

Wpływ stosowania cementów niskoemisyjnych na właściwości betonu oraz trwałość drobnowymiarowych dwuwarstwowych elementów wibroprasowanych

Streszczenie

Elementy wykonane z betonu wibroprasowanego stanowią istotną część rynku wyrobów prefabrykowanych. Zastosowanie tych wyrobów na powierzchniach poziomych narażonych na cykliczne zamrażanie/rozmarzanie narzuca producentom wysokie wymagania jakościowe. Producenci tych wyrobów stoją przed wyzwaniem stosowania cementów niskoemisyjnych przy zapewnieniu wszystkich parametrów trwałościowych gotowych elementów. Program badań zakładał badanie wpływu zastosowania cementów niskoemisyjnych w kompozycji z i bez popiołu lotnego krzemionkowego na właściwości betonu oraz trwałość gotowych drobnowymiarowych dwuwarstwowych elementów wibroprasowanych. Do badań wykorzystano cementy CEM I 42,5R, CEM II/B-V 42,5 R, CEM II/A-LL 52,5R, CEM II/B-M(V-LL) 42,5N oraz popiół lotny krzemionkowy. Badania właściwości mieszanki realizowane były w laboratorium z użyciem prasy zyratorowej, z której zaformowane próbki zostały poddane badaniom wytrzymałości na rozciąganie przy roztopianiu oraz nasiąkliwości. Uzyskane wyniki pozwoliły na wytypowanie najkorzystniejszych rozwiązań, które zostały zrealizowane w skali przemysłowej w zakładzie produkcyjnym. Wpływ zastosowanych cementów niskoemisyjnych określono, badając dla dwuwarstwowych kostek brukowych wytrzymałość na rozciąganie przy roztopianiu, odporność na działanie soli odładzających oraz nasiąkliwość.

Słowa kluczowe:

cementy niskoemisyjne, elementy wibroprasowane, beton, trwałość

Abstract

Vibro-pressed concrete elements form an important part of the precast market. The use of these products on horizontal surfaces exposed to cyclic freezing/thawing imposes high quality requirements on manufacturers. Manufacturers of these products face the challenge of using low-emission cements while ensuring all durability parameters of the finished elements.

The research programme involved investigating the effects of using low-emission cements in compositions with and without silica fly ash on the properties of the concrete used in production and the durability of the finished small-sized two-layer vibro-pressed elements. The cements used in the study were CEM I 42.5R, CEM II/B-V 42.5 R, CEM II/A-LL 52.5R, CEM II/B-M(V-LL) 42.5N and silica fly ash. Testing of the properties of the mix was carried out in the laboratory using a gyratory press, from which the moulded specimens were tested for split tensile strength and absorbability. The results obtained made it possible to select the most favourable solutions, which were implemented on an industrial scale in a production plant. The impact of the use of low-emission cements was determined by examining the split tensile strength, resistance to de-icing salts and absorbability.

Keywords:

low-emission cement, vibro-pressed elements, concrete, durability

lotnym krzemionkowym w betonie do warstwy konstrukcyjnej. Wymagania norm i specyfikacji technicznych oraz oczekiwania użytkowników elementów wibroprasowanych stawiają przed nimi wysokie wymagania jakościowe, tj. wytrzymałość na rozciąganie przy roztopianiu, mrozoodporność w obecności soli, nasiąkliwość itp. Obecnie do wymagań jakościowych dochodzi wyzwanie związane ze zmniejszaniem wpływu na środowisko stosowanych rozwiązań materiałowych, wyrażone głównie poprzez zmniejszenie śladu węglowego produkowanych wyrobów. Można to osiągnąć poprzez stosowanie cementów charakteryzujących się mniejszym śladem węglowym, np. CEM II/B, które zawierają większą ilość nieklinkierowych składników głównych. Betony wykonane z cementów zawierających nieklinkierowe składniki główne, takie jak popiół lotny, granulowany żużel wielkopiecowy, charakteryzują się stosunkowo wolnym, jak na potrzeby prefabrykacji, przyrostem wytrzymałości wczesnych [1 ÷ 3] oraz niższą odpornością na działanie cyklicznego zamrażania-odmrażania [1 ÷ 6]. Powyższe cechy odnoszą się głównie do betonów tradycyjnych, a nie wibroprasowanych. W przypadku technologii wibroprasowanej stosowany jest bardzo niski współczynnik wodno-cementowy i/lub obróbka cieplna (podwyższona temperatura i wilgotność) po procesie formowania elementów, co znacznie przyspiesza narastanie wytrzymałości wczesnej, zwłaszcza cementów o obniżonej zawartości klinkieru CEM II ÷ CEM VI i betonów z nich wykonanych [1, 2, 5, 6]. Trwałość betonu wibroprasowanego, utożsamiana głównie z odpornością na zamrażanie/rozmarzanie z udziałem soli odładzających, wyprodukowanego z cementów niskoklinkierowych nie jest w sposób dostateczny opisana w literaturze, zwłaszcza w przypadku stosowania cementów CEM II ÷ CEM VI, gdyż większość doświadczeń dotyczy betonu tradycyjnego. Powyższe czynniki stanowiły przyczynę do podjęcia opisanego w niniejszym artykule tematu badawczego, głównie pod kątem możliwości stosowania cementów z grupy CEM II.

