

Politechnika Białostocka
Wydział Budownictwa i Inżynierii Środowiska

mgr inż. Krzysztof Falkowski

Właściwości kompozytów cementowych modyfikowanych emulsją bitumiczną

Autoreferat rozprawy doktorskiej
przygotowanej pod kierunkiem
prof. dr hab. inż. Michała Bołtryka
profesora zwyczajnego

Białystok 2018

Recenzenci:

Prof. zw. dr hab. inż. Józef Jasiczak

Dr hab. inż. Władysław Gardziejczyk, prof. PB

*„Beton ma swój charakter.
Może być – jak człowiek - wdzięczny i mściwy, wierny i zawodny, przyjacielski i kapryśny,
może chorować i dać się leczyć, może być jak mężczyzna surowy w wyglądzie i jak kobieta powabny.
Musimy go polubić ... będzie nam bowiem towarzyszył za oknem z betonu świat”.*

Z. Jamróży

1. Założenia wstępne, teza i cele pracy

1.1. Sformułowanie problemu badawczego

Wszystkie obiekty budowlane w miarę upływu czasu ulegają degradacji na skutek oddziaływania otaczającego je środowiska. Przywracanie utraconych lub pogorszonych właściwości użytkowych generuje znaczne koszty i utrudnienia w trakcie eksploatacji budynku czy budowli. Szczególnie trudna i kosztowna może okazać się naprawa konstrukcji betonowych, takich jak ustroje nośne mostów, czy nawierzchnie lotnisk, portów i dróg. Dlatego też najważniejszą właściwością konstrukcji betonu staje się trwałość definiowana wg Eurokodu 2 jako zapewnienie stanu użytkowości konstrukcji w określonych warunkach i przewidywanym czasie eksploatacji. Uzyskanie wymaganej trwałości elementów betonowych jest możliwe przez odpowiednie dostosowanie składu i struktury betonu do warunków użytkowania, określanych jako klasy ekspozycji.

Mimo, że odporność betonu na cykliczne zamrażanie i agresję środków odladzających zależy od licznych cech betonu to głównymi czynnikami są **stopień nasycenia betonu wodą i mikrostruktura porów zaczynu cementowego**. Poniżej pewnej krytycznej wartości nasycenia beton jest bardzo odporny na działanie mrozu, a beton suchy nie jest wrażliwy na cykliczne zamrażanie. Odporność betonu na cykliczne zamrażanie i rozmrażanie można zapewnić kształtując mrozoodporną strukturę zaczynu cementowego w wyniku **napowietrzenia** lub ograniczając nasycenie betonu wodą np. w wyniku **hydrofobizacji**.

Najczęstszym mechanizmem destrukcji betonu w polskich warunkach klimatycznych jest niszczenie spowodowane cyklicznym zamrażaniem i rozmrażaniem wody w porach betonu w połączeniu z oddziaływaniem środków odladzających. Zgodnie z normą PN-EN 206 w warunkach korozji mrozowej szczególnie zalecane jest zmniejszenie w/c i napowietrzenie betonu. W praktyce jednak uzyskanie właściwego napowietrzenia odbywa się kosztem zmniejszenia szczelności i znacznego spadku wytrzymałości (20-30%). Trzymanie się wymienionych w normie zasad powinno być wystarczające, aby konstrukcja przetrwała projektowany okres użytkowania bez dodatkowych zabiegów zabezpieczających lub naprawczych. Jednakże, jak wykazuje praktyka (rys 1.1-1.5) ich spełnienie nie zawsze zapewnia odporność w warunkach rzeczywistych. Polska ma pod tym względem najostrzejszy w Europie klimat dla betonu, ponieważ niszczy go nie tylko ujemna temperatura, ale głównie cykliczne zamrażanie i rozmrażanie. Dlatego mrozoodporność betonu w polskich realizacjach ma szczególne znaczenie.



Rys. 1.1. Złuszczenia nawierzchni po 2 latach użytkowania przy Zakładach Mleczarskich „Mlekovita” w Wysokiem Mazowieckiem w wyniku cyklicznego zamrażania i rozmrażania. Fot. Autor



Rys. 1.2. Uszkodzenia w postaci odprysków po 2 latach użytkowania nawierzchni betonowej przy drodze wojewódzkiej nr 868 w Kleosinie k. Białegostoku w wyniku pęcznienia kruszywa. Fot. Autor



Rys. 1.3. Uszkodzenia w postaci złuszczeń nawierzchni betonowej po 20 latach użytkowania na skutek agresji mrozowej. Zakłady Mięsne „Dolina Łąk” (woj. lubelskie). Fot. Autor



Rys. 1.4. Uszkodzenia nawierzchni betonowej spowodowane skurczem (zarysowanie) i reakcjami alkalicznymi (odpryski) na terenie zakładu produkcyjnego w Sokołowie k. Warszawy. Fot. Autor



Rys. 1.5. Uszkodzenia nawierzchni betonowej na stacji paliw przy drodze krajowej nr 8 w Zabrodziu w woj. mazowieckim w wyniku ekspozycji na agresywne oddziaływanie środowiska. Fot. Autor

Z badań obiektów mostowych realizowanych w latach 2004-2005 wynika, że nie wszystkie betony napowietrzone spełniają wymóg mrozoodporności F 150, co zgodnie z normą PN-88/B-06250 odpowiada przewidywanej użytkowalności konstrukcji zaledwie przez okres 25÷50 lat (w strefie zmieniającego się poziomu wody lub narażonych na działanie środków odladzających).

Z kolei wadą hydrofobizacji powierzchniowej jest jej ograniczona trwałość. Ponadto, nie jest możliwe wykonanie idealnie szczelnej powłoki oraz nie można zabezpieczyć całej powierzchni betonu, bowiem do niektórych miejsc nie ma dostępu, np. do wnętrza szczelin dylatacyjnych. Silany i siloksylany, które są stosowane do wykonywania hydrofobizacji, ulegają rozkładowi i po ok. 7 latach bezpośredniego oddziaływania nasłonecznienia powierzchnia traci właściwości hydrofobowe.

Mając na względzie rzeczywiste problemy związane z napowietrzaniem jak i hydrofobizacją powierzchniową w realizowanej pracy postawiono za cel główny wykazanie, że dzięki zastosowaniu domieszki w postaci anionowej emulsji bitumicznej oraz superplastyfikatora na bazie eterów polikarboksylanowych można uzyskać trudnozwilżalne betony o korzystnej strukturze porowatości i podwyższonej odporności na oddziaływania środowiskowe.

1.2. Teza pracy

W wyniku modyfikacji betonu cementowego domieszkami lub dodatkami bitumicznymi oraz skutecznego sposobu zagęszczenia mieszanki betonowej istnieje możliwość zapewnienia trwałości betonu w konstrukcji w klasie ekspozycji XF i XD przez minimum 50 lat.

1.3. Cele pracy

- 1) Opracowanie sposobów zapewnienia trwałości betonów cementowych w warunkach oddziaływań środowiskowych w klasie ekspozycji XF4 i XD3 przez minimum 50 lat.
- 2) Określenie mechanizmu kształtowania struktury i porów betonów cementowych modyfikowanych emulsją bitumiczną.
- 3) Opracowanie i wdrożenie technologii modyfikacji strukturalnej betonów cementowych emulsją bitumiczną.

1.4. Zakres pracy

Przeprowadzone i opisane w pracy badania naukowe podzielone zostały zgodnie z Ustawą o zasadach finansowania nauki (Dz.U.2010 nr 96 poz. 615.) na badania podstawowe, stosowane, przemysłowe i prace rozwojowe. Badania podstawowe zostały wykonane w ramach projektu badawczo-rozwojowego R14 009 03 „*Ochrona materiałowo-strukturalna elementów drobnowymiarowych przed korozją, realizowana poprzez modyfikację betonu asfaltem*”. Były one ukierunkowane na zastosowanie zamiennika dotychczas stosowanego dodatku pasty asfaltowej nową domieszką emulsji bitumicznej. Badania stosowane jako własne prace badawcze były zorientowane przede wszystkim na zastosowanie w praktyce. Zostały one przeprowadzone na próbkach przygotowanych w warunkach laboratoryjnych i posłużyły do opracowania optymalnych receptur z emulsją bitumiczną i domieszką upłynniającą nowej generacji, na bazie eterów polikarboksylowych. Badania przemysłowe i prace rozwojowe prowadzone były na próbkach przygotowanych w warunkach budowy w oparciu o wyselekcjonowane receptury. Ich celem było zdobycie nowej wiedzy i umiejętności przy wprowadzaniu znaczących ulepszeń istniejących produktów – betonów cementowych poprzez ich modyfikację domieszką emulsji bitumicznej i eterami polikarboksylowymi. Autor niniejszej rozprawy prowadząc własne prace badawcze był uczestnikiem projektu „*Stypendia dla doktorantów województwa podlaskiego*”, współfinansowanego w ramach Programu Operacyjnego Kapitał Ludzki, Działanie 8.2.2 Regionalne Strategie Innowacji, ze środków Europejskiego Funduszu Społecznego, budżetu państwa oraz środków budżetu województwa podlaskiego.

Szczegółowy zakres pracy obejmuje:

- a) przegląd zagadnień związanych z agresywnym oddziaływaniem środowiska na konstrukcje betonowe i żelbetowe oraz normowe sposoby zapewnienia trwałości konstrukcji z betonów cementowych;
- b) przegląd literatury dotyczącej kształtowania mrozoodpornej struktury betonu za pomocą dodatków i domieszek bitumicznych;
- c) badania podstawowe nad zastosowaniem emulsji bitumicznej jako zamiennika pasty asfaltowej oraz badania nad wpływem zawartości emulsji bitumicznej na właściwości fizyczne betonów cementowych
- d) analizę mikrostruktury i składu fazowego kompozytów cementowych modyfikowanych emulsją bitumiczną,
- e) badania stosowane nad wpływem czynników (zmiennych niezależnych) takich, jak emulsja bitumiczna, domieszka upłynniająca na bazie eterów polikarboksylowych i współczynnik w/c na właściwości fizyczne mieszanki oraz stwardniałego betonu, będące podstawą do opracowania optymalnych receptur i zastosowania ich w warunkach przemysłowych,
- f) badania przemysłowe realizowane podczas implementacji kompozytów cementowych modyfikowanych emulsją bitumiczną w warunkach budowy nawierzchni betonowych,
- g) wdrożenie kompozytów cementowych w warunkach przemysłowych – zaprojektowanie i realizacja nawierzchni betonowych na parkingach i placu kontenerowym.

Przeprowadzone badania z wykorzystaniem porozymetrii rtęciowej, dyfraktometrii rentgenowskiej, termicznej analizy różnicowej i mikroskopii skaningowej pozwoliły na określenie mechanizmu kształtowania struktury betonów cementowych modyfikowanych emulsją bitumiczną.

Na podstawie własnych badań eksperymentalnych ustalono optymalne receptury mieszanek betonowych z emulsją bitumiczną i technologię ich wykonywania w warunkach przemysłowych a następnie wbudowano je w nawierzchnie dróg dojazdowych do parkingów przy Zakładach Pojazdów Mechanicznych DKD w Wolnym Obszarze Celnym k. Terespoła oraz w nawierzchnię placu manewrowego w Innowacyjnym Multimodalnym Terminalu Kontenerowo-Przeładunkowym w WOC k. Terespoła.

2. Badania podstawowe kompozytów cementowych z emulsją bitumiczną

2.1. Materiały użyte do wykonania elementów badawczych

Do wykonania próbek do badań podstawowych użyto cementu portlandzkiego CEM I 42,5 N-3SR/NA. **Cement** ten charakteryzuje się podwyższoną odpornością korozyjną i spełnia wymagania stawiane cementom do betonów mostowych i drogowych, także najwyższej kategorii ruchu KR5-KR7. Jako **kruszywo** drobne zastosowano piasek normowy frakcji 0-2 mm, natomiast jako kruszywo grube łamane użyto grysów bazaltowych o uziarnieniu od 2 do 8 mm z zawartością nadziarnia do 16 mm. Punkt piaskowy mieszanki kruszyw wynosił 41,95%.

