

inż. Kamil Fiks, ATLAS Sp. z o.o., Pion Domieszek do Betonu,
mgr inż. Patryk Kucharski, ATLAS Sp. z o.o., Pion Domieszek do Betonu,
mgr inż. Arkadiusz Ignierowicz, ATLAS Sp. z o.o., Pion Domieszek do Betonu,
mgr inż. Michał Oleksik, ATLAS Sp. z o.o., Pion Domieszek do Betonu,

Zastosowanie cementów niskoemisyjnych w projektowaniu mieszanek betonowych w warunkach zimowych

The use of low-emission cements in the design of concrete mixtures in winter conditions

Streszczenie

Weryfikacja deklarowanych właściwości betonu następuje z reguły po 28 dniach jego dojrzewania lub po zastosowaniu czasu równoważnego zgodnie z uzupełnieniem krajowym normy PN-EN 206+A2:2021-08. Z uwagi na konieczność zachowania ciągłości robót oraz brak planowanych przerw roboczych, oczekiwania wobec betonu na placu budowy są zdecydowanie szybsze. Kontynuacja prac budowlanych w wielu przypadkach odbywa się po czasie od kilkunastu do kilkudziesięciu godzin od momentu ułożenia mieszanki betonowej. O ile w warunkach letnich spełnienie tych wymagań nie jest zbyt wymagające, o tyle w warunkach zimowych osiągnięcie odpowiedniego pułapu wytrzymałościowego we wczesnych etapach dojrzewania betonu jest trudne do uzyskania.

W referacie na przykładzie mieszanki o klasie wytrzymałości C20/25 przeznaczonej do stosowania w tzw. okresie letnim, pokazano wpływ obniżenia temperatury otoczenia dojrzewania betonu na rozwój wytrzymałości. Następnie poprzez liczne warianty modyfikacji składu mieszanki dokonano poprawy wytrzymałości wczesnych betonu.

Celem tej pracy jest zwrócenie uwagi na odpowiednie podejście do projektowania mieszanek betonowych uwzględniające zmienność warunków atmosferycznych wraz ze zmieniającymi się porami roku. Rozwiązania całoroczne mogą funkcjonować jedynie przy zachowaniu stałych parametrów otoczenia mieszanki tj. wilgotność, temperatura, nie pomijając oczywiście obowiązku pielęgnacji. Odstępstwa od tej zasady powinny być każdorazowo uwzględnione przez technologa w czasie procesu ustalania składu mieszanki.

Abstract

Verification of declared concrete properties typically occurs after 28 days of curing, or after an equivalent period in accordance with the national supplement to the PN-EN 206+A2:2021-08 standard. Due to the need to maintain work continuity and the lack of planned work breaks, expectations for concrete on site are significantly shorter. In many cases, construction work resumes several to several dozen hours after the concrete mix is poured. While meeting these requirements is not overly demanding in summer conditions, achieving the appropriate strength level in the early stages of concrete curing is difficult in winter conditions.

In this paper, using a C20/25 strength class mix intended for use in the summer, the effect of lowering the ambient temperature during concrete curing on strength

development was demonstrated. Subsequently, numerous modifications to the mix composition were used to improve the early strength of concrete.

The aim of this paper is to highlight the appropriate approach to designing concrete mixes, taking into account the variability of atmospheric conditions and the changing seasons. Year-round solutions can only function when maintaining constant ambient parameters, such as humidity and temperature, while also taking into account the maintenance requirements. Deviations from this rule should be considered by the technologist during the mix composition process.

1. Założenia projektowe – opis badań

Celem podjętych badań była ocena wpływu modyfikacji składów mieszanek na wytrzymałość na ściskanie stwardniałego betonu.

W badaniach wykorzystano następujące surowce:

- Piasek 0/2,
- Grys wapienny 2/8,
- Grys wapienny 8/16,
- CEM II/B-M(S-V) 42,5N,
- CEM II/A-LL 42,5R,
- Popiół lotny,
- Woda wodociągowa,
- ATLAS Primo LM-710,
- ATLAS Duruflo PE-821,
- ATLAS Ligocel AW-540,

Składy receptur zostały wybrane tak, aby opad stożka wynosił 130-150 mm (górna granica konsystencji S3, najczęściej spotykana na placu budowy) przy jednoczesnym zachowaniu warunku odpowiedniej urabialności, bez oznak segregacji oraz bleedingu mieszanki betonowej.

Próbki od razu po zaformowaniu trafiły do komory klimatycznej, której parametry robocze ustawiono na:

- Temperatura – 5°C,
- Wilgotność – 35%,

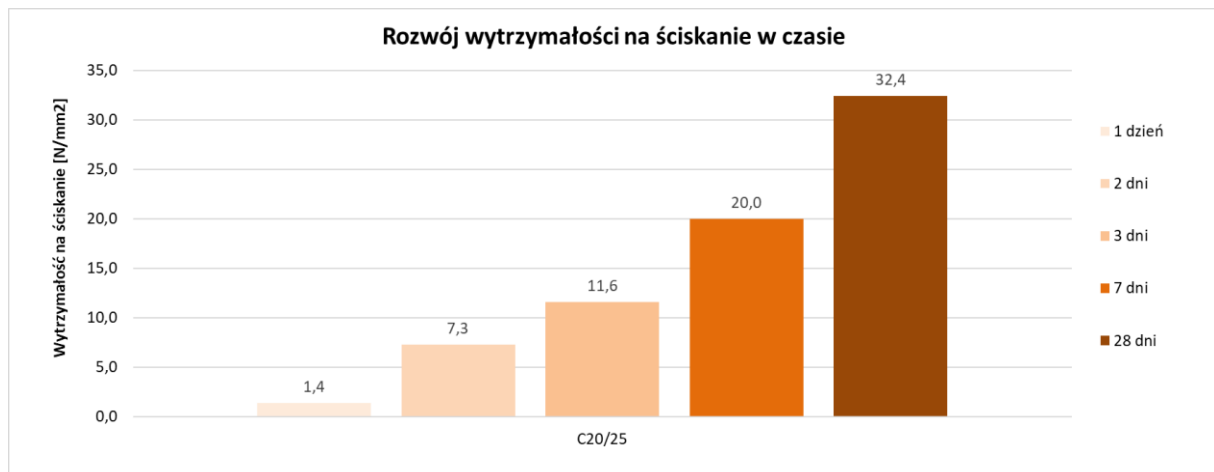
Część próbek opisanych w punkcie „2.6 Pielęgnacja”: była pielęgnowana poprzez obłożenie izolacją termiczną w postaci styropianu, oraz folią.