1. Wstęp

W produkcji prefabrykowanych elementów wibroprasowanych zazwyczaj stosuje się cementy portlandzkie CEM I lub cementy portlandzkie CEM II/A wysokich klas wytrzymałościowych ($\geq 42,5R$). Dodatkowym wymaganiem jest możliwość stosowania tych cementów w kombinacji z popiołem

Tabela 1. Właściwości fizyko-mechaniczne cementów

Właściwość	Jednostka	CEM I 42,5R	CEM II/A-LL 52,5R	CEM II/A-M (S-LL) 52,5N	CEM II/B-V 42,5R	CEM II/B-M (V-LL) 42,5N
Początek czasu wiązania	[min]	210	185	200	215	225
Wytrzymałość na ściskanie:						
– po 1 dniu	[MPa]	15,5	25,7	15,1	18,2	17,4
– po 2 dniach		25,6	37,9	28,0	30,4	30,1
– po 28 dniach		58,3	64,3	58,6	55,4	59,4
Wodoządnosc	[%]	27,3	30,6	30,3	29,4	28,8
Powierzchnia właściwa wg Blaine'a	[cm ² /g]	3650	5360	4550	5140	4860
Ilość nieklinkierowych składników głównych i drugorzędnych	[%]	0 ÷ 5	6 ÷ 20	6 ÷ 20	21 ÷ 35	21 ÷ 35

Składnik	CaO	Fe ₂ O ₃	SiO ₂	Al ₂ O ₃	MgO	SO ₃	Cl-	Na ₂ O	K ₂ O	Poz. n.	Str. pr.
CEM I 52,5R	62,58	4,15	19,31	5,02	1,72	2,78	0,048	0,18	0,63	0,91	2,67
CEM II/A-LL 52,5R	60,75	4,30	18,4	5,62	1,70	3,35	0,056	0,18	0,70	0,59	4,35
CEM II/A-M (S-LL) 52,5N	59,69	3,59	21,10	5,21	2,24	2,86	0,052	0,20	0,59	0,92	3,82
CEM II/B-V 42,5R	47,74	5,04	27,03	9,98	2,04	3,24	0,039	0,60	1,07	18,82	2,05
CEM II/B-M (V-LL) 42,5R	54,62	4,43	22,86	7,46	1,78	2,72	0,037	0,43	0,87	9,92	4,11

Tabela 2. Skład chemiczny cementów

poz. n. – pozostałość nierozpuszczalna; str. pr – strata prażenia

2. Materiały

W badaniach wykorzystano 5 rodzajów cementów wyprodukowanych w skali przemysłowej: cement portlandzki CEM I 42,5R (cement odniesienia), cement portlandzki wapienny CEM II/A-LL 52,5R, cement portlandzki wieloskładnikowy CEM II/A-M (S-LL) 52,5N, cement portlandzki popiołowy CEM II/B-V 42,5R oraz cement portlandzki wieloskładnikowy CEM II/B-M (V-LL) 42,5N, które różniły się rodzajem i sumaryczną ilością zastosowanych nieklinkierowych składników cementu. Skutkowało to różnicami we właściwościach fizycznych i mechanicznych, co przedstawiono w tabeli 1. Skład chemiczny cementów zestawiono w tabeli 1. W tabeli 2 przedstawiono skład chemiczny zastosowanych cementów.

Program badań był podzielony na 2 części: laboratoryjną i próbę przemysłową.

3. Badania laboratoryjne

3.1. Plan i metody badań laboratoryjnych

Celem badań laboratoryjnych było pokazanie wpływu rodzaju cementu na właściwości warstwy konstrukcyjnej. Zakres badań betonów laboratoryjnych obejmował:

– wytrzymałość na rozciąganie przy rozłupywaniu po 7 i 28 dniach wg PN-EN 1338 zał. F,

– nasiąkliwość po 28 dniach wg PN-EN 1338 zał. E. Składy betonów przedstawiono w tabeli 3. Zaprojektowano dwie serie receptur bez udziału popiołu i z udziałem popiołu, gdyż część laboratoryjna była skoncentrowana na określeniu właściwości betonów przeznaczonych do warstwy konstrukcyjnej elementów wibroprasowanych. Popiół lotny jest powszechnie stosowany jako składnik betonu do warstwy konstrukcyjnej. Ze względu na rodzaj cementu zróżnicowano ilość stosowanego w składzie betonu popiołu lotnego, tj. betony z cementami CEM I 42,5R i CEM II/A-LL 52,5R zawierały 70 kg/m³, a betony z cementami CEM II/B-V 42,5R i CEM II/B-M (V-LL) 42,5N zawierały 35 kg/m³. Różnica w ilości popiołu lotnego w składzie betonu wynikała z ilości nieklinkierowych składników głównych w zastosowanych cementach.

Ze względu na specyfikę produkcji betonowych elementów wibroprasowanych właściwości użyt-

Tabela 3. Skład betonów laboratoryjnych

Materiał	Źródło	CI42 (referencja)	CI42P (referencja z popiołem)	CIALL52	CIALL52P
CEM I 42,5 R	Górażdże	330	260	-	-
CEM II/A-LL 52,5 R	Górażdże	-	-	330	260
Popiół lotny krzemionkowy	-	-	70	-	70
Piasek 0/2	Błaszki	900	949	907	893
Piasek 0,8/2	Błaszki	-	-	-	-
Żwir 2/8	Błaszki	1004	1058	1011	996
Woda	Wodociągowa	139	141	140	140
Perpecel NF-600	Atlas	0,83	0,83	0,83	0,83
Materiał	Źródło	CIIBV42	CIIBV42P	CIIBM42	CIIBM42P
CEM II/B-V 42,5R	Górażdże	330	295	-	-
CEM II/B-M (V-LL) 42,5N	Górażdże	-	-	330	-
Popiół lotny krzemionkowy	-	-	35	-	35
Piasek 0/2	Błaszki	892	886	896	890
Piasek 0,8/2	Błaszki	-	-	-	-
Żwir 2/8	Błaszki	994	988	999	992
Woda	Wodociągowa	139	140	139	140
Perpecel NF-600	Atlas	0,83	0,83	0,83	0,83

kowe mieszanki betonowej do ich produkcji zwykle waliduje się na etapie prób przemysłowych w zakładzie produkcyjnym. Wynika to z niskiej wilgotności mieszanki betonowej, co powoduje, że osiągnięcie odpowiedniego stopnia zagęszczenia próbki tradycyjnymi metodami w skali laboratoryjnej jest problematyczne. Wpływ sposobu formowania mieszanki na stopień zagęszczenia próbki przedstawiono na rys. 1.