Do celów porównawczych, stosowane były dwa rodzaje domieszek asfaltu w postaci pasty i emulsji. **Pasta asfaltowa** jest upłynnionym roztworem asfaltu przemysłowego PS-85/25 w wysokowrzącym rozpuszczalniku organicznym (nafcie technicznej z dodatkami) wg patentu RP nr 136449. Mając na względzie lepkość pastę asfaltową wprowadzano do zarobu jako mieszaninę z cementem w celu jej równomiernego rozprowadzenia. **Emulsja bitumiczna** jest produktem czystym ekologicznie, gdyż nie zawiera rozpuszczalnika organicznego, charakteryzuje się dużą zawartością bitumu (około 60%) i łatwością w rozprowadzaniu w zaprawach cementowych i cementowo-wapiennych. Bazę stanowi asfalt podestylacyjny o temperaturze mięknięcia 50-60°C, barwa brunatno czarna, konsystencja ciekła, gęstość ok. 1000 kg/m³, pH ok. 10. Dotychczas stosowana jest jako warstwa uszczelniająca i ochronna stykających się z gruntem części budowli, jako powłoka gruntująca i ochronna powierzchni dachowych oraz do ulepszonych bitumem, wodoszczelnych tynków i zapraw. Emulsję bitumiczną wprowadzano do zarobu wraz z wodą zarobową. W celu uzyskania urabialności mieszanki betonowej pozwalającej na zagęszczanie w formach wibratorami wgłębnymi, dodawano domieszkę upłynniającą na bazie sulfonianów naftalenowych i sulfonianów melaminowych.

2.2. Receptury betonów z emulsją bitumiczną i pastą asfaltową

Receptury mieszanek zostały sporządzone przy założonej stałej zawartości cementu równej 500 kg/m³, stałym współczynniku $w/c = 0,3$ oraz zmiennej ilości pasty asfaltowej lub emulsji bitumicznej w stosunku do masy cementu. Założono konsystencję wilgotną jako optymalną przy zastosowaniu specjalnych technologii, do których zalicza się wibroprasowanie i wibrowanie z wibroprasowaniem. Składy betonów do badań podstawowych z pastą i emulsją przedstawiono w tabeli 2.1.

Tabela 2.1. Składy mieszanek betonowych z pastą asfaltową i emulsją bitumiczną stosowane w badaniach podstawowych

Skład	Ilość składników [kg/m ³]							Woda
	Cement	Pasta/ emulsja	plastyfikikator	Piasek normowy	Grys			
					2÷ 4 mm	4÷ 8 mm	8÷ 16 mm	
	Mieszanki betonowe z pastą asfaltową							
B0	500	-	-	824	341	683	114	150
B2		10		818	339	678	113	
B4		20		811	336	672	112	
	Mieszanki betonowe z emulsją bitumiczną							
E0	500	-	-	824	341	683	114	150
E2		10		818	339	678	113	
E4		20		811	336	672	112	
Mieszanki betonowe z emulsją bitumiczną i plastyifikatorem								
E0-FM	500	-	5,7	824	341	683	114	150
E2-FM		10		818	339	678	113	
E4-FM		20		811	336	672	112	

2.3. Badania podstawowe nad zastosowaniem emulsji bitumicznej jako zamiennika pasty asfaltowej

Biorąc pod uwagę oczekiwany korzystniejszy wpływ emulsji bitumicznej w porównaniu do pasty asfaltowej przeprowadzono badania porównawcze wybranych cech użytkowych betonu. Zakres badań porównawczych obejmował wytrzymałość na ściskanie i nasiąkliwość wagową.

Zestawienie wyników badania wytrzymałości na ściskanie i nasiąkliwości betonów cementowych modyfikowanych emulsją bitumiczną i pastą asfaltową przedstawiono w tabeli 2.2. Dowodzą one, że emulsja bitumiczna w mniejszym stopniu obniża wytrzymałość na ściskanie betonu po 28 dniach dojrzewania w wodzie niż pasta bitumiczna. Ponadto, wpływ emulsji bitumicznej na obniżenie nasiąkliwości betonu jest wyraźnie większy niż w przypadku pasty. Wprowadzenie 2% domieszki emulsji spowodowało obniżenie nasiąkliwości z 4,51% do 2,61%, zaś 4% zawartość emulsji bitumicznej w betonie powoduje zmniejszenie nasiąkliwości betonu z 4,51% do 2,03%. W przypadku pasty asfaltowej te wartości wynosiły odpowiednio 3,65 i 3,05%.

Tabela 2.2. Zestawienie porównawcze wytrzymałości na ściskanie i nasiąkliwości betonów cementowych modyfikowanych domieszkami w postaci pasty asfaltowej i emulsji bitumicznej

skład	w/c	Vebe	zawartość domieszki [%]	wytrzymałość na ściskanie [MPa]	nasiąkliwość wagowa [%]
Beton wzorcowy					
B0	0,3	V0	0	69,0	4,51
Beton modyfikowany pastą asfaltową					
B2	0,3	V0	2%	60,7	3,65
B4	0,3	V0	4%	52,6	3,05
Beton modyfikowany emulsją bitumiczną					
E2	0,3	V0	2%	60,0	2,61
E4	0,3	V0	4%	56,0	2,03

Porównanie wyników badań wykazało, że emulsja bitumiczna przy tym samym dozowaniu w większym stopniu obniża nasiąkliwość betonu, niż pasta asfaltowa, a jednocześnie w mniejszym stopniu obniża jego wytrzymałość na ściskanie.

2.4. Wpływ emulsji bitumicznej na właściwości fizyczne betonów cementowych

2.4.1. Wytrzymałość na ściskanie

Wyniki badań wytrzymałości na ściskanie po 28 dniach dojrzewania w warunkach laboratoryjnych przedstawiono w tabeli 2.3.

Tabela 2.3. Wytrzymałość na ściskanie betonu z emulsją bitumiczną i plastyfikatorem po 28 dniach dojrzewania

Skład	naprężenia [MPa]	odchylenie standardowe
E0-FM	73,05	4,05
E2-FM	68,17	5,93
E4-FM	58,51	0,93

Zawartość 2% emulsji bitumicznej w stosunku do masy cementu obniżyła wytrzymałość na ściskanie zaledwie o 7%, a 4% zawartość emulsji o 25%.

2.4.2. Nasiąkliwość wagowa

Wyniki badań nasiąkliwości wagowej po 28 dniach dojrzewania w warunkach laboratoryjnych przedstawiono w tabeli 2.4.

Tabela 2.4. Nasiąkliwość betonu z emulsją bitumiczną i plastyfikatorem po 28 dniach dojrzewania

skład	nasiąkliwość [%]	odchylenie standardowe
E0-FM	3,94	0,10
E2-FM	1,87	0,17
E4-FM	1,14	0,04

Wpływ emulsji bitumicznej na obniżenie nasiąkliwości betonu jest istotny, 4% zawartość emulsji bitumicznej w betonie powoduje zmniejszenie nasiąkliwości betonu z 3,94% do 1,14%. Tak małą nasiąkliwość masową wykazują tylko najbardziej zwarte kamienie naturalne o budowie krystalicznej.

2.4.3. Wodoszczelność betonów

Wyniki z badań wodoszczelności przedstawiono w tabeli 2.5.

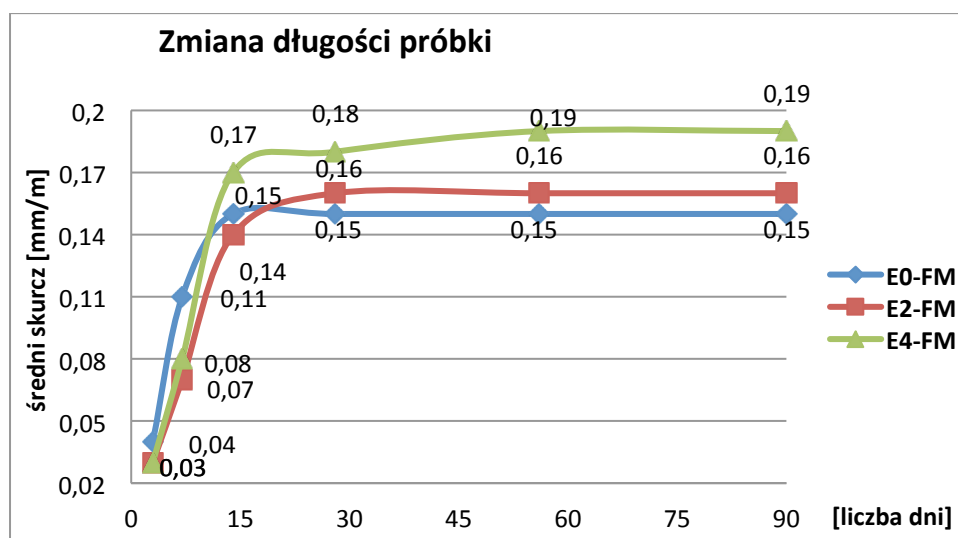
Wszystkie badane betony wykazały bardzo wysoką wodoszczelność. Głębokość penetracji wody pod ciśnieniem 1,6 MPa w przypadku betonów zawierających 2 i 4% emulsji była mniejsza odpowiednio o 40% i 47% w porównaniu do betonu kontrolnego.

Tabela 2.5. Wpływ zawartości emulsji na głębokość penetracji wody przy ciśnieniu 1,6 MPa

skład	głębokość penetracji [cm]	odchylenie standardowe
E0-FM	3,90	0,57
E2-FM	2,40	0,35
E4-FM	2,10	0,21

2.4.4. Skurcz betonu

Graficzne zobrazowanie zmian długości próbek w czasie pokazano na rysunku 2.1. Skurcz betonu z 2% zawartością emulsji bitumicznej jest zbliżony do betonu kontrolnego (E0-FM). Skurcz nieznacznie wzrasta w przypadku betonów zawierających 4% emulsji bitumicznej w stosunku do masy cementu.



Rys. 2.1. Zmiana długości próbki

2.4.5. Moduł sprężystości betonu

Wyniki zamieszczone w tabeli 2.6. pokazują, że emulsja bitumiczna powoduje spadek średniej wartości modułu sprężystości betonu. Zawartość 2% emulsji w stosunku do masy cementu obniża wartość modułu sprężystości o 10%, a zawartość 4% o 12%, co oznacza że betony z emulsją bitumiczną są mniej kruche i bardziej podatne na odkształcenia. Podobne zależności uzyskano w przypadku całkowitej poziomej deformacji próbek pod wpływem siły 4800 N.

Tabela 2.6. Wpływ zawartości emulsji asfaltowej na wartość modułu sprężystości betonu oraz poziomą deformację próbek

skład	średnia wartość modułu sztywności [MPa]	średnia wartość poziomej deformacji [μm]
E0-FM	64 492 (100%)	0,88 (100%)
E2-FM	58 656 (90%)	0,98 (111,4%)
E4-FM	57 579 (88%)	0,99 (112,5%)

2.4.6. Porowatość betonów oznaczona metodą porozymetrii rtęciowej

Właściwości fizyczne próbek poddanych badaniom porozymetrycznym w zakresie gęstości objętościowej, gęstości właściwej oraz porowatości zamieszczono w tabeli 2.7. Emulsja bitumiczna, z uwagi na zawartość środka emulgującego, powoduje zwiększenie porowatości betonu. Zawartość emulsji w ilości 2% w stosunku do masy cementu spowodowała wzrost porowatości o 0,57%, a zawartość w ilości 4% zwiększyła porowatość o 1,94%.