Punktem odniesienia była mieszanka C20/25 z przeznaczeniem do stosowania w okresie letnim [Tabela 1][Rys. 1]. Jedna jej wersja była pielęgnowana zgodnie z PN-EN 12390-2:2019-7, natomiast druga celem odwzorowania błędnego postępowania wielu producentów betonu, którzy nie dostosowują się do zmiennego klimatu i traktują swoje rozwiązania uniwersalnie korzystając z nich w ciągu całego roku, trafiła do komory klimatycznej (warunki opisane wyżej), gdzie została przykryta folią [Rys. 2]. Analizę wyników wytrzymałościowych ograniczono do pierwszych trzech dni dojrzewania betonu. Sugerowano się przy tym standardowymi wymaganiami budów co do konieczności zachowania ciągłości robót oraz kontynuacji prowadzenia prac budowlanych. Był to również wystarczający czas do uzyskania przez beton wzorcowy wytrzymałości krytycznej po której uzyskaniu beton osiąga pełną odporność na zamrożenie(dla CEM I wynosi 5MPa, dla CEM II – 8MPa, dla CEM III – 10MPa). Beton

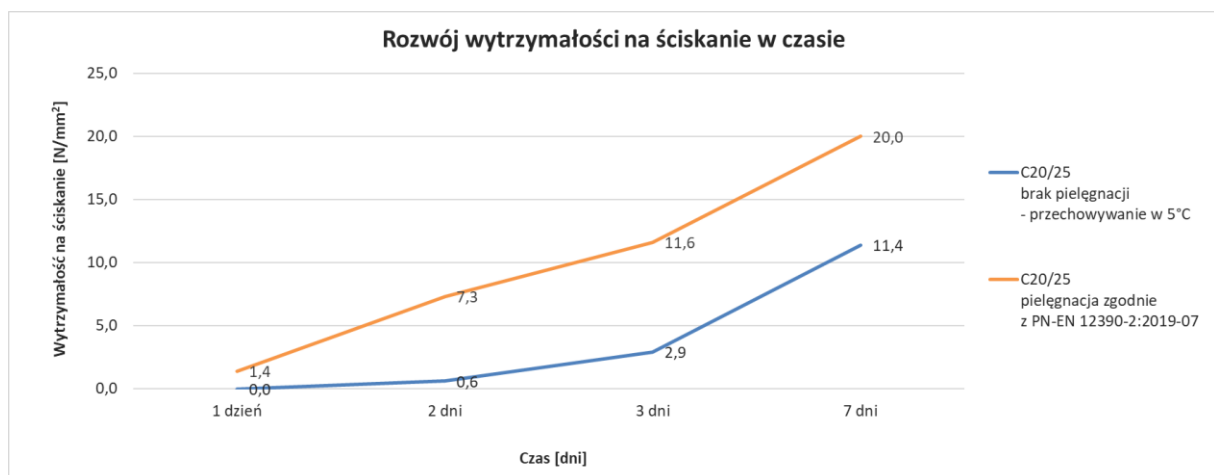
wzorcowy pielęgnowany zgodnie z normą uzyskał bezpieczną wartość pomiędzy 2, a 3 dniem dojrzewania, podczas gdy ten sam beton przechowywany w 5°C bez pielęgnacji granicę 8MPa osiągnął 4 dni później[Rys. 2]. W punkcie „2. Modyfikacje mieszanki – badania i dyskusja wyników” poprzez liczne zmiany w składzie mieszanek dokonano próby poprawy właściwości wytrzymałościowych betonów dojrzewających w komorze klimatycznej

Tabela 1. Składy mieszanki betonowej C20/25

Składniki	Ilość [kg/m ³]	
Piasek 0/2	750	
Grys wapienny 2/8	485	
Grys wapienny 8/16	520	
CEM II/B-M(S-V) 42,5N	250	
Popiół lotny	80	
Woda całkowita	181	
ATLAS Primo LM-710	0,60%	1,98
ATLAS Duruflow PE-821	0,30%	0,99



Rys. 1. Zestawienie wyników wytrzymałości na ściskanie



Rys. 2. Zestawienie wyników wytrzymałości na ściskanie w zależności od rodzaju przechowywania próbek

Skutki zamrożenia świeżego betonu zależą od okresu, w którym beton ulegnie zamrożeniu. Wydziela się cztery okresy dojrzewania betonu:

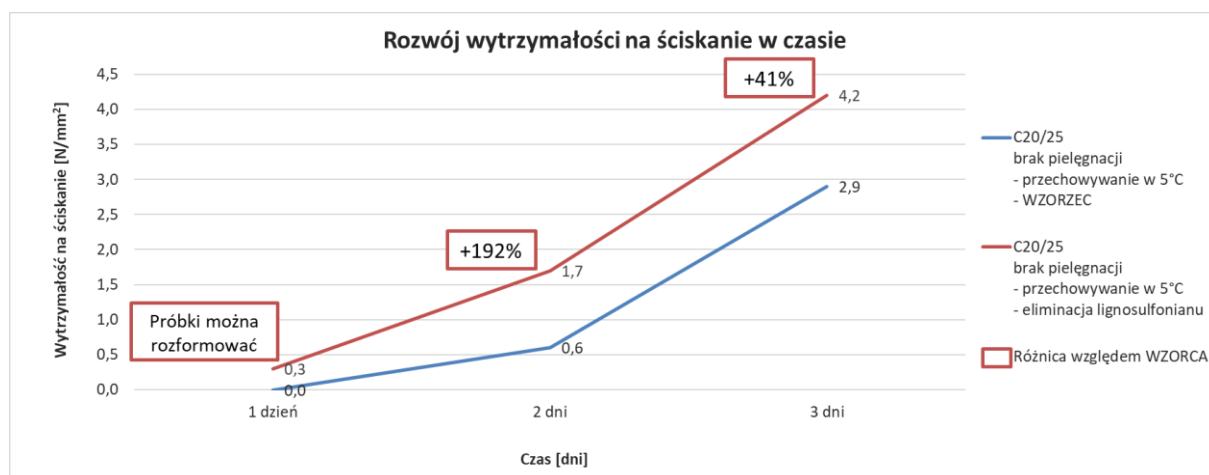
- okres I – przed początkiem wiązania zamrożenie jest stosunkowo mało szkodliwe, chociaż nie pozostaje bez wpływu na wytrzymałość końcową betonu. Następuje zahamowanie wiązania, ale po rozmrożeniu procesy wiązania i twardnienia rozpoczynają się na nowo.
- okres II – po rozpoczęciu wiązania zamrożenie betonu w tym okresie może całkowicie zniszczyć jego strukturę. Największe szkody wskutek zamrożenia występują przed zakończeniem procesu wiązania.
- okres III – po zakończeniu wiązania zamrożenie betonu w tym okresie może całkowicie zniszczyć jego strukturę.
- okres IV – po osiągnięciu tzw. wytrzymałości krytycznej zamrożenie po osiągnięciu wytrzymałości krytycznej nie powinno skutkować zniszczeniem betonu. Beton chroniony do uzyskania wytrzymałości krytycznej jest w stanie osiągnąć założoną wytrzymałość.