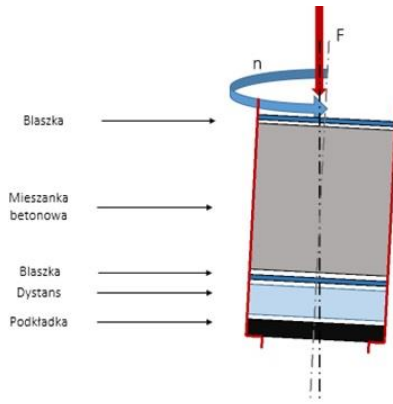
W związku z tym, w badaniach laboratoryjnych zastosowano prasę żyratorową (rys. 2a), która dzięki odpowiedniemu układowi sił w trakcie procesu formowania pozwala otrzymać próbki o podobnym stopniu zagęszczenia, jak wyroby uzyskane w procesie wibroprasowania w zakładzie produkcyjnym. Pozwala to na ocenę wpływu innych czynników, aniżeli stopień zagęszczenia, np. rodzaju i ilości cementu, stosu okruszowego kruszywa, rodzaju i ilości domieszki chemicznej



Rys. 1. Wpływ sposobu formowania na stopień zagęszczenia próbki. 1 – wibroprasowanie, 2 – stolik wibracyjny, 3 – prasa żyratorowa



Rys. 2. Prasa żyratorowa (a) i szkic procesu zagęszczenia próbki w prasie żyratorowej (b) (F- siła ściskająca, n – liczba obrotów na minutę wokół osi próbki)



na właściwości mieszanki i stwardniałego betonu. W prasie żyratorowej odpowiedni stopień zagęszczenia mieszanki uzyskuje się poprzez równoczesne zastosowanie siły ściskającej i ścinającej w osi pionowej próbki. Próbka umiejscowiona jest pod niewielkim kątem względem osi pionowej (rys. 2b). Taki układ sił powoduje ruch linii środkowej badanego elementu, który wytwarza stożkową powierzchnię żyracji, podczas gdy końce badanego elementu pozostają w przybliżeniu prostopadłe do osi pionowej powierzchni.

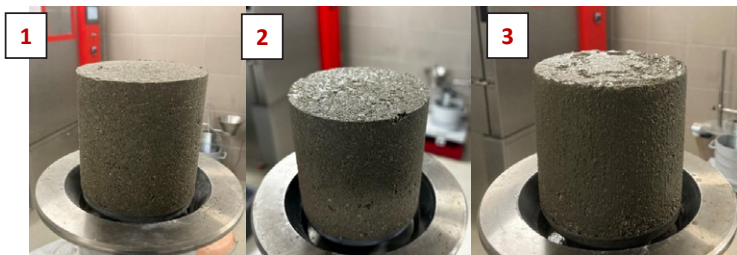
Tabela 4. Wartości parametrów prasy żyratorowej wg NT BUILD 427 [7]

Parametr	Wartość
Siła ściskająca F [kN]	1,26
Prędkość obrotowa [rpm]	60
Kąt nachylenia [deg]	2,28

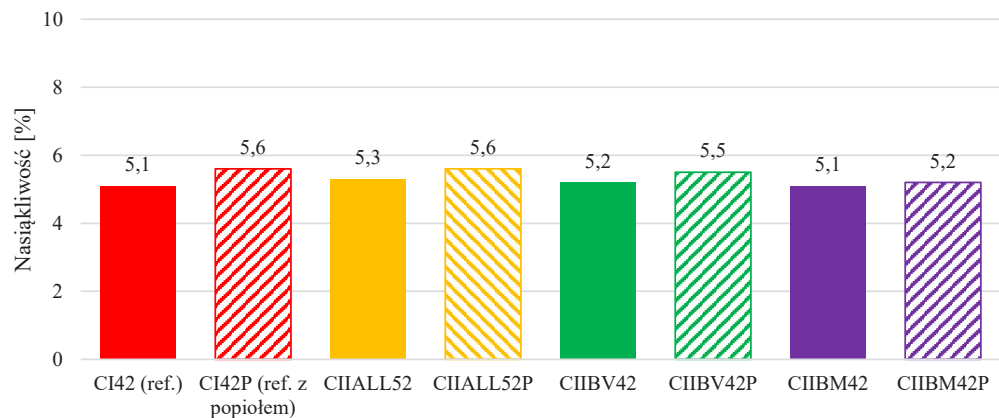
Prasa żyratorowa umożliwia regulację siły ściskającej F, prędkości obrotowej n oraz kąta nachylenia próbki względem osi pionowej. Jednakże najczęściej stosowanymi ustawieniami są te określone w skandynawskiej normie NT BUILD 427 (tabela 4) [7] i takie ustawienia przyjęto w niniejszej pracy.