Tabela 2.7. Średnie wartości gęstości objętościowej, gęstości właściwej i porowatości betonów (s – odchylenia standardowe)

skład/odchylenie standardowe	gęstość objętościowa ρ_o [g/cm^3]	gęstość właściwa ρ_w [g/cm^3]	porowatość p [%]
E0-FM	2,4642	2,6922	8,47
<i>s</i>	0,012	0,012	0,185
E2-FM	2,4688	2,7141	9,04
<i>s</i>	0,001	0,024	0,79
E4-FM	2,3753	2,6513	10,41
<i>s</i>	0,033	0,026	0,467

2.5. Mikrostruktura kompozytów cementowych modyfikowanych emulsją bitumiczną

W wyniku zastosowania emulsji bitumicznej nastąpił wzrost porowatości całkowitej oraz powierzchni porów. Obecność emulsji bitumicznej miała także wpływ na strukturę jednorodności porów. W tabeli 2.8. przedstawiono procentowy rozkład wielkości porów w badanych betonach.

Tabela 2.8. Struktura porowatości badanych betonów

Skład	Porowatość całkowita $V_{c(szkielek)}$ [cm^3/g]	Udział porów według rozmiarów, %						
		3 ÷ 10	10 ÷ 30	30 ÷ 100	100 ÷ 300	300 ÷ 3000	3000 ÷ 30000	30000 ÷ 300000
		[nm]						
E0-FM	0,0344	9,7	11,0	28,2	9,7	28,9	16,1	12,5
E2-FM	0,0366	9,2	13,0	29,1	8,6	33,7	15,6	6,5
E4-FM	0,0439	5,9	13,1	24,7	10,5	38,4	14,7	7,4

Struktura porowatości betonów modyfikowanych emulsją bitumiczną jest bardziej zróżnicowana w stosunku do betonów niemodyfikowanych. Wraz ze wzrostem zawartości emulsji bitumicznej

w stosunku do masy cementu, nastąpiło zmniejszenie ilości porów żelowych ($3\div 10$ nm) z 9,7% do 5,9%. Świadczyć to może o efektywniejszej hydratacji cementu w obecności składników emulsji bitumicznej. Z kolei wzrost objętości porów kapilarnych ($10\div 2000$ nm) w betonach modyfikowanych jest zjawiskiem korzystnym, ponieważ w tych porach, nawet w wyniku bezpośredniego zetknięcia betonu z wodą nie następuje ich całkowite wypełnienie wilgocią. Ponadto, są to pory bardzo korzystne w procesie zamrażania i rozmrażania betonu w wodzie. Większe z nich stają się rezerwuarem dla ściśniętej wody w wyniku tworzenia się lodu w makroporach i bardzo dużych kapilarach (o średnicy powyżej 2000 nm).

Przedstawione wyniki porowatości wskazują, że modyfikacja emulsją bitumiczną badanych betonów cementowych zmienia strukturę porowatości w stosunku do betonów niemodyfikowanych. Przede wszystkim wpływa na wzrost objętości porów kapilarnych w porównaniu z betonem kontrolnym. Należy jednak zwrócić uwagę, że pomimo wzrostu tej objętości związanej z większą porowatością nastąpiły również istotne zmiany w samej strukturze porowatości. Zaobserwowano m.in. przesunięcie porowatości w kierunku tzw. bezpiecznej porowatości kapilarnej.

Betony modyfikowane emulsją charakteryzują się:

- większą porowatością całkowitą w porównaniu z betonem niemodyfikowanym,
- najmniejszą zawartością drobnych porów kapilarnych o $\phi < 100$ nm oraz makroporów o $\phi > 3000$ nm,
- największą zawartością dużych porów kapilarnych o $\phi < 100$ nm,

2.6. Skład fazowy i identyfikacja składników krystalicznych w kompozytach cementowych na podstawie dyfraktometrii rentgenowskiej

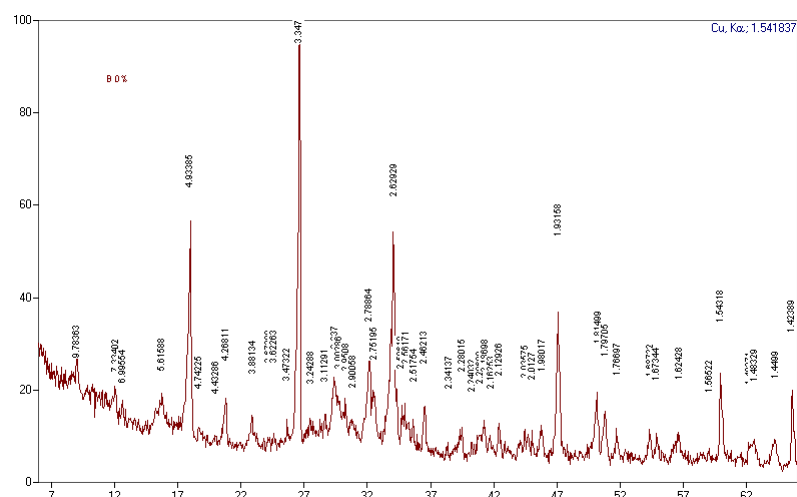
Badanie metodą rentgenowskiej analizy dyfrakcyjnej przeprowadzono w celu oznaczenia jakościowego składu fazowego i zidentyfikowania faz krystalicznych w badanych zaczynach.

Na rys. 2.2 – 2.4. przedstawiono dyfraktogramy rentgenowskie zaczynów wyseparowanych z betonu kontrolnego oraz z betonów zawierających odpowiednio 2% i 4% emulsji bitumicznej.

Na podstawie dyfraktogramów rentgenowskich zidentyfikowano jakościowo następujące składniki krystaliczne, występujące w wyseparowanych zaczynach cementowych z badanych próbek betonów:

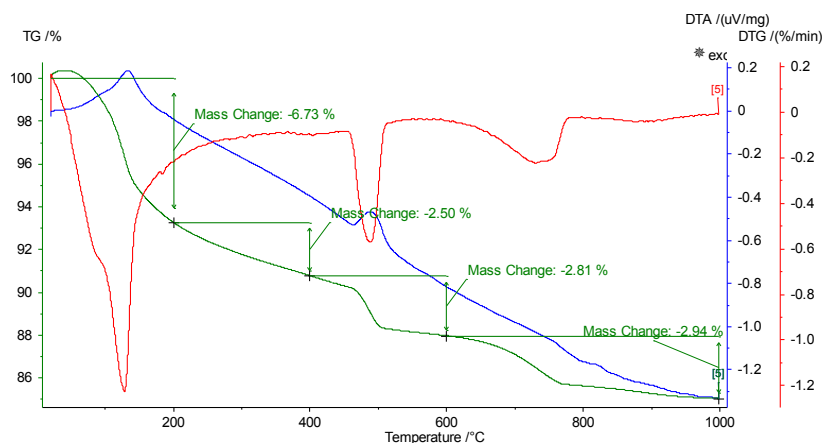
- relikty cementu: alit, belit,
- relikty kruszywa: pirokseny (augit), kwarc, skalenie (plagioklasy),
- produkty hydrolizy cementu: faza CSH, portlandyt, ślady uwodnionych glinianów (C_4AH_{7-11}),
- produkty karbonatyzacji (lub relikty kruszywa): kalcyt.

Jakościowa charakterystyka, badanych próbek zaczynów cementowych wyseparowanych z betonów na podstawie intensywności względnych oraz odległości międzypłaszczyznowych refleksów diagnostycznych d [$\text{\AA}$], wskazała, że ilość nieprzereagowanego alitu o $d = 1,77\text{\AA}$ oraz fazy glinianowej o $d = 7,33\text{\AA}$ i ettringitu o $d = 2,56\text{\AA}$ we wszystkich badanych seriach betonów jest zbliżona. Natomiast intensywność refleksów belitu o $d = 2,40\text{\AA}$ zwiększyła się 4-krotnie w obecności emulsji bitumicznej w betonie. Po 60 dniach hydratacji refleksy fazy $Ca(OH)_2$ o $d = 1,80\text{\AA}$ oraz CSH o $d = 3,04\text{\AA}$ są znacznie intensywniejsze w przypadku betonów modyfikowanych emulsją bitumiczną. Hydratacja krzemianu trójwapniowego (alitu) oraz reagującego z opóźnieniem krzemianu dwuwapniowego (belitu) spowodowała zwiększanie się ilości żelu a tym samym ogólny wzrost szczelności stwardniałego zaczynu cementowego. Do ustalenia ostatecznej ilościowej zawartości poszczególnych składników zaczynu cementowego niezbędne było wykonanie badania metodą termicznej analizy różnicowej.

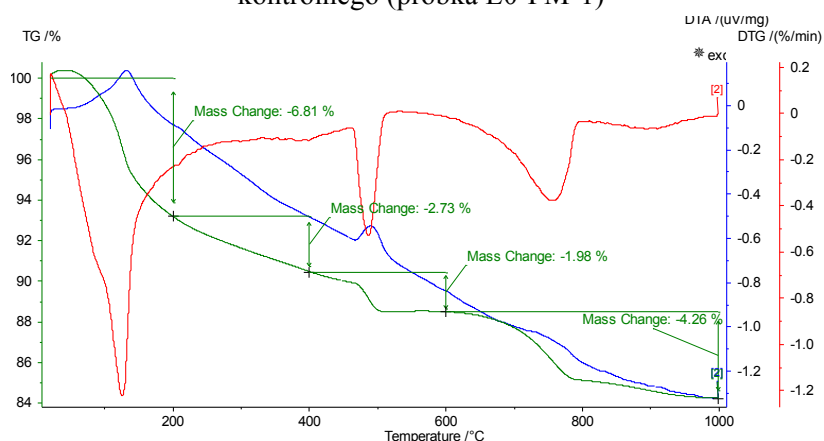


2.7. Zawartość wybranych składników kompozytów cementowych oceniana metodą termicznej analizy różnicowej

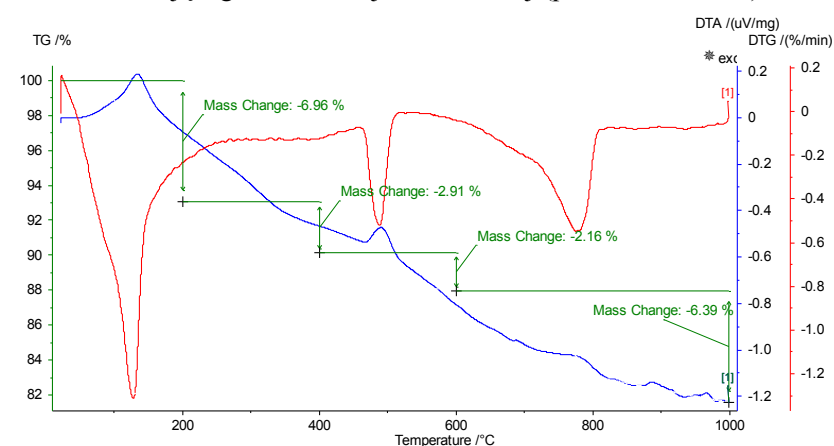
Graficzny obraz przemian zachodzących w badanych próbkach betonów w wyniku ich ogrzewania do temperatury 1000°C przedstawiono na rys. 2.5 – 2.7.