2. Modyfikacje mieszanki – badania i dyskusja wyników

2.1. Eliminacja lignosulfonianu

Tabela 2. Składy mieszanek betonowych (modyfikacja mieszanki-eliminacja lignosulfonianu)

Składniki	Oznaczenie zarobu			
	C20/25 brak pielęgnacji - przechowywanie w 5°C - WZORZEC		C20/25 brak pielęgnacji - przechowywanie w 5°C - eliminacja lignosulfonianu	
	Ilość [kg/m³]			
Piasek 0/2	750		751	
Grys wapienny 2/8	485		485	
Grys wapienny 8/16	520		520	
CEM II/B-M(S-V) 42,5N	250		250	
Popiół lotny	80		80	
Woda całkowita	181		181	
ATLAS Primo LM-710	0,60%	1,98	-	-
ATLAS Duruflo PE-821	0,30%	0,99	0,60%	1,98



Rys. 3. Zestawienie wyników wytrzymałości na ściskanie w zależności od przyjętej modyfikacji mieszanki (eliminacja lignosulfonianu)

Jednym z najprostszych zabiegów poprawy wytrzymałości wczesnych jest eliminacja domieszki uplastyczniającej na bazie lignosulfonianu. Produkt który z jednej strony odpowiedzialny jest za poprawę urabialności mieszanki betonowej, ułatwia jej wbudowanie, rozprowadzenie i zagęszczenie, z drugiej natomiast jest nośnikiem naturalnie występującego w nim cukru, mającego działanie opóźniające proces hydratacji. Po usunięciu wspomnianej domieszki ze składu mieszanki zdecydowaną różnicę widać już po pierwszym dniu, kiedy to próbki mogły zostać rozformowane w przeciwieństwie do tych zamierzających lignosulfonian [Rys. 3]. Błędem będzie jednak pojmowanie domieszek uplastyczniających jako tych opóźniających wiązanie. Zgodnie

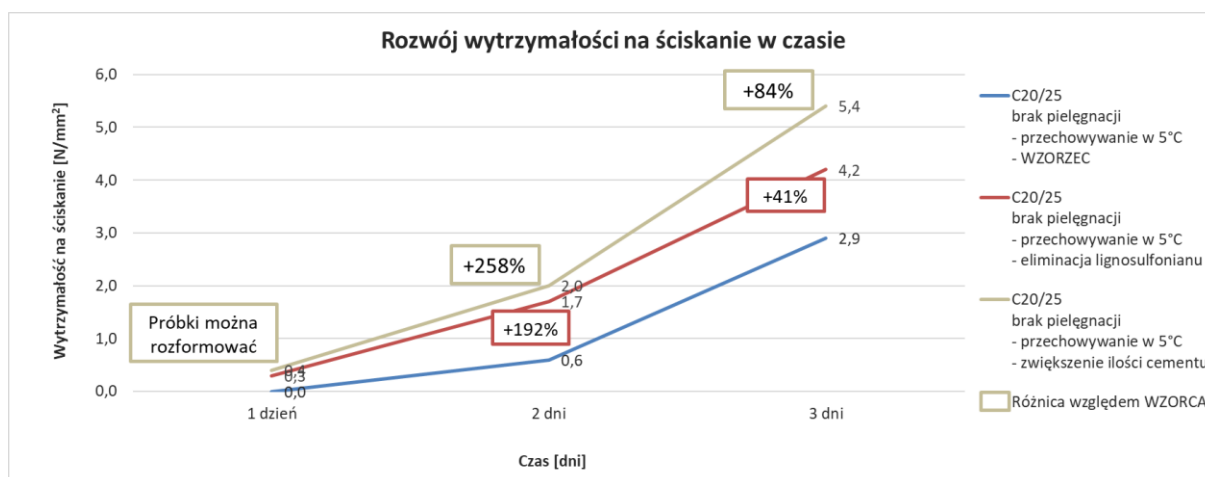
z PN-EN 934-2:2009+A1:2012 muszą one redukować wodę o co najmniej 5%, przy jednoczesnej poprawie wytrzymałości o nie mniej niż 110% względem mieszanki kontrolnej nie zawierającej domieszki [1].

Należy zatem pamiętać że dla zachowania odpowiednich właściwości reologicznych mieszanki betonowej po wyeliminowaniu plastyfikatora należy dokonać odpowiedniej korekty dozowania domieszki upłynniającej. Przy zaniechaniu tego zabiegu, brak konsystencji zapewne zostanie powiązany z koniecznością użycia większej ilości wody co z kolei doprowadzi do sytuacji odwrotnej od zamierzonej – uzyskany zostanie niższy wynik wytrzymałości na ściskanie zarówno wczesnej jak i końcowej.