Proces zagęszczenia próbki uznaje się za zakończony w momencie, gdy próbka osiągnie zadaną: wysokość,

Rys. 3. Wygląd próbki po zakończonym procesie formowania. 1 – za niską wilgotność; 2 – optymalna wilgotność; 3 – wysoka wilgotność



Rys. 4. Nasiąkliwość betonów laboratoryjnych po 28 dniach pielęgnacji (P – próbki z popiołem)



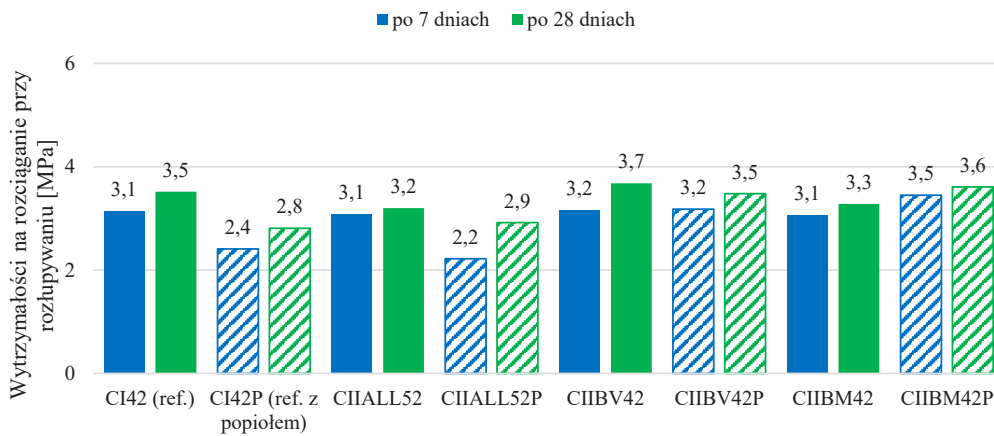
gęstość lub liczbę cykli (1 cykl = 1 obrót). W niniejszej pracy przyjęto, że proces zagęszczenia został uznany za zakończony w momencie, gdy urządzenie wykonało 100 cykli. Po procesie formowania na podstawie oceny wizualnej próbki określano optymalną wilgotność mieszanki. Zbyt niska spowodowałaby nieosiągnięcie przez mieszankę zadanych parametrów wytrzymałościowych. Z kolei zbyt wysoka zawartość wody prowadziłaby do deformacji kształtu wyrobu czy też generowałaby problemy produkcyjne w postaci podklejania stempla w urządzeniu wibroprasującym. Przykładowy wygląd próbki po zakończonym formowaniu przedstawiono na rys. 3. W trakcie formowania próbki w prasie żyratorowej rejestrowane były w czasie rzeczywistym także wartości gęstości, porowatości. Następnie po uformowaniu próbki pielęgnowano w temperaturze 20°C i wilgotności 95%. Ślad węglowy został obliczony przy wykorzystaniu oprogramowania „GCCA Industry EPD tool for cement and concrete” w wersji 4.0 opracowanego dla Global Cement and Concrete Association (GCCA). Narzędzie „GCCA Industry EPD tool for cement and concrete” jest internetowym narzędziem do tworzenia deklaracji środowiskowych (EPD) dla klinkieru, cementu, kruszyw, betonu i prefabrykatów betonowych. To narzędzie jest zgodne z wytycznymi zawartymi w normach:

- PN-EN 15804+A2:2020-03 „Zrównoważenie obiektów budowlanych – Deklaracje środowiskowe wyrobu – Podstawowe zasady kategoryzacji wyrobów budowlanych” [8],
- PN-EN 16908+A1:2022-08 „Cement i wapno budowlane – Deklaracje środowiskowe wyrobów – Zasady kategoryzacji wyrobów będące uzupełnieniem postanowień EN 15804” [9],
- PN-EN 16757:2023-04 „Zrównoważone podejście do obiektów budowlanych – Deklaracje środowiskowe wyrobu – Zasady dotyczące kategorii wyrobów w odniesieniu do betonu i elementów betonowych” [10].

Narzędzie GCCA Industry EPD tool for cement and concrete” jest narzędziem zweryfikowanym przez certyfikowaną jednostkę zewnętrzną. Wykorzystywane dane do obliczeń pochodzą z bazy danych ecoinvent v3.5. Prezentowane obliczenia obejmują etapy A1 ÷ A3 tj. „od kotłyski do bramy”.

3.2. Wyniki badań laboratoryjnych

Na rys. 4 przedstawiono wyniki badań nasiąkliwości badanych próbek laboratoryjnych bez i z dodatkiem popiołu lotnego. Nasiąkliwość betonów bez popiołu

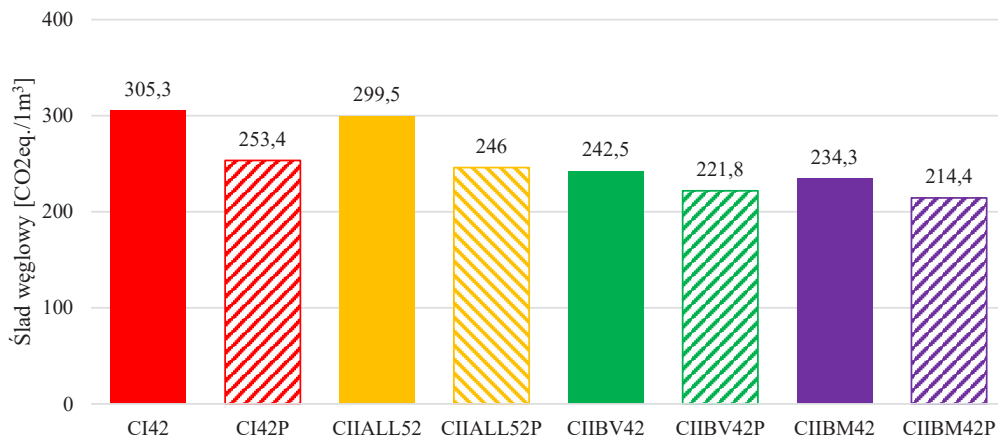


Rys. 5. Wytrzymałość na rozciąganie przy rozłupywaniu betonów laboratoryjnych (P – z popiołem)