Rys. 2.5. Krzywe termogawimetryczne próbki zaczynu cementowego wyseparowanego z betonu kontrolnego (próbka E0-FM-1)



Rys. 2.6. Krzywe termogawimetryczne próbki zaczynu cementowego wyseparowanego z betonu zawierającego 2% emulsji bitumicznej (próbka E2-FM-1)

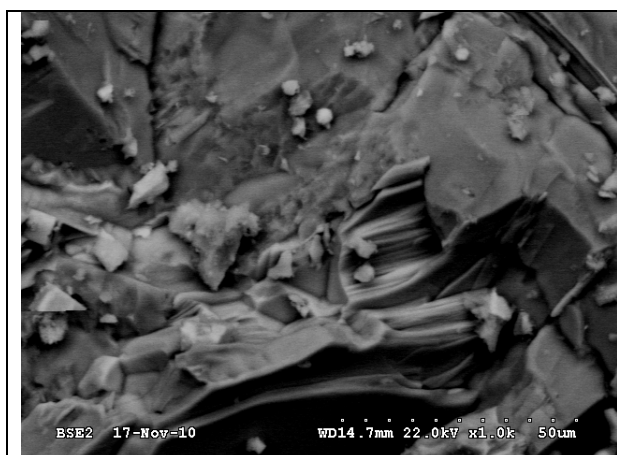


Rys. 2.7. Krzywe termogawimetryczne próbki zaczynu cementowego wyseparowanego z betonu zawierającego 4% emulsji bitumicznej (próbka E4-FM-1)

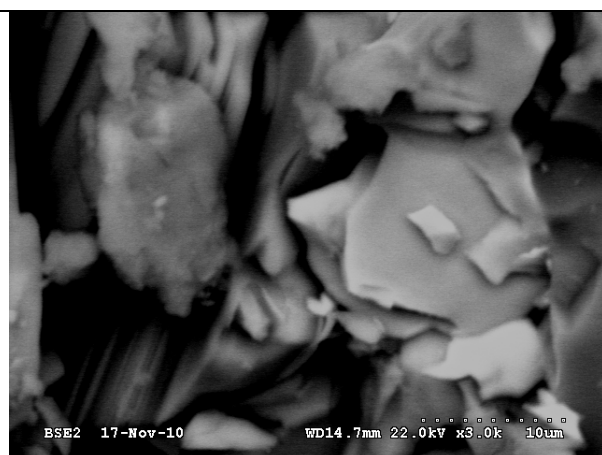
Domieszka emulsji bitumicznej spowodowała ok. 26% spadek zawartości wodorotlenku wapnia oraz znaczny wzrost zawartości węglanu wapnia (w przypadku betonu z 4% zawartością emulsji – 2-krotny). Świadczyć to może o tym, że w obecności emulsji bitumicznej szybciej następuje hydroliza i hydratacja cementu. Rozpatrując zagadnienie karbonatyzacji betonu należy zwrócić uwagę na fakt, że objętość CaCO_3 jest większa od objętości Ca(OH)_2 o około 12%. Powoduje to zarastanie wnętrza porów. Badania porozymetryczne wskazują, że zarastają głównie kapilary o promieniach od 10 do 1000 nm. Tym głównie należy tłumaczyć fakt, że betony z emulsją bitumiczną prawie nie podlegają procesowi karbonatyzacji.

2.8. Ocena wpływu emulsji bitumicznej na mikrostrukturę kompozytów cementowych przy zastosowaniu skaningowego mikroskopu elektronowego

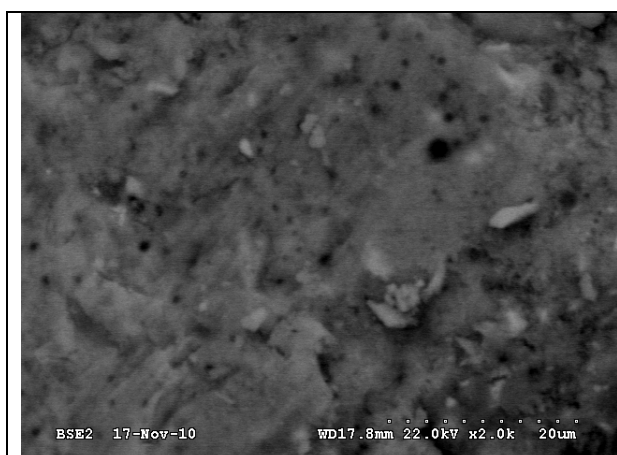
Obserwacje prowadzone na przełomach próbek za pomocą mikroskopu skaningowego umożliwiły jakościową ocenę wpływu obecności emulsji bitumicznej na mikrostrukturę zaczynu cementowego w betonach. W betonach bez dodatku emulsji występuje typowa zbita forma żelu CSH (rys 2.8 i rys 2.9). Dodatek emulsji w ilości 2% i 4% w stosunku do masy cementu wpływa na powstanie fazy CSH o zróżnicowanej morfologii: od żelowej do włóknistej, ze wskazaniem na włóknistą (rys 2.10 i rys 2.11).



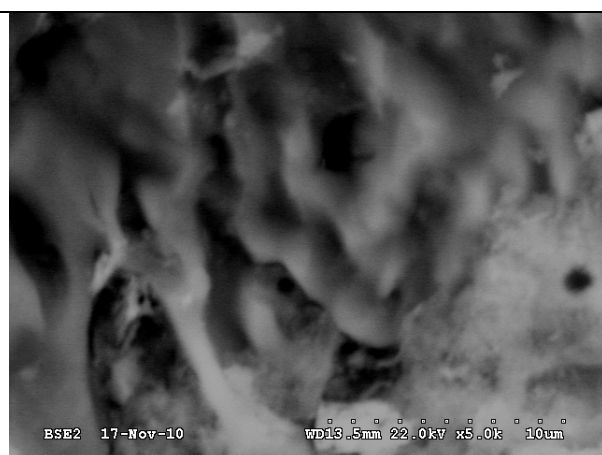
Rys. 2.8. Seria E0. Zbita faza CSH, widoczne ziarna niehydratyzowanego cementu. Powiększenie 1000×. Fot. T. Koziolkiewicz



Rys. 2.9. Seria E0. Kryształy portlandytu zatopione w fazie CSH. Powiększenie 3000×. Fot. T. Koziolkiewicz



Rys. 2.10. Seria E2. Duże pory kapilarne i pory powietrzne w zaczynie cementowym. Powiększenie 2000×. Fot. T. Koziolkiewicz



Rys. 2.11. Seria E4. Faza CSH w formie folii z falistą teksturą. Powiększenie 5000×. Fot. T. Koziolkiewicz

3. Badania stosowane w celu optymalizacji składu kompozytu cementowego z emulsją bitumiczną

3.1. Założenia i program badań eksperymentalnych

Do udowodnienia postawionej tezy i realizacji założonych celów zaplanowano doświadczenie trójczynnikowe z pięcioma poziomami zmienności i dokonano statystycznej oceny wpływu badanych czynników na właściwości fizyczne mieszanki oraz stwardniałego betonu. Czynnikami zmiennymi w badaniach były:

- x_1 – zawartość anionowej emulsji bitumicznej w stosunku do masy cementu: 0,0; 0,845; 2,0; 3,155; 4,0 [%],
- x_2 – zawartość upłynniacza na bazie eterów polikarboksyłanowych, w stosunku do masy cementu: 0,0; 0,232; 0,55; 0,868; 1,1 [%],
- x_3 – współczynnik wodno-cementowy: 0,30; 0,33; 0,37; 0,41; 0,44 [-].

Zakresy zmienności x_1, x_2, x_3 przyjęto na podstawie badań podstawowych, badań wstępnych, wymagań normowych i przewidywanych efektów.

Do oceny wpływu badanych czynników x_1, x_2, x_3 na właściwości mieszanki i stwardniałego betonu przyjęto funkcję obiektu badania w postaci wielomianu drugiego stopnia, co pozwoliło na określenie związków między wszystkimi wielkościami wejściowymi a wielkością wyjściową.

$$y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3 + b_{11}x_1^2 + b_{22}x_2^2 + b_{33}x_3^2 + b_{12}x_1x_2 + b_{13}x_1x_3 + b_{23}x_2x_3$$

Wielkościami wyjściowymi (właściwościami mieszanki i betonu) w eksperymencie były:

- y_1 – konsystencja mieszanki [s],
- y_2 – zawartość powietrza w mieszanke [%],
- y_3 – gęstość objętościowa mieszanki [kg/m^3],
- y_4 – gęstość objętościowa kompozytu cementowego [kg/m^3],
- y_5 – nasiąkliwość wagowa kompozytu cementowego wodą [%],
- y_6 – wytrzymałość na ściskanie po 28 dniach [MPa],
- y_7 – wytrzymałość na ściskanie po 120 dniach [MPa],
- y_8 – wytrzymałość na ściskanie po 200 cyklach zamrażania i rozmrażania [MPa],
- y_9 – mrozoodporność po 200 cyklach zamrażania i odmrażania oceniana spadkiem wytrzymałości na ściskanie [%].

Do zbioru wielkości stałych należy zaliczyć:

- rodzaj i ilość cementu: CEM I 42,5 N-3SR/NA, 360 kg/m^3 ;
- rodzaj i proporcje kruszywa: piasek płukany 34%, grys granitowe 2-8 (28%) i 8-16 (38%),
- rodzaj domieszki upłynniającej (na bazie eterów polikarboksylenowych),
- warunki przygotowania i dojrzewania betonu (wilgotność, temperatura powietrza).

Optymalizacja zależności opisującej mrozoodporność, mierzona spadkiem wytrzymałości po 200 cyklach zamrażania i rozmrażania, pozwoliła określić wartości poszczególnych czynników (zmiennych niezależnych), dla których kompozyt będzie charakteryzował się największą odpornością na zamrażanie i rozmrażanie. Założono przy tym, zgodnie z normą PN-B-06250, iż spełnienie wymogu mrozoodporności F 200 odpowiada przewidywanej użytkowalności konstrukcji przez okres 100 lat, albo co najmniej 50 lat dla elementów znajdujących się w strefie zmieniającego się poziomu wody lub narażonych na działanie środków rozmrażających, tj. jak w klasach ekspozycji XF4 i XD3.

Biorąc pod uwagę, że celem badania jest wyznaczenie funkcji pozwalającej na uzyskanie pełnej informacji o obiekcie badania w przyjętych zakresach wielkości wejściowych x_k ($x_{k,\min}$, $x_{k,\max}$) oraz postać funkcji (dziesięcioelementowy wielomian drugiego stopnia) wybrano z grupy planów statystycznych zdeterminowanych poliselekcyjnych plan Hartleya PS/DS-P: Ha_3 z obszarem zmienności na hiperkuli (hK) [138]. Jest to 11 elementowy plan dla trzech wielkości wejściowych na pięciu poziomach zmienności 0, ± 1 , $\pm \alpha$, gdzie $\alpha = \pm 1,73$. Natomiast, wstępne badania przeprowadzono wg dziewięcioelementowego układu kwadratów łacińskich dla trzech czynników na trzech poziomach zmienności.

Oznaczenia wybranych właściwości mieszanki oraz stwardniałego kompozytu cementowego modyfikowanego domieszkami realizowane były w oparciu o przyjęte plany doświadczenia z uwzględnieniem powtórzeń oraz zachowaniem randomizacji pomiarów.

Łącznie uzyskano 17 układów (tabela 3.1), ponieważ 3 układy planu Ha_3 pokrywały się z 3 układami kwadratów łacińskich.