2.2. Zwiększenie ilości cementu

Tabela 3. Składy mieszanek betonowych (modyfikacja mieszanki-zwiększenie ilości cementu)

Składniki	Oznaczenie zarobu					
	C20/25 brak pielęgnacji - przechowywanie w 5°C - WZORZEC		C20/25 brak pielęgnacji - przechowywanie w 5°C - eliminacja lignosulfonianu		C20/25 brak pielęgnacji - przechowywanie w 5°C - zwiększenie ilości cementu	
	Ilość [kg/m³]					
Piasek 0/2	750		751		755	
Grys wapienny 2/8	485		485		488	
Grys wapienny 8/16	520		520		523	
CEM II/B-M(S-V) 42,5N	250		250		280	
Popiół lotny	80		80		50	
Woda całkowita	181		181		181	
ATLAS Primo LM-710	0,60%	1,98	-	-	-	-
ATLAS Duruflo PE-821	0,30%	0,99	0,60%	1,98	0,65%	2,15



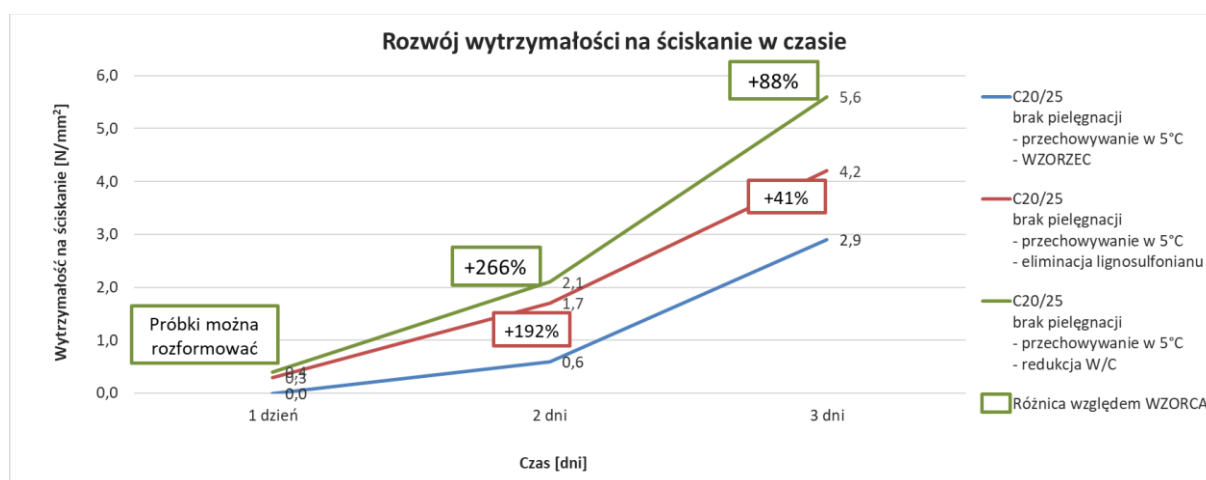
Rys. 4. Zestawienie wyników wytrzymałości na ściskanie w zależności od przyjętej modyfikacji mieszanki (zwiększenie ilości cementu)

Kolejnym często spotykanym sposobem na przeprojektowanie mieszanki stosowanej w „okresie letnim” na tę wykorzystywaną w warunkach zimowych jest zwiększenie ilości cementu. Zazwyczaj różnica wynosi ok 20-30kg/m³. W przeprowadzonym projekcie dla zachowania tego samego współczynnika w/s, po zwiększeniu zawartości cementu, zmniejszono zawartość popiołu. Pomimo uzyskania tej samej ilości spoiwa, wprowadzone zmiany proporcji pomiędzy poszczególnymi składnikami mieszanki betonowej wpłynęły na konieczność zmiany dozowania domieszki upłynniającej. Przyjęta modyfikacja pozwoliła na poprawę właściwości trwałościowych nie tylko względem mieszanki wzorcowej (po 2 dniach wynik lepszy o 258%, po 3 dniach o 84%), ale także tej z której wyeliminowano lignosulfonian [Rys. 4]

2.3.Redukcja wskaźnika wodno-cementowego

Tabela 4. Składy mieszanek betonowych (modyfikacja mieszanki-redukcja W/C)

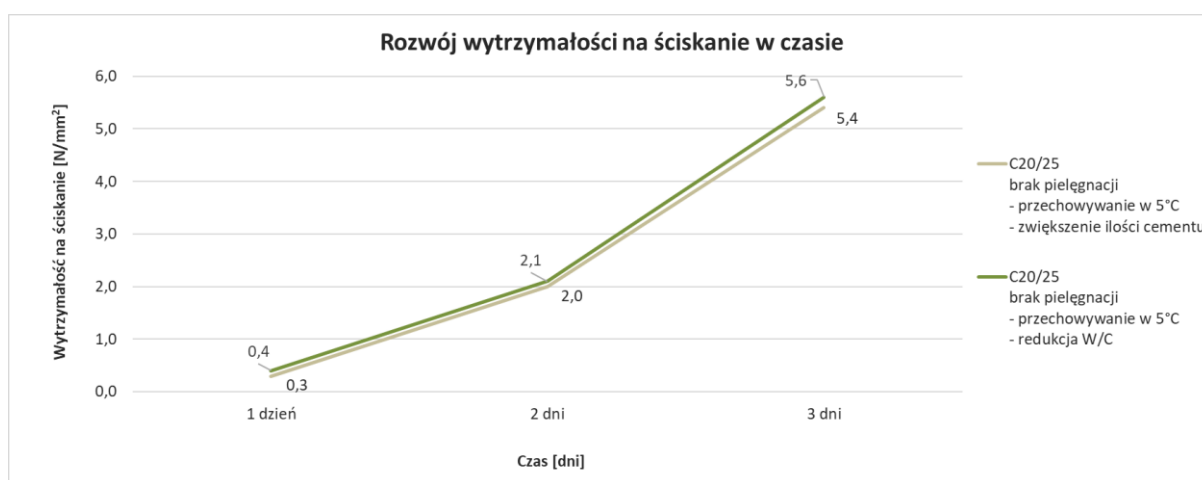
Tabela 1: Skład i mioczaniki betonowej (mioczanika mioczaniki redukcja W/C)						
Składniki	Oznaczenie zarobu					
	C20/25 brak pielęgnacji - przechowywanie w 5°C - WZORZEC		C20/25 brak pielęgnacji - przechowywanie w 5°C - eliminacja lignosulfonianu		C20/25 brak pielęgnacji - przechowywanie w 5°C - redukcja W/C	
	Ilość [kg/m ³]					
Piasek 0/2	750		751		763	
Grys wapienny 2/8	485		485		493	
Grys wapienny 8/16	520		520		529	
CEM II/B-M(S-V) 42,5N	250		250		250	
Popiół lotny	80		80		80	
Woda całkowita	181		181		169	
ATLAS Primo LM-710	0,60%	1,98	-	-	-	-
ATLAS DurufLOW PE-821	0,30%	0,99	0,60%	1,98	0,80%	2,64



Rys. 5. Zestawienie wyników wytrzymałości na ściskanie w zależności od przyjętej modyfikacji mieszanki (redukcja W/C)

Kolejna modyfikacja polegała na zmniejszeniu udziału ilościowego jednego ze składników. Tym razem przy stałej ilości cementu i popiołu korekcie uległo zużycie wody. Redukcja wskaźnika wodno-cementowego z 0,72 do 0,68 była możliwa poprzez zwiększenie dozowania domieszki do 0,80% m.s. przy jednoczesnym zachowaniu właściwości reologicznych.

