu wariantów spełniła wymagania WT-5 zarówno dla podbudowy pomocniczej ($\geq 0,6$) jak i podbudowy zasadniczej ($\geq 0,7$).

W przypadku mieszanek serii 3, wytrzymałość wczesna R_{14} mieszanki wykonanej z zastosowaniem cementu CEM-II/C-M (V-F-LL) 32,5R (wariant 3-F) była o 6,7% niższa niż wytrzymałość R_{14} mieszanki wykonanej z zastosowaniem cementu CEM-II/B-V 32,5R-HSR/NA (wariant 3-B). Dla wytrzymałości normowej R_{28} różnica ta wyniosła 5,3% na korzyść mieszanki z zastosowaniem cementu CEM-II/B-V 32,5R-HSR/NA (wariant 3-B). Oba warianty mieszanki, niezależnie od rodzaju zastosowanego cementu, spełniły wymagania dla klasy wytrzymałości C1,5/2. Wskaźnik mrozoodporności wyniósł 0,97 dla wariantu 3-B oraz 0,83 dla wariantu 3-F. Wartość wskaźnika mrozoodporności dla obu wariantów spełniła wymagania WT-5 zarówno dla podbudowy pomocniczej ($\geq 0,6$) jak i podbudowy zasadniczej ($\geq 0,7$).

Zastąpienie części kruszywa drobnego 0/2 mm kruszywem 0/0,5 mm nie spowodowało istotnych różnic w wytrzymałości R_{28} , zarówno w układzie z cementem CEM-II/B-V 32,5R-HSR/NA jak i CEM-II/C-M (V-F-LL) 32,5R. Natomiast zastosowanie kruszywa wapiennego 0/4 mm istotnie zwiększyło wytrzymałość R_{28} w stosunku do wariantu bazowego (seria 1) zarówno przy zastosowaniu CEM-II/B-V 32,5R-HSR/NA (wzrost R_{28} o 29,7%) jak i CEM-II/C-M (V-F-LL) 32,5R (wzrost R_{28} o 82,8%).

4. Podsumowanie i wnioski

Mimo wyższej wodożądności cementu CEM-II/C-M (V-F-LL) 32,5R (29,6% wg danych producenta) w porównaniu z cementem CEM-II/B-V 32,5R-HSR/NA (26,5%), wyższą optymalną zawartość wody w próbie Proctora uzyskano dla mieszanek z cementem portlandzkim popiołowym. Różnice na poziomie $0,2 \div 0,3\%$ należy uznać jednak za pomijalne, wynikające z dokładności metody badawczej. Większe znaczenie w tej materii ma rodzaj zastosowanego kruszywa drobnego. Najwyższą wilgotnością optymalną charakteryzowały się mieszanki serii 3 za zastosowaniem kruszywa 0/0,5 mm.

Mieszanki serii 1 i 3 z zastosowaniem cementu CEM-II/C-M (V-F-LL) 32,5R osiągnęły bardzo zbliżoną wytrzymałość na ściskanie, zarówno wczesną po 14 dniach pielęgnacji jak i normową po 28 dniach pielęgnacji w porównaniu do mieszanek z cementem CEM-II/B-V 32,5R-HSR/NA. Mieszanka serii 2 z zastosowaniem cementu CEM-II/C-M (V-F-LL) 32,5R osiągnęła znacznie wyższą

wytrzymałość w porównaniu do mieszanki z cementem CEM-II/B-V 32,5R-HSR/NA. Wyniki wytrzymałości normowej w tym przypadku pozwoliły osiągnąć wyższą klasę wytrzymałości w porównaniu do mieszanki z cementem referencyjnym. Można przypuszczać, że cement CEM-II/C-M (V-F-LL) 32,5R zawierający w swoim składzie wapień (LL) będzie wykazywał szczególną przydatność w zestawieniu z pyłami pochodzącymi z kruszywa wapiennego. Wszystkie mieszanki charakteryzowały się wysoką mrozoodpornością, spełniając z zapasem wymagania stawiane w tej materii przez WT-5.