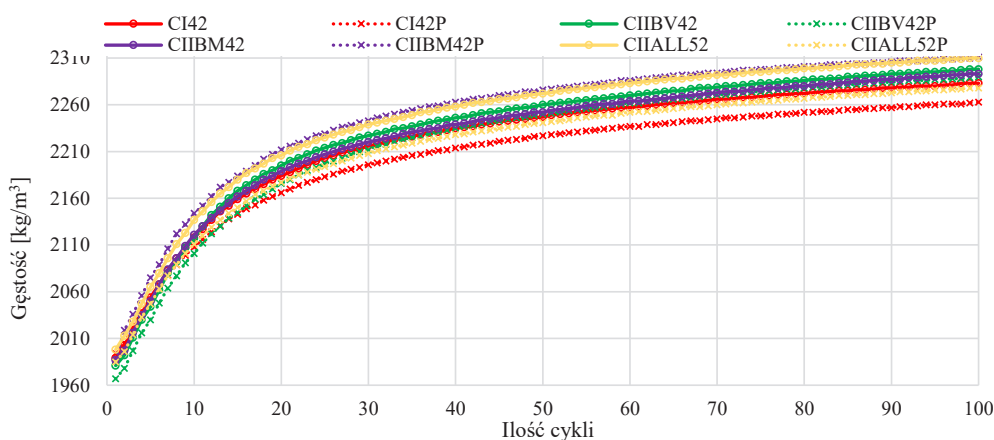
lotnego mieściła się w przedziale $5,1 \div 5,3\%$. Natomiast betony zawierające popiół lotny miały wyższą nasiąkliwość $5,2 \div 5,6\%$. Wszystkie betony spełniłyby wymagania dotyczące betonowych kostek brukowych klasy B wg PN-EN 1338 tj. $< 6,0\%$ [11]. Wyniki badań wytrzymałości na rozciąganie przy rozłupywaniu po 7 i 28 dniach przedstawiono na rys. 5. Próbkę bez dodatku popiołu uzyskały wytrzymałość po 7 dniach na zbliżonym poziomie $3,1 \div 3,2$ MPa (beton referencyjny 3,1 MPa), natomiast po 28 dniach dojrzewania różnice były nieznacznie większe $3,2 \div 3,7$ MPa (beton referencyjny 3,5 MPa). Natomiast w przypadku betonów, gdzie zastosowano popiół lotny krzemionkowy spodziewano się spadku wytrzymałości i tak było w przypadku betonów z cementami CEM I 42,5R oraz CEM II/A-LL 52,5R (dodatek popiołu 70 kg/m^3) odpowiednio 2,4 MPa i 2,2 MPa po 7 dniach pielęgnacji oraz 2,8 MPa i 2,9 MPa po 28 dniach pielęgnacji. Na-

tomiast w przypadku cementów CEM II/B-V 42,5R i CEM II/B-M (V-LL) 42,5N z mniejszą ilością popiołu lotnego krzemionkowego V (dodatek popiołu 35 kg/m^3) wytrzymałości były wyższe i wynosiły odpowiednio 3,2 MPa i 3,5 MPa po 7 dniach pielęgnacji oraz 3,5 MPa i 3,6 MPa po 28 dniach pielęgnacji. Może to wynikać z lepszego upakowania/zagęszczenia próbek ze względu na większą ilość kamienia wapiennego i popiołu lotnego pochodzącego ze składu cementu.

Zastosowanie cementów portlandzkich wieloskładnikowych CEM II/A, B, a zwłaszcza CEM II/B-V 42,5R oraz CEM II/B-M (V-LL) 42,5N pozwala przy podobnych właściwościach obniżyć ślad węglowy betonów o $21 \div 25\%$ (rys.6) w stosunku do cementu portlandzkiego CEM I 42,5R przy bardzo zbliżonych właściwościach wytrzymałościowych i nasiąkliwości. W przypadku cementu CEM II/A-LL 52,5R korzyść



Rys. 6. Emisyjność betonów wykonanych w próbie laboratoryjnej (P – beton z popiołem)



Rys. 7. Zmiana gęstości próbki w trakcie procesu formowania



Fot. 1. Kontrola wizualna wyprodukowanej betonowej kostki brukowej przed wejściem do komory dojrzewalnej (a) Komora dojrzewalnej z regulowaną wilgotnością i temperaturą dojrzewania betonu (b)

związana z obniżeniem śladu węglowego była niższa tylko ok. 5 kg/m³, co wynika z mniejszego udziału nieklinkierowych składników głównych oraz dużego stopnia przemiatu wymagającego znacznie większych ilości energii elektrycznej, która w Polsce pochodzi głównie ze spalania węgla. Cechą charakterystyczną cementu CEM II/A-LL 52,5R jest szybki przyrost wytrzymałości wczesnych, który nie był przedmiotem badań na tym etapie.