2.3.1. Porównanie jakościowo-ekonomiczne modyfikacji zwiększającej ilość cementu z modyfikacją redukującą W/C



Rys. 6. Zestawienie wyników wytrzymałości na ściskanie w zależności od przyjętej modyfikacji mieszanki (zwiększenie ilości cementu vs redukcja W/C)

Wyniki dwóch poprzednich typów modyfikacji są bardzo zbliżone. Nie ma większego sensu wykazywania wyższości jednego rozwiązania nad drugim przy różnicach w wytrzymałościach rzędu 0,1-0,2MPa [Rys. 6]. Warto zatem zastanowić się, czy skoro jakościowo obie modyfikacje są na podobnym poziomie, to czy z kolei pod względem ekonomicznym, który jest równie istotny, zastosowanie którejś z nich nie będzie zasadniejsze? W tabeli numer 5 przedstawiono analizę kosztową omawianych mieszanek. Ceny przyjęte do kalkulacji są przykładowe. Będą one zależne od lokalizacji oraz czasu wykonania. Po przeprowadzeniu licznych symulacji danego przykładu, wynika z nich, że ekonomiczniejszym rozwiązaniem jest modyfikacja polegająca na redukcji wody. Plusem rozwiązania z większą ilością cementu będzie zapewne wyższa wytrzymałość po 28 dniach, jednak dla poprawy wytrzymałości wczesnych wystarczy drobny zabieg, a nie oferowanie wyższej klasy w cenie niższej.

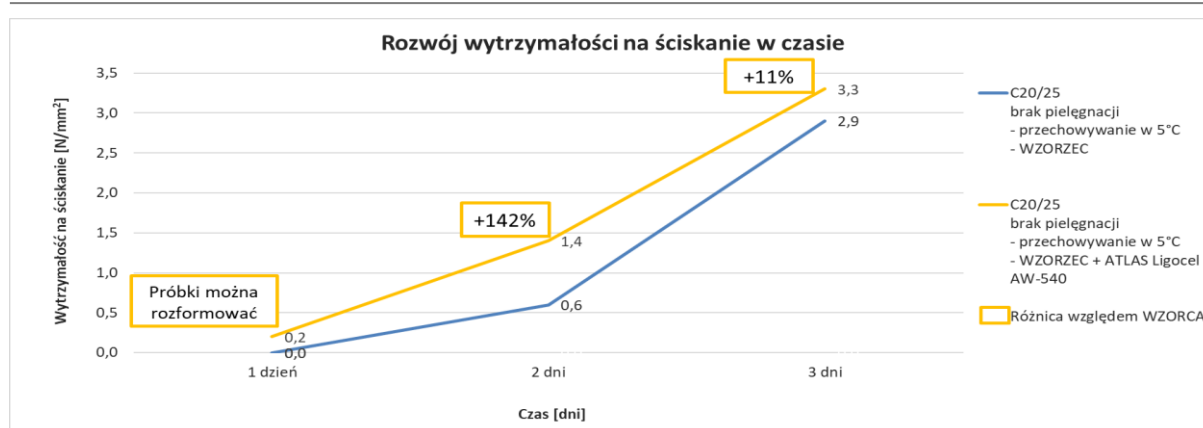
Tabela 5. Analiza kosztowa mieszanek betonowych (zwiększenie ilości cementu vs redukcja W/C)

Składnik	Cena [zł/kg]	Oznaczenie zarobu					
		C20/25 brak pielęgnacji - przechowywanie w 5°C - zwiększenie ilości cementu			C20/25 brak pielęgnacji - przechowywanie w 5°C - redukcja W/C		
		Ilość/Cena [kg]/[zł/m³]					
Piasek 0/2	0,025	755	18,88	763	19,08		
Grys wapienny 2/8	0,090	488	43,92	493	44,37		
Grys wapienny 8/16	0,090	523	47,07	529	47,61		
CEM II/B-M(S-V) 42,5N	0,500	280	140,00	250	125,00		
Popiół lotny	0,150	50	7,50	80	12,00		
Woda całkowita	0,001	181	0,18	169	0,17		
ATLAS Duruflo PE-821	4,00	0,65%	2,15	8,58	0,80%	2,64	10,56
Całkowity koszt [zł/m³]		266,13			258,78		
Różnica względem standardowej produkcji [zł]		x			-7,34		

2.4. Domieszka do betonu przyspieszająca wiązanie cementu

Tabela 6. Składy mieszanek betonowych (domieszka przyspieszająca wiązanie cementu)

Składniki	Oznaczenie zarobu			
	C20/25 brak pielęgnacji - przechowywanie w 5°C - WZORZEC		C20/25 brak pielęgnacji - przechowywanie w 5°C - WZORZEC + ATLAS Ligocel AW-540	
	Ilość [kg/m³]			
Piasek 0/2	750		751	
Grys wapienny 2/8	485		486	
Grys wapienny 8/16	520		521	
CEM II/B-M(S-V) 42,5N	250		250	
Popiół lotny	80		80	
Woda całkowita	181		178	
ATLAS Primo LM-710	0,60%	1,98	0,60%	1,98
ATLAS Duruflo PE-821	0,30%	0,99	0,30%	0,99
ATLAS Ligocel AW-540	0.00%	0.00	1.00%	3.30



Rys. 7. Zestawienie wyników wytrzymałości na ściskanie w zależności od przyjętej modyfikacji mieszanki (domieszka przyspieszająca wiązanie cementu)