Tabela 3.1. Układy planu eksperymentu zastosowanego do analizy statystycznej wyników badań

układy planu	zmienne wejściowe					
	wartości normowane			wartości rzeczywiste		
nr	$\hat{x}_1$	$\hat{x}_2$	$\hat{x}_3$	x_1	x_2	x_3
1	-1	-1	1	0,845	0,232	0,41
2	1	-1	-1	3,155	0,232	0,33
3	-1	1	-1	0,845	0,868	0,33
4	1	1	1	3,155	0,868	0,41
5	-1,732	0	0	0	0,55	0,37
6	1,732	0	0	4	0,55	0,37
7	0	-1,732	0	2	0	0,37
8	0	1,732	0	2	1,1	0,37
9	0	0	-1,732	2	0,55	0,3
10	0	0	1,732	2	0,55	0,44
11	0	0	0	2	0,55	0,37
12	-1,732	-1,732	-1,732	0	0	0,3
13	-1,732	1,732	1,732	0	1,1	0,44
14	0	1,732	-1,732	2	1,1	0,3
15	1,732	-1,732	1,732	4	0	0,44
16	1,732	0	-1,732	4	0,55	0,3
17	1,732	1,732	0	4	1,1	0,37

3.2. Receptury betonów w badaniach stosowanych

Uwzględniając kierunki i możliwości zastosowań badanych betonów w środowiskach silnie agresywnych XF4, XD3, XA3 zastosowano **cement portlandzki specjalny** o wysokiej odporności na siarczany i niskiej zawartości alkaliów oraz umiarkowanym przyroście wytrzymałości CEM I 42,5 N 3SR/NA. We wszystkich recepturach zachowano stałą zawartość cementu równą 360 kg/m³, stałe proporcje kruszywa: piasek stanowił 34%, grys 2÷8 mm - 28% i grys 8÷16 mm - 38%. Zmiennymi były zawartość emulsji bitumicznej (0÷4%), zawartość domieszki upłynniającej (0÷1,1%) i współczynnik w/c (0,3 ÷ 0,44). Zastosowana domieszka bitumiczna w postaci anionowej emulsji została opisana w punkcie 2.1. Jako domieszkę upłynniającą zastosowano superplastyfikator nowej generacji PCE (polieter karboksylowe) do betonów wymagających długiego czasu utrzymania konsystencji, co umożliwia produkcję betonu o wysokich wytrzymałościach przy bardzo niskiej wartości współczynnika w/c . Składy 17 mieszanek zestawiono w tabeli 3.2.

Tabela 3.2. Składy mieszanek betonowych do badań stosowanych

układy planu	Ilości składników [kg/m ³]							
nr	cement	woda	emulsja	upłynniacz	piasek	grys 2-8	grys 8-16	kruszywo razem
1	360	147,6	3,04	0,84	660	543	738	1941
2	360	118,8	11,36	0,84	678	559	758	1995
3	360	118,8	3,04	3,12	684	563	764	2012
4	360	147,6	11,36	3,12	651	536	727	1913
5	360	133,2	0,00	1,98	675	556	754	1984
6	360	133,2	14,40	1,98	662	545	740	1946
7	360	133,2	7,20	0,00	670	552	749	1970
8	360	133,2	7,20	3,96	667	549	745	1960
9	360	108	7,20	1,98	691	569	772	2032
10	360	158,4	7,20	1,98	645	532	721	1899
11	360	133,2	7,20	1,98	668	550	747	1965
12	360	108	0,00	0,00	699	576	781	2056
13	360	158,4	0,00	3,96	650	536	727	1913
14	360	108	7,20	3,96	689	568	770	2027
15	360	158,4	14,40	0,00	641	528	716	1884
16	360	108	14,40	1,98	684	564	765	2013
17	360	133,2	14,40	3,96	660	544	738	1941

3.3. Badania właściwości fizycznych i analiza statystyczna

Analizę statystyczną objęto wyniki pomiarów dziewięciu właściwości fizycznych mieszanek i uzyskanych z nich kompozytów cementowych, których średnie wartości zamieszczono w tabeli 3.3.

Tabela 3.3. Wartości średnie wyników badań poszczególnych właściwości fizycznych świeżej mieszanki (konsystencja Vebe, zawartość powietrza A_c , gęstość objętościowa D) i stwardniałego kompozytu cementowego (gęstość objętościowa D_c , nasiąkliwość wagowa n_w , wytrzymałość na ściskanie odpowiednio po 28 dniach $f_{cm,28}$, po 200 cyklach zamrażania i rozmrażania $f_{cm, F200}$ oraz po 120 dniach $f_{cm,120}$, mrozoodporność mierzona spadkiem wytrzymałości po 200 cyklach zamrażania i rozmrażania $\Delta f_{cm,F200}$)

Nr układu	świeża mieszanka			kompozyt cementowy					
	Vebe [s]	A_c [%]	D [kg/m ³]	D_c [kg/m ³]	n_w [%]	$f_{cm,28}$ [MPa]	$f_{cm, F200}$ [MPa]	$f_{cm,120}$ [MPa]	$\Delta f_{cm,F200}$ [%]
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	16	2,7	2390	2340	3,87	54	51,33	63,67	19,37
2	57	1,8	2370	2360	1,79	56,33	56,33	61	7,65
3	32	2,8	2400	2420	2,84	61	52,33	66,33	21,11
4	3	3,4	2300	2300	3,41	46,33	46,83	50,67	7,57
5	13	1,9	2450	2430	3,56	66,33	59,5	71,67	16,98
6	11	3,4	2310	2310	1,39	49,67	49,16	52	5,46
7	41	3,4	2350	2320	2,31	52,33	49,5	56	11,61
8	4	1,7	2410	2370	2,53	50,17	55,33	59,5	7
9	55	2,5	2450	2420	1,62	60	59,67	66,33	10,05
10	7	3	2350	2340	4,05	48,5	45,25	50,33	10,1
11	11	2,8	2430	2390	2,62	58,33	56,83	63,83	10,97
12	81	7,8	2120	2120	4,99	37,5	32,75	40,5	19,14
13	1	0,7	2410	2350	4,75	50,33	35,33	56,67	37,65
14	14	1,3	2460	2440	2,89	59,33	61,33	66,33	7,54
15	13	3,5	2290	2280	2,62	44,67	38	52,25	27,27
16	29	3	2400	2440	1,53	61,33	60,67	67,66	10,12
17	3	4,5	2350	2340	2,85	49,33	47,5	52	8,65

Sprawdzenie jednorodności wariancji przeprowadzono przy poziomie istotności $\alpha=0,05$ przy czym obliczeniowa wartość kryterium $G_{obl.(max)}$ była każdorazowo mniejsza od wartości krytycznej $G_{kr(0,05;17;2)}=0,309$. Przyjęto zatem, że wariancje prób są jednorodne i przystąpiono do dalszej analizy.

Na podstawie wyników eksperymentu opracowano opisy matematyczne badanych właściwości w zależności od czynników wejściowych w postaci 10 elementowego wielomianu 2 stopnia (kwadratowego) ze współdziałaniami pierwszego rzędu (kombinacje dwóch współczynników). Zostały one zamieszczone w tabeli 3.4.

Następnie, obliczono współczynniki determinacji R^2 , który informuje jaki procent obserwowanego w próbie zróżnicowania konsystencji zostało wyjaśnione liniową regresją, a jaki jest wynikiem oddziaływania innych czynników niekontrolowanych w trakcie badania.

Adekwatność opisu matematycznego dodatkowo weryfikowano za pomocą testu F-Snedecora. Przy poziomie istotności $\alpha=0,05$ spełnienie kryterium $F_{obl.} < F_{kr.(0,05;7;9)}=3,293$ potwierdziło adekwatność i efektywność otrzymanych równania oraz ich przydatność do dalszej analizy wpływu badanych czynników na właściwości fizyczne mieszanki i kompozytu.

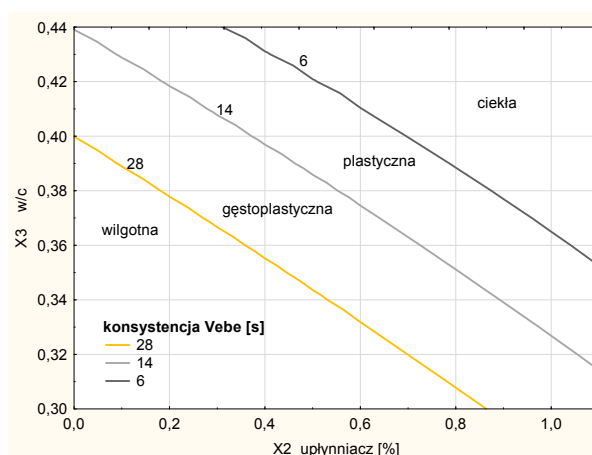
Ocenę istotności wpływu badanych czynników na konsystencję przeprowadzono za pomocą testu t Studenta, uznając składnik aproksymującego wielomianu za istotny przy $\alpha=0,05$, jeżeli wartość bezwzględna obliczonej statystyki $t(b)$ jest większa od wartości krytycznej $t_{kr.(0,05;7)}=2,3646$. Ponadto obliczono poziomy istotności $p(t)$ dla każdego parametru opisu matematycznego konsystencji. Umożliwiły one jakościową ocenę wg zasady, że im $p(t)$ jest mniejsze (bliższe zeru), tym wpływ badanego czynnika na wielkość wyjściową jest bardziej istotny.

Tabela 3.4. Równania regresji opisujące wpływ badanych czynników x_1, x_2, x_3 na poszczególne właściwości fizyczne świeżej mieszanki i stwardniałego kompozytu cementowego

Badana właściwość	Równanie regresji	R^2
$Vebe, s$	$\hat{y}_1=442,38- 9,19x_1- 199,50x_2- 1570,82x_3- 1,67x_1^2+13,69x_2^2+ 1253,18x_3^2- 3,91x_1x_2+ 47,23x_1x_3+433,96x_2x_3$	0.95
$A_c, \%$	$\hat{y}_2=31,64- 4,78x_1-11,77x_2-114,31x_3+ 0,17x_1^2+ 0,56x_2^2+ 114,48x_3^2+ 1,44x_1x_2+ 9,33x_1x_3+ 19,39x_2x_3$	0.92
$D, kg/dm^3$	$\hat{y}_3=617+ 245x_1+ 973x_2+ 7155x_3- 7,68x_1^2- 101x_2^2- 6975x_3^2- 35x_1x_2- 568x_1x_3- 1976x_2x_3$	0.90
$D_c, kg/dm^3$	$\hat{y}_4=987+ 195x_1+ 1041x_2+ 5357x_3- 3x_1^2- 164x_2^2- 5097x_3^2- 34x_1x_2- 467x_1x_3- 1962x_2x_3$	0.93
$n_w, \%$	$\hat{y}_5=24,66- 1,70x_1- 3,77x_2-115,59x_3+ 0,07x_1^2+ 1,02x_2^2+ 165,61x_3^2+ 0,75x_1x_2+ 1,40x_1x_3+ 3,83x_2x_3$	0.94
$f_{cm,28}, MPa$	$\hat{y}_6=-117,73+ 14,19x_1+ 99,86x_2+ 798,42x_3+ 0,27x_1^2- 20,31x_2^2- 918,30x_3^2- 3,24x_1x_2- 41,50x_1x_3- 187,18x_2x_3$	0.91
$f_{cm,F200}, MPa$	$\hat{y}_7=-144,07+ 19,88x_1+ 98,33x_2+ 921,18x_3- 0,97x_1^2- 19,79x_2^2- 1097,53x_3^2- 0,38x_1x_2- 43,22x_1x_3- 199,40x_2x_3$	0.92
$f_{cm,120}, MPa$	$\hat{y}_8=-132,07+ 18,20x_1+ 118,64x_2+ 859,19x_3+0,22x_1^2- 16,30x_2^2- 931,06x_3^2- 3,97x_1x_2- 52,16x_1x_3- 246,53x_2x_3$	0.90
$\Delta f_{cm,F200}, MPa$	$\hat{y}_9=93,04- 7,26x_1+ 1,52x_2- 448,39x_3+ 1,97x_1^2+ 12,62x_2^2+ 680,17x_3^2- 5,51x_1x_2- 2,16x_1x_3- 16,52x_2x_3$	0.88

3.3.1. Konsystencja

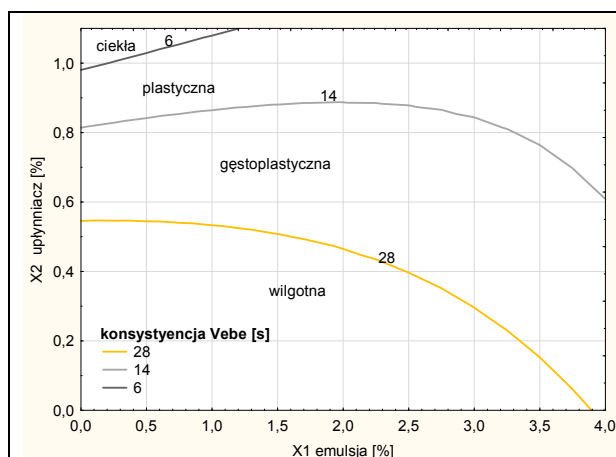
Analiza obliczonych poziomów istotności poszczególnych składników opisu matematycznego zmian konsystencji (odpowiedź $\hat{y}_1$) ujawniła, że w założonych warunkach badania, największy wpływ na konsystencję wywarł czynnik x_2 – upłynniacz ($\alpha=0,004$). Liniową zależność konsystencji mieszanki od zawartości upłynniacza x_2 i wody x_3 obrazują wykresy zamieszczone na rys. 3.1. Wynika z nich, iż konsystencję ciekłą, nadającą się do zagęszczania za pomocą wibratorów wglębnych i formowania elementów na placu budowy, można uzyskać jedynie przy $w/c > 0,35$ stosując domieszkę upłynniającą.