4. Próba przemysłowa

Dzięki uprzejmości i zaangażowaniu firmy DROG-BRUK A.P. Szczerek Sp. J., która posiada nowoczesne zaplecze technologiczne, możliwe było wyprodukowanie w skali przemysłowej dwuwarstwowej betonowej kostki brukowej. Producent do testów udostępnił linię produkcyjną wyposażoną w wibroprasę producenta HESS RH 1500-3VA z wykorzystaniem blatów Wasa Uniplast Ultra wzmocnionych mikrowłóknami. Zastosowanie w pełni kontrolowanego systemu vibracji oraz sily

prasowania zapewniło bardzo dobrą powtarzalność produkcji elementów betonowych metodą wibroprasowania. W przypadku firmy DROG-BRUK po wyprodukowaniu kostki zostały umieszczone w komorze dojrzewalnej na okres ok. 18 godz. przy wilgotności powietrza 85 ± 10% i temperaturze 35 ± 5°C (Fot. 1), a następnie były składowane na niezadaszonym placu magazynowym.

4.1. Plan i metody badań przemysłowych

W skali przemysłowej zastosowano cement CEM II B-V 42,5R w produkcji betonowej kostki wibroprasowanej w warstwie fakturowej i konstrukcyjnej, gdzie warstwę konstrukcyjną wykonano w dwóch wariantach – bez i z udziałem popiołu lotnego krzemionkowego kat. A. Oprócz produkcji z użyciem cementu CEM II B-V 42,5R wykonana została również próba referencyjna z użyciem cementu, który jest używany w standardowej produkcji, tj. CEM II/A-M (S-LL) 52,5N wraz z dodatkiem popiołu lotnego krzemionkowego kat. A. Skład betonów przedstawiono w tabeli 5. Składy betonu zostały opracowane na podstawie prób laboratoryjnych z użyciem żyropyry opisanej wcześniej. Wykorzystano mieszankę o max. uziarnieniu do 8 mm, stosując płukany piasek kwarcowy 0-2 mm i żwir 2-8 mm. Mieszanka została zaprojektowana w klasie konsystencji V0 i z gęstością projektowaną na poziomie 2350 kg/m³. Dodatkowo wprowadzono nieznaczne korekty w ilości wody zarobowej wynikające z charakterystyki stosowanych spoiw. W celu poprawy właściwości mieszanki betonowej zastosowano również domieszki chemiczne przeznaczone do technologii wibroprasowanej:

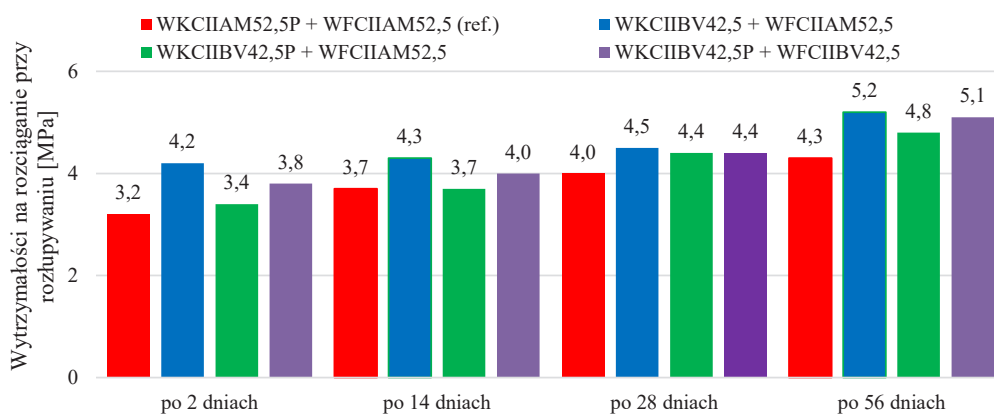
- w warstwie konstrukcyjnej ATLAS PERPECEL NF-600 – domieszka, która poprawia zwilżalność cementu i pozwala na dozowanie optymalnej ilości wody w betonie o konsystencji wilgotnej,
 - w warstwie fakturowej ATLAS ANGUCEL ES-201 – domieszka hydrofobizująca ograniczająca ryzyko wystąpienia wykwitów węglanowych.
- Plan badań kostek brukowych wyprodukowanych w próbie przemysłowej był następujący:
- wytrzymałość na rozciąganie przy rozłupywaniu wg PN-EN 1338:2005, zał. F po 2, 14, 28 i 56 dniach dojrzewania,

Fot. 2. Schemat pobierania próbek do badań



Tabela 5. Skład betonów w próbie przemysłowej

Materiał	Źródło	Warstwa konstrukcyjna (WK)			Warstwa fakturowa (WF)	
		WKCIAM52 (ref.)	WKCIIBV42	WKCIIBV42P	WFCIAM52 (ref.)	WFCIIBV42
CEM II/A-M (S-LL) 52,5N	Górażdże	260	-	-	450	-
CEM II/B-V 42,5 R	Górażdże	-	330	295	-	470
Popiół lotny krzemionkowy	-	70	-	35	-	-
Piasek 0/2	Błaszki	950	892	886	1550	1500
Żwir 2/8	Błaszki	1050	994	988	-	-
Woda	Wodociągowa	119	119	119	130	140
Domieszka Perpecel NF-600	Atlas	0,83	0,83	0,83	-	-
Domieszka Angucel ES-201	Atlas	-	-	-	4,5	4,7



Rys. 8. Wytrzymałość na rozciąganie przy rozłupywaniu kostek brukowych z próby przemysłowej (P – z popiołem)

- odporność na ścieranie metodą szerokiej tarczy wg PN-EN 1338:2005, zał. G po 28 dniach dojrzewania,
- nasiąkliwość kostki brukowej wg PN-EN 1338:2005, zał. E po 28 i 56 dniach dojrzewania,
- odporność kostki brukowej na zamrażanie/rozmarzanie z udziałem soli odladzającej wg PN-EN 1338:2005, zał. D po 28 dniach dojrzewania (wyniki nie zostały zaprezentowane – badania w trakcie wykonywania).

Na fot. 2 przedstawiono schemat wyboru próbek do badań z blatu produkcyjnego.