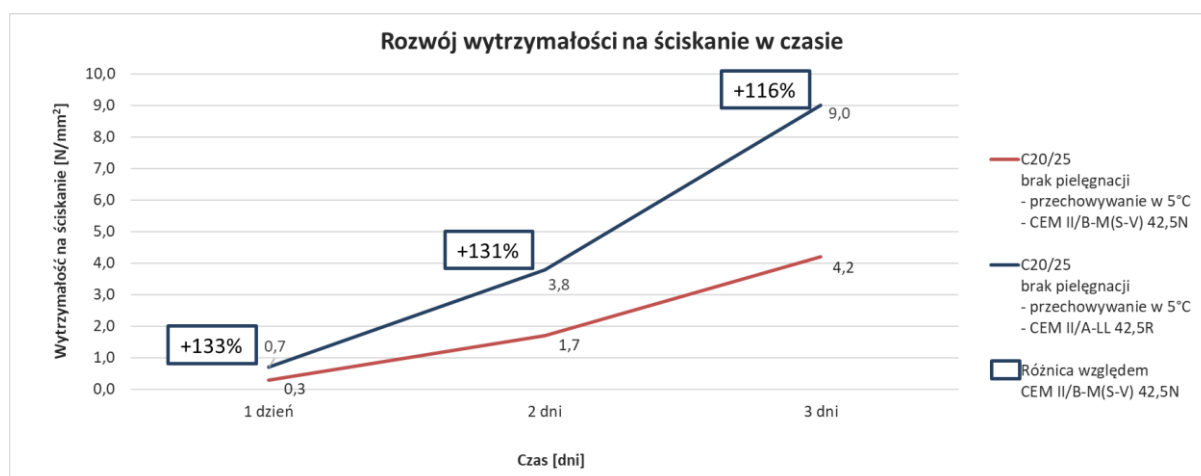
Jeżeli ma się dokonać roszada w zastosowaniu domieszek, to zdecydowanie bardziej popularnym rozwiązaniem od zwiększenia udziału superplastyfikatora prowadzącego do redukcji w/c jest wprowadzenie do składu mieszanki produktów dedykowanych do stosowania w warunkach zimowych. Mowa oczywiście o domieszkach przyspieszających wiązanie i/lub twardnienie cementu. W żargonie budowlanym produkty te nazywane są m.in. jako „mrozówki”, „zimówki” lub „przeciw mrozowe”. Być może to te określenia wraz z brakiem wiedzy oraz świadomości technologicznej doprowadzają do sytuacji, w których wykonawcy robót betoniarskich nie widzą zasadności pielęgnacji mieszanki z uwagi na zamówienie betonu z dodatkiem „zimowym”. Wspomniane domieszki przyspieszają hydratację cementu, pozwalają na uzyskanie wysokich wytrzymałości wczesnych oraz obniżają temperaturę zamarzania zaczynu cementowego, jednak nie zwalniają z obowiązku odpowiedniego opiekowania się mieszanką w początkowych etapach jej dojrzewania.

Efektywne działanie domieszki przyspieszającej wiązanie cementu w projekcie przedstawiono na najbardziej wymagającej próbie z wykorzystaniem plastyfikatora oraz superplastyfikatora. Dzięki zastosowaniu wspomnianego rozwiązania już po pierwszym dniu udało się rozformować próbki, natomiast różnica wytrzymałości pomiędzy porównywanymi betonami po 2 dniach wyniosła 142% [Rys. 7]. Prezentowany wzrost wytrzymałości wczesnych nie ma jednak przełożenia na wyższy wynik po 28 dniach. Poprawnym zabiegiem przy stosowaniu przyspieszacza wiązania cementu jest odjęcie od wody całkowitej w składzie mieszanki, ilości wody wprowadzonej wraz z domieszką.

2.5. Zmiana cementu

Tabela 7. Składy mieszanek betonowych (zmiana cementu)

Składniki	Oznaczenie zarobu			
	C20/25 brak pielęgnacji - przechowywanie w 5°C - CEM II/B-M(S-V) 42,5N		C20/25 brak pielęgnacji - przechowywanie w 5°C - CEM II/A-LL 42,5R	
	Ilość [kg/m³]			
Piasek 0/2	751		750	
Grys wapienny 2/8	485		485	
Grys wapienny 8/16	520		520	
CEM II/B-M(S-V) 42,5N	250		-	
CEM II/A-LL 42,5R	-		250	
Popiół lotny	80		80	
Woda całkowita	181		181	
ATLAS Duruflow PE-821	0,60%	1,98	0,60%	1,98



Rys. 8. Zestawienie wyników wytrzymałości na ściskanie w zależności od przyjętej modyfikacji mieszanki (zmiana cementu)

Uniwersalne rozwiązania całoroczne mogą znaleźć zastosowanie jedynie przy zachowaniu stałych parametrów otoczenia mieszanki tj. wilgotność, temperatura. W Polsce przy zmieniającym się sezonowo klimacie jest to niemożliwe. Można próbować poruszać się wokół pewnej grupy surowców sterując ich proporcjami, jednak może okazać się, że kolejne modyfikacje nie dają zamierzonego efektu.

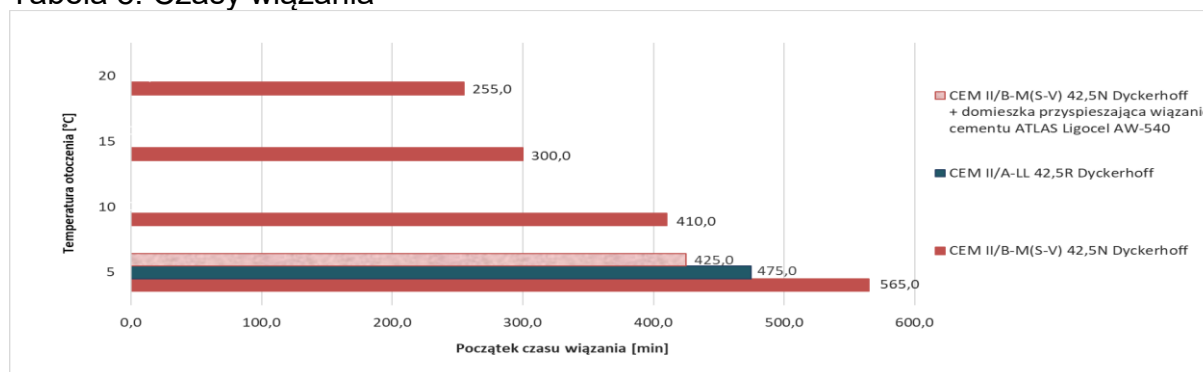
Zgodnie z PN-EN 197-1:2012 [2] - CEM II/B-M(S-V) 42,5N charakteryzuje się normalną wytrzymałością wczesną. Chcąc poprawić ten parametr poprzez zmianę cementu można obrać jedną z dwóch dróg. Pierwszą jest wybór cementu o wyższej klasie wytrzymałości normowej, w tym przypadku klasa 42,5 zostanie zamieniona na 52,5 (zmiana w obrębie tej samej wytrzymałości wczesnej – N). Drugą jest zmiana