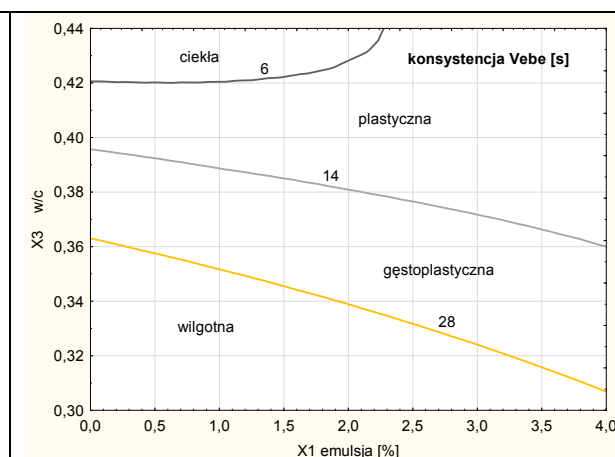
Rys. 3.1. Zależność konsystencji od zawartości upłynniacza x_2 [%] i w/c x_3 [-]

Wykresy zamieszczone na rys. 3.2 i rys 3.3 przedstawiają zależność konsystencji od zawartości emulsji x_1 [%] i upłynniacza x_2 [%] oraz od zawartości emulsji x_1 [%] i w/c x_3 [-]. Wynika z nich korzystny wpływ emulsji na uplastycznienie mieszanki. Wpływ ten nasila się wraz ze wzrostem zawartości domieszki bitumicznej. Natomiast, intensywność oddziaływania emulsji na konsystencję spada wraz ze wzrostem zawartości domieszki upłynniającej (rys. 3.2).

Z kolei z rys. 3.3 wynika, że przy $w/c = 0,36$ można uzyskać konsystencję od wilgotnej poprzez gęstoplastyczną do plastycznej zwiększając stopniowo zawartość emulsji od 0 do 4%. Ponadto wykres ten pokazuje, iż liniowe korzystne oddziaływanie emulsji na urabialność mieszanki słabnie przy $w/c > 0,42$.



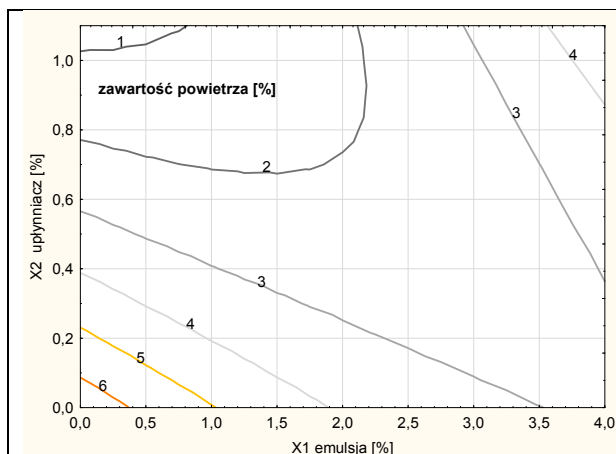
Rys. 3.2. Zależność konsystencji od zawartości emulsji x_1 [%] i upłynniacza x_2 [%]



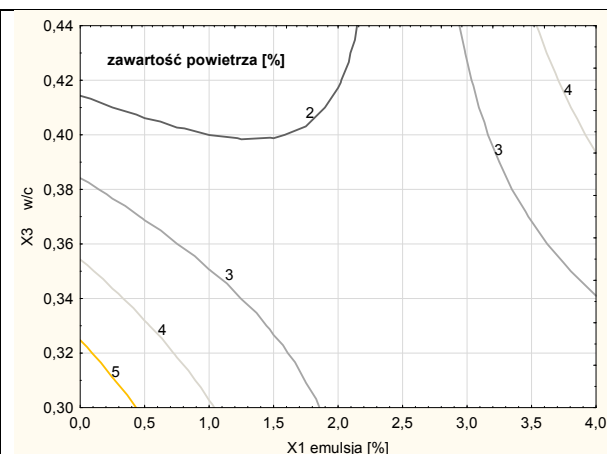
Rys. 3.3. Zależność konsystencji od zawartości emulsji x_1 [%] i współczynnika w/c x_3 [-]

3.3.2. Zawartość powietrza

Wykresy zależności wielkości wyjściowej – zawartości powietrza w mieszance A_c [%] (zmiennej zależnej) od wielkości wyjściowych x_1 , x_2 , x_3 (zmiennych niezależnych) w postaci izolinii przedstawiono na rysunkach 3.4 i 3.5.



Rys. 3.4. Zawartość powietrza w mieszance betonowej A_c [%] w zależności od zawartości emulsji (x_1) i upłynniacza (x_2)

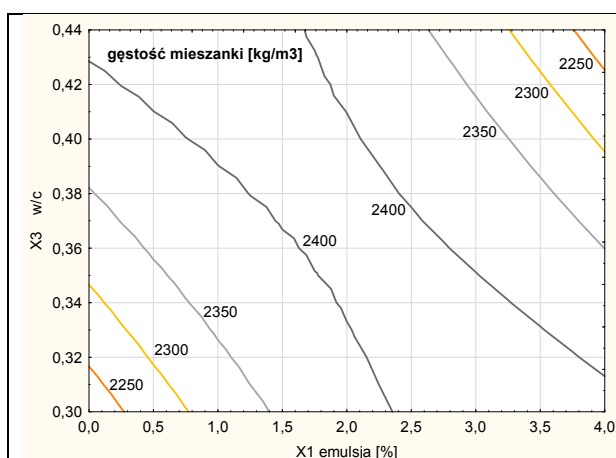


Rys. 3.5. Zawartość powietrza w mieszance betonowej A_c [%] w zależności od zawartości emulsji (x_1) i w/c (x_3)

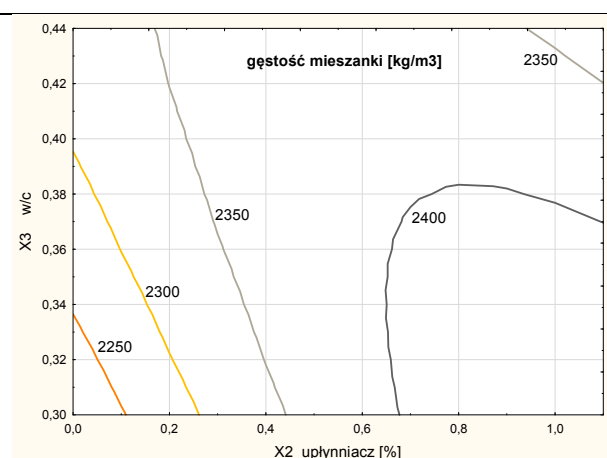
Obliczone poziomy istotności poszczególnych składników wielomianu wskazują, że w założonych warunkach badania, największy wpływ na zawartość powietrza w mieszance $\hat{y}_2$ miały pojedyncze czynniki x_1 – emulsja ($\alpha=0,003$) i x_2 – upłynniacz ($\alpha=0,020$) oraz współdziałania czynników x_1 , x_2 ($\alpha=0,005$) oraz x_1 , x_3 ($\alpha=0,013$). Stwierdzono ujemny liniowy charakter zarówno emulsji jak i upłynniacza, co świadczy iż każdy z tych czynników z osobna w sposób równomierny przyczynia się do zmniejszenia zawartości powietrza w mieszance. Jest to spowodowane korzystnym oddziaływaniem obu czynników na urabialność mieszanki, niezależnie od siebie.

3.3.3. Gęstość objętościowa mieszanki

Wykresy zależności gęstości objętościowej mieszanki (zmiennej zależnej) od wielkości wyjściowych x_1 , x_2 , x_3 (zmiennych niezależnych) przedstawiono na rysunkach 3.6 i 3.7.



Rys. 3.6. Gęstość objętościowa mieszanki D [kg/m^3] w zależności od zawartości emulsji (x_1) i w/c (x_3)



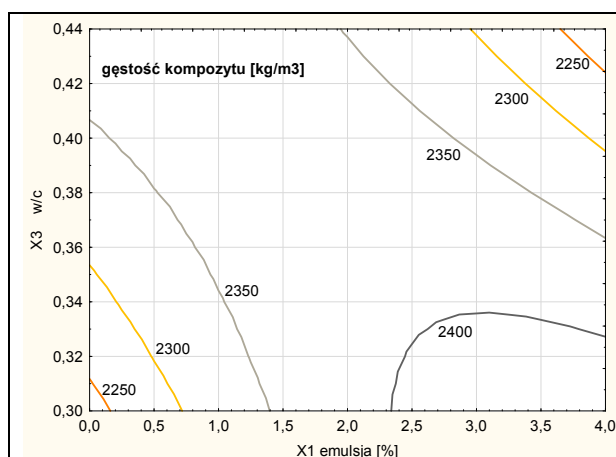
Rys. 3.7. Gęstość objętościowa mieszanki D [kg/m^3] w zależności od zawartości upłynniacza (x_2) i w/c (x_3)

Podobnie jak podczas analizy wyników badania zawartości powietrza, obliczone poziomy istotności wskazują, że istotny wpływ na gęstość objętościową mieszanki, w założonych warunkach badania wywierają pojedyncze czynniki, tj. x_2 – upłynniacz ($\alpha=0,004$) i x_1 – emulsja ($\alpha=0,006$) o charakterze liniowym, a także współdziałania czynników x_1 i x_2 ($\alpha=0,012$) oraz x_1 i x_3 ($\alpha=0,014$). Liniowy i dodatni charakter wpływu czynników x_1 i x_2 świadczy o równomiernym korzystnym wpływie na urabialność mieszanki każdego czynnika z osobna, co przekłada się bezpośrednio na wzrost gęstości. Ujemny charakter współdziałania czynników x_1 i x_2 oraz x_1 i x_3 wskazuje iż jednocześnie oddziaływanie emulsji i upłynniacza oraz emulsji i w/c przyczynia się do obniżenia gęstości. Potwierdza to wcześniejsze spostrzeżenia, iż w przypadku gdy wymagana urabialność mieszanki jest zapewniona przez domieszkę upłynniającą (x_2) lub przez odpowiednio wysokie w/c (x_3) ujawniają się właściwości napowietrzające emulsji. Natomiast, analizując wyłącznie wpływ emulsji na gęstość mieszanki zauważa się właściwości poprawiające jej urabialność.