4.2. Wyniki badań z próby przemysłowej

Na rys. 8 i 9 przedstawiono odpowiednio wyniki badań wytrzymałości na rozciąganie przy rozłupywaniu i nasiąkliwości wyprodukowanej kostki brukowej. Już po 14 dniach dojrzewania wszystkie wyprodukowane kostki brukowe spełniały wymagania normy PN-EN 1338:2005 [11] w zakresie wytrzymałości na rozciąganie przy rozłupywaniu, tj. $\geq 3,6$ MPa. oraz nasiąkliwości tj. $\leq 6,0\%$. Odnosnie nasiąkliwości również wymaganie GDDKiA, tj. $\leq 5,0\%$ [12 ÷ 13], zostało spełnione. Potwierdza to możliwość stosowania cementu CEM II/B-V 42,5R z i bez dodatkowej ilości popiołu jako składnika betonu do produkcji warstwy konstrukcyjnej kostki brukowej, co korzystnie wpływa na obniżenie śladu węglowego (rys. 10). Wyniki badania ścieralności kostek (tabela 6), a w zasadzie warstwy fakturowej, wykonanych z cementu referencyjnego CEM II/A-M (S-LL) 52,5N oraz cementu CEM II/B-V 42,5R pokazały spełnienie wymagań normy PN-EN 1338:2005 dla kategorii I (najostrzejszej), co jest pozytywnym aspektem w kontekście stoso-

Tabela 6. Ścieralność wyprodukowanej kostki brukowej

Ścieralność		
Wymagania normy PN-EN 1338:2005 dla kategorii I [8]	WKCIIAM52,5P + WFCIIAM52,5 (ref.)	WKCIIBV42,5P + WFCIIBV42,5
Ścieralność na szerokiej tarczy ścierniej zał. G ≤ 20 mm	18,8 mm	19,3 mm
Ścieralność na tarczy Boehmego zał. H $< 18\ 000$ mm ³ /5 000 mm ²	10 997 mm ³ /5 000 mm ²	14 790 mm ³ /5 000 mm ²

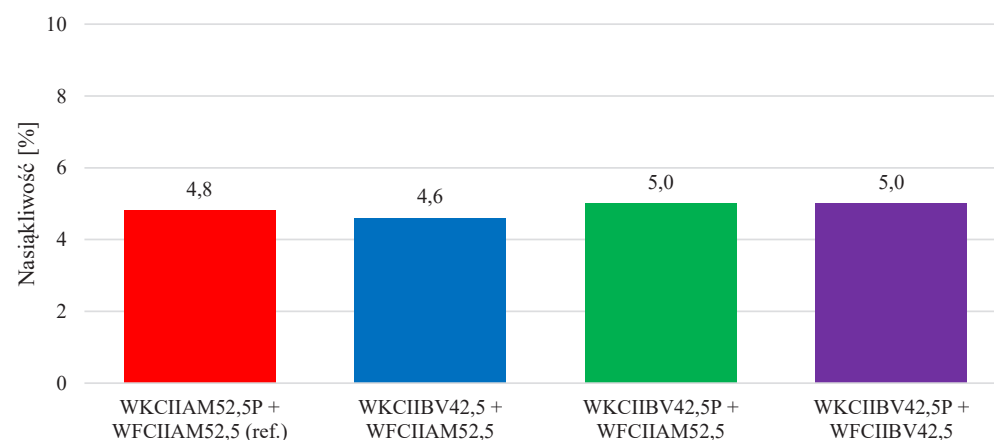
Tabela 7. Odporność kostki brukowej na zamrażanie/rozmarzanie z udziałem soli odladzających

Ubytek masy		
Wymagania normy PN-EN 1338:2005 dla kategorii D [8]	WKCIIAM52,5P + WFCIIAM52,5 (ref.)	WKCIIBV42,5P + WFCIIBV42,5
Ubytek masy na jednostkę powierzchni $\leq 1,0$ kg/m ²	0,02 kg/m ²	0,06 kg/m ²

wania tego cementu w warstwie fakturowej kostki brukowej. Badania odporności kostki brukowej na cykliczne zamrażanie/rozmarzanie w obecności soli odladzającej dały pozytywne wyniki dla obu zastosowanych cementów dla kategorii D (tab. 7)

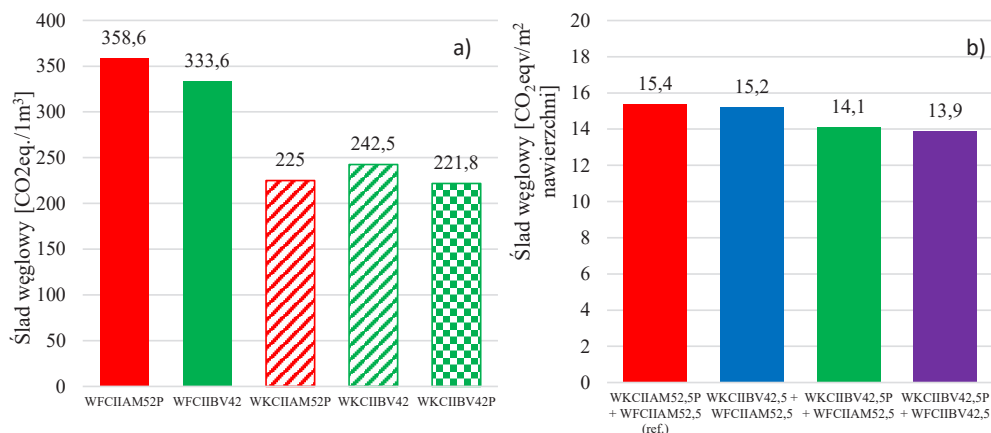
5. Podsumowanie i wnioski

Stosowanie cementów portlandzkich wieloskładnikowych CEM II/A, B, np. CEM II/B-V 42,5R, pozwala ograniczyć ślad węglowy związany z produkcją elementów wibroprasowanych przy zachowaniu zbliżonych właściwości użytkowych w porównaniu do cementu portlandzkiego CEM I, co jest zgodne z filozofią zrównoważonego rozwoju i ideą gospodarki w obiegu zamkniętym. Z pewnością cementy CEM II/A, B mogą stanowić pełnoprawny zamiennik cementów portlandzkich CEM I w składzie betonu do