cementu na szybszy – czyli z oznaczenia N, należy przejść na R. W wykonanym projekcie zastąpiono cement CEM II/B-M(S-V) 42,5N przez CEM II/A-LL 42,5R. Ruch ten sprawił pozostanie w grupie cementów portlandzkich wieloskładnikowych, których emisyjność CO₂ względem CEM I 42,5R jest na zdecydowanie niższym poziomie. Zamiana wspomnianych cementów pozwoliła na dwukrotne poprawienie wyników w analizowanym przedziale czasowym. Po raz pierwszy osiągnięto wytrzymałość krytyczną w porównywalnym czasie jak próba oznaczona jako „C20/25 – pielęgnacja zgodnie z normą PN-EN 12390-2:2019-7”[Rys. 2].

Przy wyborze cementu warto analizie poddać bardziej szczegółowe dane niż same oznaczenia liczbowo literowe. Różnica pomiędzy klasami wytrzymałości 42,5N, a 42,5R lub 42,5N, a 52,5N może być niewielka, co spowoduje, że oczekiwany efekt będzie daleki od otrzymanego rezultatu.

2.5.1. Czasy wiązania

Tabela 8. Czasy wiązania



By móc ocenić zasadność stosowania danego rodzaju cementu w określonych warunkach wykonano badania czasu wiązania. Z analizy wyników uzyskanych dla CEM II/B-M(S-V) 42,5N wynika, że wraz z obniżeniem temperatury o kolejne 5°C, początek czasu wiązania znacznie się wydłużał. Zamiana CEM II/B-M(S-V) 42,5N na CEM II/A-LL 42,5R pozwoliła przyspieszyć wiązanie w 5°C, o niemalże 100minut. Redukcja o kolejne 50 minut była możliwa dzięki zastosowaniu cementu żużlowo-popiołowego wraz z domieszką przyspieszającą jego wiązanie.

2.6. Pielęgnacja

Proces pielęgnacji dla każdego z technologów jest zwięźceniem prac związanych z zaprojektowaniem i wyprodukowaniem mieszanki betonowej. To od niego w dużej mierze będzie zależeć powodzenie projektu. O ile w warunkach laboratoryjnych nie jest ciężko spełnić wymagania normy PN-EN 12390-2:2019-07 mówiącej o poprawnym wykonaniu i pielęgnacji próbek do badań wytrzymałościowych [3], o tyle na placu budowy bywa różnie. O konieczności pielęgnacji wiedzą wszyscy, ale jeśli do niej dochodzi, to nie zawsze w sposób właściwy. Składa się na to wiele okoliczności. Pierwszą z nich jest to, że proces pielęgnacji przebiega poza głównym frontem betonowania, bez wpływu na postęp robót. Druga okoliczność to częste przekonanie kierownictwa robót do zasadności wykonywania dodatkowych czynności, przy jednoczesnym braku skrajnie szkodliwych warunków otoczenia jak mróz, upał, silny wiatr. Trzecia okoliczność jest konsekwencją dwóch pierwszych – do zajmowania się

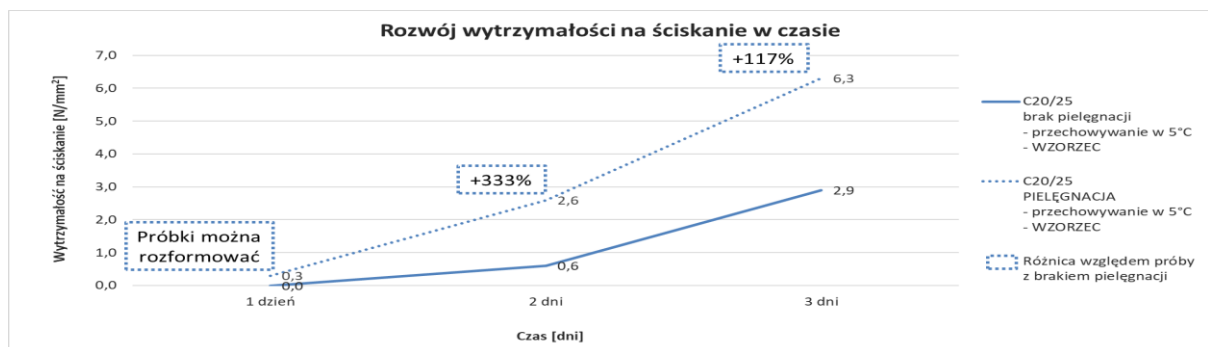
pielęgnacją betonu na budowach kierowani są zwykle przypadkowi robotnicy bez świadomości odpowiedzialności powierzonego im zadania[4].

W finalnym etapie tej pracy przedstawiono na wybranych modyfikacjach wpływ pielęgnacji na rozwój wytrzymałości na ściskanie próbek przechowywanych w komorze klimatycznej w 5°. Pielęgnowane próbki były obłożone izolacją termiczną w postaci styropianu, a następnie obłożone folią.

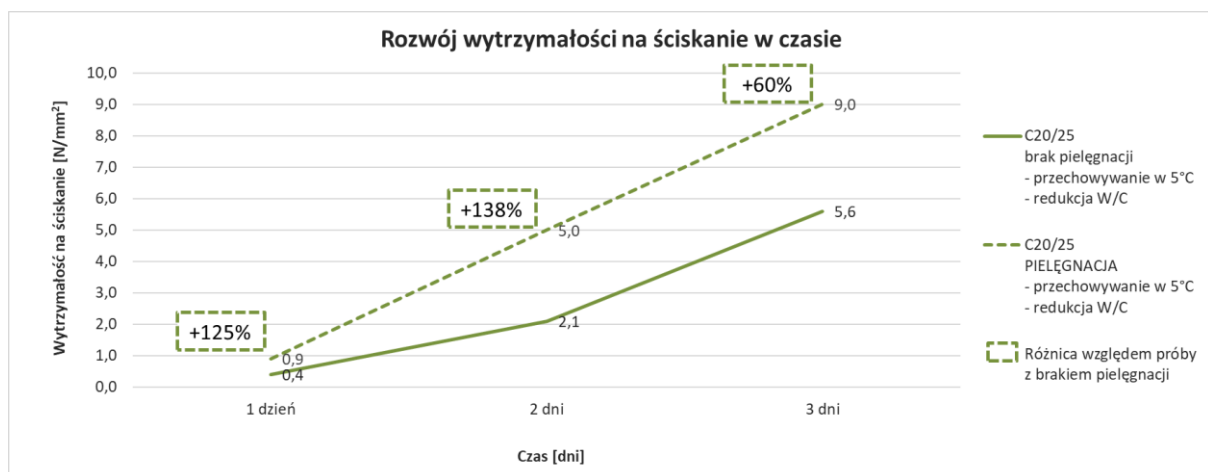
Na przykładzie próbek z mieszanki wzorcowej widać że sama pielęgnacja pozwala na ich rozformowanie pierwszego dnia. Następnie po 2 dniach wynik wytrzymałościowy jest 4-krotnie wyższy niż próbek nie pielęgnowanych (o 333% więcej), natomiast po 3 dniach 2-krotnie wyższy.