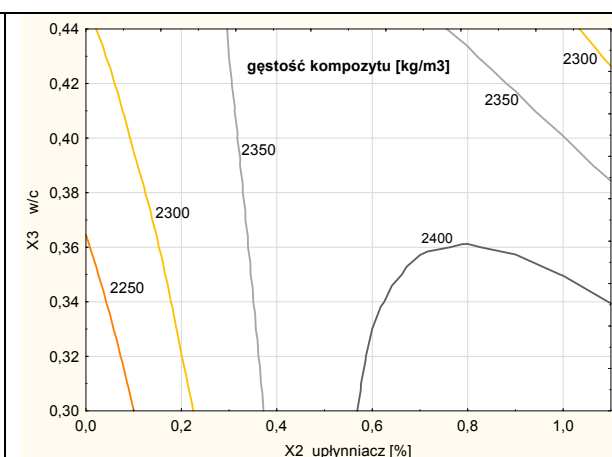
Synergiczny wpływ czynników x_1 i x_2 oraz x_1 i x_3 świadczy o tym, że współdziałanie tych czynników powoduje większe zmiany $\hat{y}_2$ niż suma efektów ich pojedynczych oddziaływań.

3.3.4. Gęstość objętościowa kompozytu

Wykresy zależności wielkości wyjściowej – gęstości kompozytu cementowego D_c [%] (zmiennej zależnej) od wielkości wyjściowych x_1 , x_2 , x_3 (zmiennych niezależnych) w postaci izolinii przedstawiono na rysunkach 3.8 i 3.9.



Rys. 3.8. Gęstość objętościowa kompozytu cementowego D_c [kg/m^3] w zależności od zawartości emulsji (x_1) i w/c (x_3)



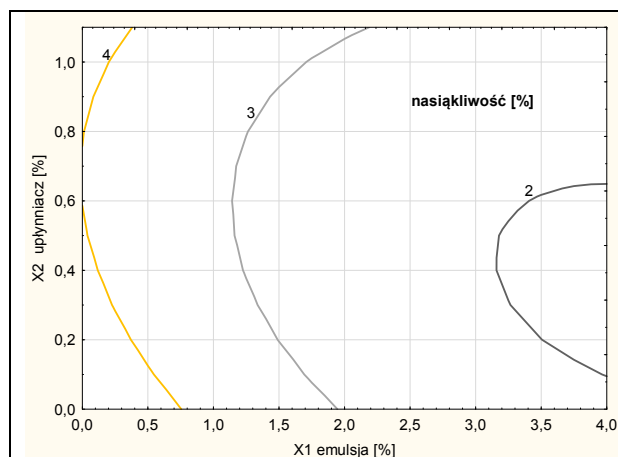
Rys. 3.9. Gęstość objętościowa kompozytu cementowego D_c [kg/m^3] w zależności od zawartości upłynniacza (x_2) i w/c (x_3)

Obliczone poziomy istotności, wskazują, iż najbardziej istotny wpływ na gęstość kompozytu cementowego w założonych warunkach badania wywierają pojedyncze czynniki o charakterze liniowym, tj.: x_2 – upłynniacz ($\alpha=0,0008$) i x_1 – emulsja ($\alpha=0,0070$), a także współdziałanie czynników x_1 i x_3 ($\alpha=0,0115$). Liniowy, a zarazem dodatni charakter czynników x_1 i x_2 świadczy o równomiernym korzystnym wpływie na urabialność mieszanki każdego czynnika z osobna, co przekłada się bezpośrednio na wzrost gęstości kompozytu. Ujemny charakter współdziałania czynników x_1 i x_3 wskazuje, iż jednocześnie oddziaływanie emulsji i w/c przyczynia się do obniżenia wartości gęstości kompozytu. Proces ten jest spowodowany właściwościami napowietrzającymi emulsji, które nasilają się wraz ze wzrostem w/c . Ponadto, nadmiar wody, który nie poprawia urabialności, przyczynia się do zwiększenia porowatości kompozytu cementowego, a to przekłada się na obniżenie gęstości.

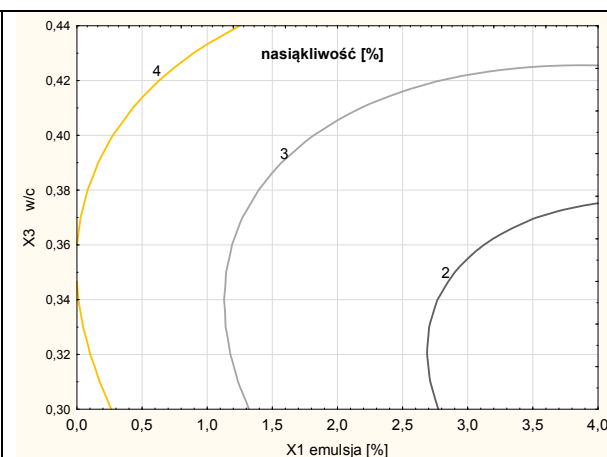
3.3.5. Nasiąkliwość wagowa

Z analizy obliczonych poziomów istotności dla poszczególnych współczynników, wynika jednoznaczny istotny ($\alpha=0,0317$) wpływ emulsji na nasiąkliwość wagową kompozytu. Liniowy ujemny charakter świadczy o jego równomiernym, korzystnym wpływie na obniżenie nasiąkliwości.

Wykresy zależności nasiąkliwości wagowej n_w [%] od wielkości wejściowych x_1 , x_2 , x_3 (zmiennych niezależnych) przedstawiono na rysunkach 3.10 i 3.11.



Rys. 3.10. Nasiąkliwość wagowa n_w [%] w zależności od zawartości emulsji (x_1) i upłynniacza (x_2)

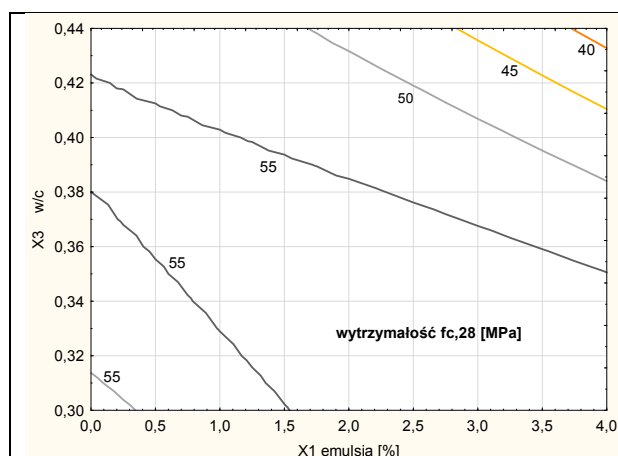


Rys. 3.11. Nasiąkliwość wagowa n_w [%] w zależności od zawartości emulsji (x_1) i w/c (x_3)

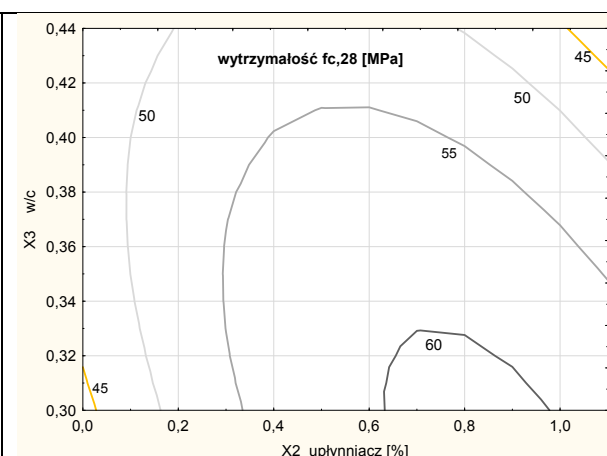
Zawartość domieszki w ilości 2% masy cementu powodowała spadek nasiąkliwości do poziomu 2,53% ($w/c = 0,37$), zaś 4% zawartość domieszki przyczyniła się do obniżenia nasiąkliwości do 1,39% ($w/c = 0,37$). Uzyskanie tak niskich nasiąkliwości wynika z hydrofobizujących właściwości domieszki bitumicznej.

3.3.6. Wytrzymałość na ściskanie po 28 dniach dojrzewania

Graficzne zależności wielkości wyjściowej – wytrzymałości na ściskanie po 28 dniach $f_{cm,28}$ [MPa] (zmienną zależną) od wielkości wyjściowych x_1 , x_2 , x_3 (zmiennych niezależnych) przedstawiono na rysunkach 3.12 i 3.13.



Rys. 3.12. Wytrzymałość na ściskanie po 28 dniach $f_{cm,28}$ [MPa] w zależności od zawartości emulsji (x_1) i w/c (x_3)

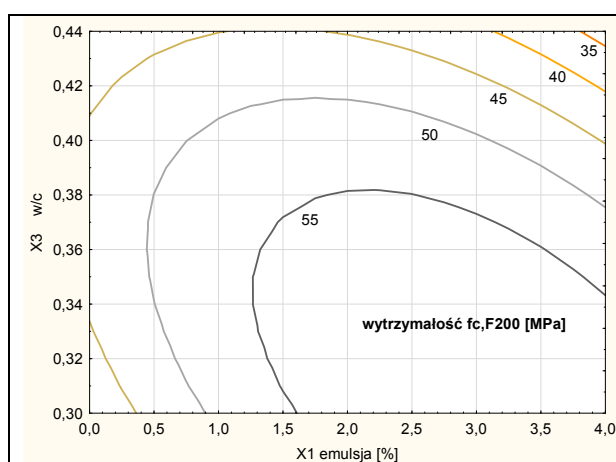


Rys. 3.13. Wytrzymałość na ściskanie po 28 dniach $f_{cm,28}$ [MPa] w zależności od zawartości upłynniacza (x_2) i w/c (x_3)

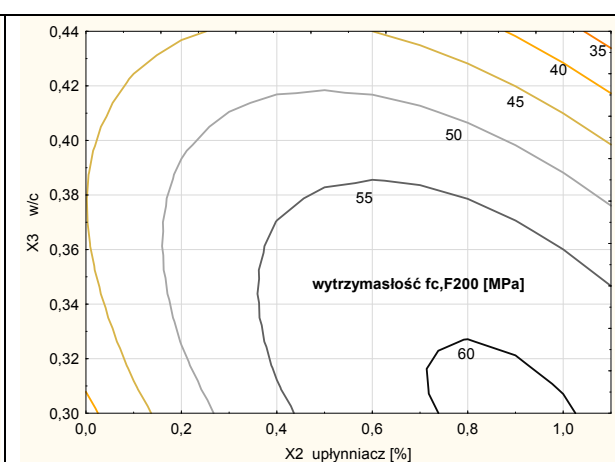
Obliczone poziomy istotności wskazują, iż istotny wpływ na wytrzymałość $f_{c,28}$ w założonych warunkach badania wywierają pojedyncze czynniki o charakterze liniowym x_2 – upłynniacz ($\alpha=0,0015$) i x_1 – emulsja ($\alpha=0,0356$) oraz nieliniowym x_2 – upłynniacz ($\alpha=0,0184$) a także współdziałania czynników x_1 i x_3 ($\alpha=0,0240$) i x_2 i x_3 ($\alpha=0,0092$). Liniowy dodatni charakter czynników x_1 i x_2 świadczy o równomiernym korzystnym wpływie na urabialność mieszanki każdego czynnika z osobna, co przekłada się bezpośrednio na wzrost gęstości a w konsekwencji wzrost wytrzymałości na ściskanie.