Rys. 9. Nasiąkliwość kostek brukowych z próby przemysłowej po 28 dniach pielęgnacji (P – próbki z popiołem)

Rys. 10. Ślad węglowy: 1 m³ betonu (a), 1 m² powierzchni kostki brukowej (b)



warstwy konstrukcyjnej elementów wibroprasowanych. Natomiast możliwość ich stosowania w przypadku warstwy fakturowej ogranicza się głównie do cementów CEM II/A, np. do opisywanego cementu CEM II/A-M (S-LL) 52,5N. W tym przypadku czynnikiem decydującym jest odporność na zamrażanie/rozmarzanie z udziałem soli odladzającej. Wyniki badań potwierdzają spełnienie wymagań pod kątem oceny odporności zamrażanie/rozmarzanie z udziałem soli odladzających dla obu cementów zastosowanych w warstwie fakturowej. Należy zachować szczególną uwagę w przypadku stosowania cementów z grupy CEM II/B w warstwie fakturowej przy produkcji elementów prefabrykowanych w okresie obniżonych temperatur, np. w okresie wiosny i jesieni. Obniżona temperatura, w której dojrzewają gotowe składowane na placu elementy, może być przyczyną wydłużenia procesu hydratacji i może skutkować obniżeniem i/lub brakiem odporności na cykliczne zamrażanie/rozmarzanie w obecności soli odladzających warstwy fakturowej.

mgr inż. Michał Oleksik
mgr inż. Arkadiusz Ignerowicz
mgr inż. Arkadiusz Fornal
Atlas Sp. z o.o.
dr inż. Maciej Batóg
mgr inż. Jakub Bakalarz
Centrum Technologiczne Betotech Sp. z o.o.
mgr inż. Wioletta Wojtkiewicz
DROG-BRUK A.P. Szczerek Sp.J.

Literatura

1. Giergiczny Z., Małolepszy J., Szwabowski J., Śliwiński J.: *Cementy z dodatkami mineralnymi w technologii betonów nowej generacji*. Wydawnictwo Instytut Śląski Sp. z o.o., Opole, 2002
2. Deja J.; Marek Gawlicki, Zdzisław B. Kohutek, Łukasz Kotwica, Artur Łagosz, Radosław Mróz, Waldemar Pichór. *Beton: technologie i metody badań*, Stowarzyszenie Producentów Cementu, 2020. — 938.
3. Müller C., *Performance of Portland-composite cements*, *Cement International*, Nr 2, 2006, s. 112-119
4. Giergiczny Z., Sokołowski M.: *Cement portlandzki wapienny CEM IIIA-LL 42,5R w prefabrykacji*, *Materiały Budowlane*, nr 11, 2008, s. 9-11
5. Batóg M., Bakalarz J., Synowiec K., Dziuk D., *Stosowanie cementów wieloskładnikowych w budownictwie*, *Budownictwo, Architektura Technologie*, nr 3/2022
6. Z. Giergiczny, „Popiół lotny w składzie cementu i betonu”, *Wydawnictwo Politechniki Śląskiej*, 2013

7. *NT BUILD 427 Concrete, fresh: Compactibility with ic-tester (intensive compaction tester)*
8. *PN-EN 15804+A2:2020-03 „Zrównoważenie obiektów budowlanych – Deklaracje środowiskowe wyrobu – Podstawowe zasady kategoryzacji wyrobów budowlanych”*
9. *PN-EN 16908+A1:2022-08 „Cement i wapno budowlane – Deklaracje środowiskowe wyrobów – Zasady kategoryzacji wyrobów będące uzupełnieniem postanowień EN 15804”*
10. *PN-EN 16757:2023-04 „Zrównoważone podejście do obiektów budowlanych – Deklaracje środowiskowe wyrobu – Zasady dotyczące kategorii wyrobów w odniesieniu do betonu i elementów betonowych”*
11. *PN-EN 1338:2005 „Betonowe kostki brukowe – Wymagania i metody badań”*
12. *Generalna Dyrekcja Dróg Krajowych i Autostrad, Specyfikacje techniczne wykonania i odbioru robót budowlanych D.05.03.23. Nawierzchnia z kostki brukowej betonowej*, <https://www.archiwum.gddkia.gov.pl/pl/d/d47ee977002f113fc8533e54c6ad4a80> (dostęp 1.06.2023)
13. *Generalna Dyrekcja Dróg Krajowych i Autostrad, Warunki wykonania i odbioru robót budowlanych D-08.01.01 v02 Krawężniki betonowe*, Warszawa 22 lutego 2022

Prezentacja powyższego referatu, którą przygotował Michał Oleksik z firmy ATLAS, uzyskała największą liczbę głosów w aplikacji mobilnej od uczestników XII konferencji DNI BETONU.

Nagrodą dla autora najlepszej prezentacji jest bezpłatny udział w kolejnej XIII konferencji DNI BETONU, która w dniach 13-15 października 2025 r. odbędzie się w Wiśle. Gratulujemy!