Dzięki procesowi pielęgnacji, próbie modyfikacji polegającej na redukcji w/c udało się osiągnąć wytrzymałość krytyczną (dla CEM II wynosi 8MPa) w porównywalnym czasie jak próba oznaczona jako „C20/25 – pielęgnacja zgodnie z normą PN-EN 12390-2:2019-7”[Rys. 2].

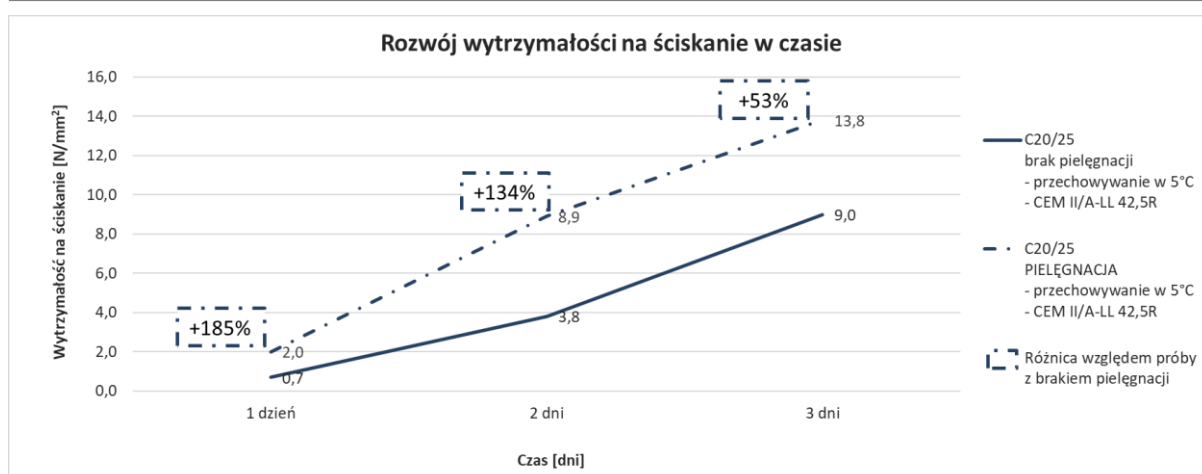
Próbki na CEM II/A-LL 42,5R, które zostały poddane pielęgnacji uzyskały najlepszy wynik wytrzymałościowy po 3 dniach spośród wszystkich wykonanych modyfikacji oraz względem „C20/25 – pielęgnacja zgodnie z normą PN-EN 12390-2:2019-7”[Rys. 2].



Rys. 9. Zestawienie wyników wytrzymałości na ściskanie w zależności od przyjętej modyfikacji mieszanki (pielęgnacja mieszanki wzorcowej)



Rys. 10. Zestawienie wyników wytrzymałości na ściskanie w zależności od przyjętej modyfikacji mieszanki (pielęgnacja mieszanki z redukcją w/c)



Rys. 11. Zestawienie wyników wytrzymałości na ściskanie w zależności od przyjętej modyfikacji mieszanki (pielęgnacja mieszanki wykonanej na CEM II/A-LL 42,5R)

3. Podsumowanie i wnioski

Metody dzięki którym beton może osiągnąć deklarowane właściwości, w trakcie prowadzenia prac w niskich, a nawet ujemnych temperaturach[5]:

- zmiana cementu w mieszance betonowej na wyższe klasy: np. 42,5; 52,5,
- zmiana cementu w mieszance betonowej z oznaczeniem „N” o normalnej wytrzymałości wczesnej, na „R”, cement o wysokiej wytrzymałości wczesnej,
- zwiększenie ilości cementu w m³,
- dodanie do mieszanki betonowej właściwych dla danej konstrukcji domieszek powodujących przyspieszenie wiązania i twardnienia mieszanki betonowej,
- zmniejszenie współczynnika W/C poprzez zastosowanie odpowiednich domieszek do mieszanki betonowej,
- podgrzewanie składników mieszanki betonowej(z wyjątkiem cementu) do odpowiedniej temperatury, w celu uzyskania określonej temperatury mieszanki betonowej, w chwili jej układania,
- osłanianie elementów lub całej konstrukcji materiałami ciepłochronnymi w celu zachowania ciepła w mieszance betonowej, ułożonej w deskowaniu lub w formie, przez okres niezbędny do uzyskania przez beton pełnej mrozoodporności,
- wykonanie robót betonowych w pomieszczeniach zamkniętych ogrzanych lub w ciepłakach stałych albo przesuwnych, chroniących przed mrozem i wiatrem.

4. Literatura

- [1] PN-EN 934-2+A1:2012 Domieszki do betonu, zaprawy i zaczynu – Część 2: Domieszki do betonu – Definicje, wymagania, zgodność, oznakowanie i etykietowanie
- [2] PN-EN 197-1:2012 Cement – Część 1: Skład, wymagania i kryteria zgodności dotyczące cementów powszechnego użytku
- [3] PN-EN 12390-2:2019-07 Badania betonu – Część 2: Wykonanie i pielęgnacja próbek do badań wytrzymałościowych

- [4] prof. Dr hab. Inż. Janusz Szwabowski, Aktualne problemy technologii robót betonowych, Monografie Technologii Betonu Dni Betonu
- [5] Lafarge, Betonowanie i pielęgnacja betonu w obniżonych temperaturach