Wyniki badań przedstawione w niniejszym referacie wskazują, że cement CEM-II/C-M (V-F-LL) 32,5R może być pełnowartościową alternatywą dla cementu CEM-II/B-V 32,5R w kontekście produkcji mieszanek CBGM.

Istotną zaletą cementu zawierającego pył z recyklingu betonu jest również wielkość emisji CO₂ powstająca w procesie produkcji. Wielkość ta jest zdefiniowana jako potencjał globalnego ocieplenia (GWP – Global Warming Potential) albo jako ślad węglowy produktu, wyrażony w kg, jako ekwiwalent CO₂ na tonę produktu. Zgodnie z danymi udostępnionymi przez producenta, dla cementu CEM-II/B-V 32,5R-HSR/NA wartość GWP wynosi 405 kg CO₂/t, natomiast dla cementu CEM-II/C-M (V-F-LL) 32,5R wynosi 348 kg CO₂/t. Oznacza to, że przy takim samym dozowaniu spoiwa, jak w przedstawionych wyżej badaniach, z tytułu zamiany cementu można zredukować ślad węglowy mieszanek CBGM o 14%.

5. Literatura

- [1] Spajamy Europejski Zielony Ład – ROADMAP 2050, SPC
- [2] PN-EN 197-6:2023-09 Cement. Część 6: Cement z materiałów budowlanych pochodzących z recyklingu.
- [3] PN-EN 197-5:2021-07 Cement. Część 5: Cement portlandzki wieloskładnikowy CEM II/C-M i cement wieloskładnikowy CEM VI.
- [4] PN-EN 197-1:2012 Cement. Część 1: Skład, wymagania i kryteria zgodności dotyczące cementów powszechnego użytku.
- [5] PN-EN 14227-1:2013-10 Mieszanki związane spoiwem hydraulicznym. Specyfikacje. Część 1: Mieszanki związane cementem.
- [6] Wymagania Techniczne WT-5 2010: Mieszanki związane spoiwem hydraulicznym do dróg krajowych.
- [7] PN-EN 13286-2:2010 Mieszanki niezwiązane i związane hydraulicznie. Część 2: Metody badań laboratoryjnych gęstości na sucho i zawartości wody. Zagęszczanie metodą Proktora
- [8] PN-EN 13286-41:2022-04 Mieszanki niezwiązane i związane spoiwem hydraulicznym. Część 41: Metoda badania wytrzymałości na ściskanie mieszanek związanych hydraulicznie.
- [9] PN-EN 13286-50:2007 Mieszanki niezwiązane i związane spoiwem hydraulicznym. Część 50: Metoda sporządzania próbek związanych hydraulicznie za pomocą aparatu Proctora lub zagęszczania stole wibracyjnym.
- [10] PN-EN 13242+A1:2010 Kruszywa do niezwiązanych i związanych hydraulicznie materiałów stosowanych w obiektach budowlanych i budownictwie drogowym.
- [11] Katalog Typowych Konstrukcji Nawierzchni Podatnych i Półsztywnych 2014
- [12] Katalog Typowych Konstrukcji Nawierzchni Sztywnych 2014

[13] WARUNKI WYKONANIA I ODBIORU ROBÓT BUDOWLANYCH D-04.05.01 v03
PODBUDOWA I WARSTWA MROZOOCHRONNA Z MIESZANKI ZWIĄZANEJ
CEMENTEM

[14] C. Kraszewski, Charakterystyka wytrzymałościowa mieszanek kruszyw
związanych hydraulicznie do stosowania w podbudowach drogowych, Drogi i Mosty,
2009, nr 3, s. 31-54.

[15] P. Stałowski, G. Schmidt, H. Losik, Podbudowy drogowe – kompendium wiedzy,
Holcim Polska S.A.

[16] P. Stałowski, Niskoemisyjne cementy i spoiwa w podbudowach drogowych, IV
Forum Beton w Drogownictwie.