3.3.7. Wytrzymałość na ściskanie po 200 cyklach zamrażania i rozmrażania

Wykresy zależności wytrzymałości na ściskanie po 200 cyklach zamrażania i rozmrażania $f_{c,F200}$ [MPa] od wielkości wejściowych x_1 , x_2 , x_3 przedstawiono na rys. 3.14 i 3.15.



Rys. 3.14. Wytrzymałość na ściskanie po 200 cyklach zamrażania i rozmrażania $f_{cm,F200}$ [MPa] w zależności od zawartości emulsji (x_1) i w/c (x_3)



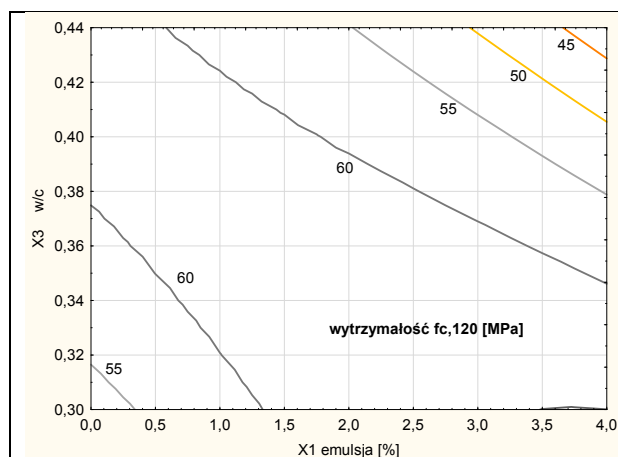
Rys. 3.15. Wytrzymałość na ściskanie po 200 cyklach zamrażania i rozmrażania $f_{cm,F200}$ [MPa] w zależności od zawartości upłynniacza (x_2) i w/c (x_3)

Analiza poziomów istotności poszczególnych składników opisu matematycznego potwierdza istotny dodatni wpływ liniowy emulsji x_1 ($\alpha=0,0135$). Natomiast pojedyncze wpływy pozostałych czynników x_2 – upłynniacz i x_3 – w/c są istotne ale nie jednoznaczne. Współdziałania czynników x_1 i x_3 ($\alpha=0,0311$) oraz x_2 i x_3 ($\alpha=0,0112$) wywierają istotny wpływ na wytrzymałość po 200 cyklach zamrażania i rozmrażania. Mają one charakter ujemny, co wskazuje iż zwiększanie w/c , w obu przypadkach, wpływa niekorzystnie na mrozoodporność kompozytu cementowego. Wskazuje to na konieczność ograniczenia w/c , a odpowiednia urabialność mieszanki pozwalająca na skuteczne zagęszczenie powinna być zapewniona przez pozostałe czynniki x_1 i x_2 .

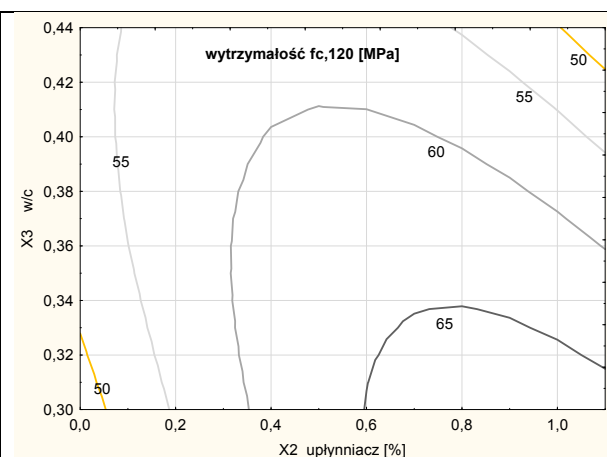
3.3.8. Wytrzymałość na ściskanie po 120 dniach dojrzewania

Izolinie zależności wytrzymałości na ściskanie po 120 dniach $f_{c,120}$ [MPa] (zmiennej zależnej) od wielkości wejściowych x_1 , x_2 , x_3 (zmiennych niezależnych) przedstawiono na rysunkach 3.16 i 3.17.

Obliczone poziomy istotności wskazują, iż istotny wpływ na wytrzymałość $f_{c,120}$ w założonych warunkach badania wywierają pojedyncze czynniki o charakterze liniowym x_1 – emulsja ($\alpha=0,0234$), x_2 – upłynniacz ($\alpha=0,0012$) i x_3 – w/c ($\alpha=0,0429$), a także współdziałanie czynników x_1 i x_3 ($\alpha=0,0167$) oraz x_2 i x_3 ($\alpha=0,0048$). Analiza oceny istotności parametrów opisu matematycznego wytrzymałości $f_{c,120}$ potwierdza iż w celu uzyskania wyższej $f_{c,120}$ należy dążyć do minimalizacji w/c , zaś właściwą urabialność mieszanki pozwalającą na skuteczne zaformowanie próbek powinno się zapewnić stosując odpowiednie domieszki.



Rys. 3.16. Wytrzymałość na ściskanie po 120 dniach $f_{c,120}$ [MPa] w zależności od zawartości emulsji (x_1) i w/c (x_3)



Rys. 3.17. Wytrzymałość na ściskanie po 120 dniach $f_{c,120}$ [MPa] w zależności od zawartości upłynniacza (x_2) i w/c (x_3)

3.3.9. Spadek wytrzymałości na ściskanie po 200 cyklach zamrażania i rozmrażania

Mrozoodporność po 200 cyklach zamrażania i rozmrażania określano spadkiem wytrzymałości na ściskanie. Spadek wytrzymałości na ściskanie obliczano ze wzoru

$$\Delta f_{cm,F200} = \frac{f_{cm,120} - f_{cm,F200}}{f_{cm,120}} \cdot 100\%,$$

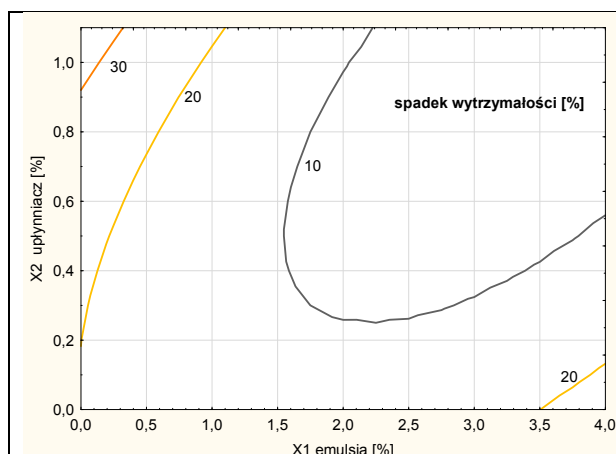
gdzie:

$f_{cm,F200}$ – średnia wytrzymałość na ściskanie próbek, po ich ostatnim rozmrożeniu, [MPa];

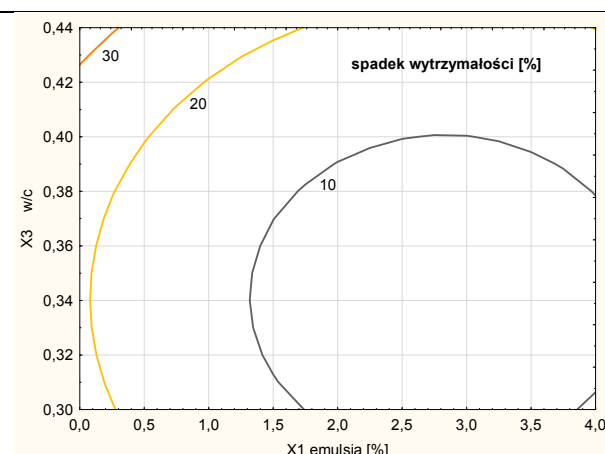
$f_{cm,120}$ – średnia wytrzymałość na ściskanie próbek porównawczych, [MPa]

Graficzne zobrazowanie zależności wielkości wyjściowej – mrozoodporności mierzonej spadkiem wytrzymałości po 200 cyklach zamrażania i rozmrażania $\Delta f_{cm,F200}$ [%] od wielkości wejściowych x_1 , x_2 , x_3 przedstawiono na rysunkach 3.18; 3.19; 3.20.

Analiza statystycznej istotności parametrów wielomianu wskazuje, iż najbardziej istotny wpływ na mrozoodporność kompozytu cementowego mierzoną spadkiem wytrzymałości po 200 cyklach zamrażania i rozmrażania wywiera czynnik x_1 – emulsja ($\alpha=0,020$) oraz współdziałanie czynników x_1 i x_2 ($\alpha=0,056$). Korzystny wpływ współdziałania emulsji i upłynniacza wynika z hydrofobizujących właściwości emulsji i oraz charakteru upłynniacza pozwalającego na redukcję w/c i zapewnienie odpowiedniej urabialności. Należy tutaj zauważyć, iż spadek wytrzymałości nie oznacza automatycznego obniżania wytrzymałości próbek podczas zamrażania i rozmrażania. W zdecydowanej większości układów próbki poddawane cyklicznemu zamrażaniu przybierały na wytrzymałości lecz w wolniejszym tempie niż miało to miejsce w przypadku próbek porównawczych nie poddawanych zamrażaniu. Zatem, mniejszy spadek wytrzymałości nie jest równoznaczny z wyższą wytrzymałością końcową po badaniu mrozoodporności. Ma to miejsce np. w układach 9 i 17, gdzie w układzie 9 spadek $\Delta f_{cm,F200}=10,05\%$ przy wyższej wytrzymałości $f_{cm,F200}=59,67$ MPa jest większy niż w układzie 17 $\Delta f_{cm,F200}=8,65\%$ przy $f_{cm,F200}=47,50$ MPa.



Rys. 3.18. Spadek wytrzymałości po 200 cyklach zamrażania i rozmrażania $\Delta f_{cm,F200}$ [%] w zależności od zawartości emulsji (x_1) i upłynniacza (x_2)

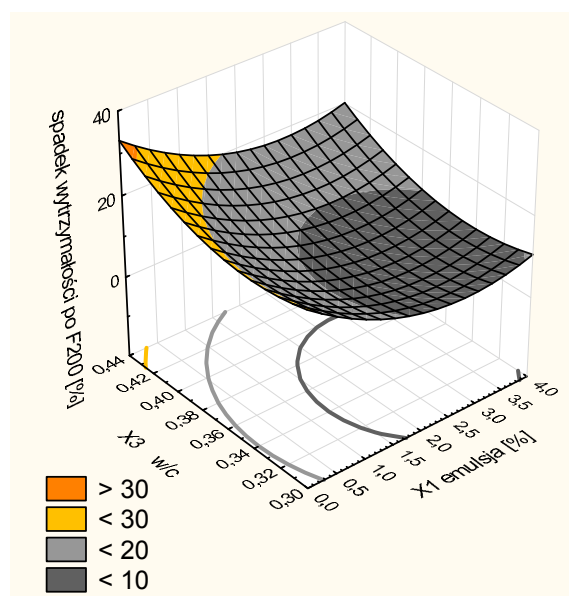


Rys. 3.19. Spadek wytrzymałości po 200 cyklach zamrażania i rozmrażania $\Delta f_{cm,F200}$ [%] w zależności od zawartości emulsji (x_1) i w/c (x_3)

W celu optymalizacji modelu w postaci funkcji $\hat{y}_9(x)$, czyli wyznaczenia współrzędnych punktu osobliwego obszaru opisanego równaniem, zróżniczkowano to równanie względem zmiennych niezależnych x_1 , x_2 , x_3 i po porównaniu do 0 otrzymano układ trzech równań z trzema niewiadomymi. Rozwiązaniem tego układu równań są współrzędne punktu osobliwego – fizycznie istniejące wartości:

$$\begin{cases} x_{1,optm} = 3,25 [\%] \\ x_{2,optm} = 0,88 [\%] \\ x_{3,optm} = 0,345 [-], \end{cases}$$

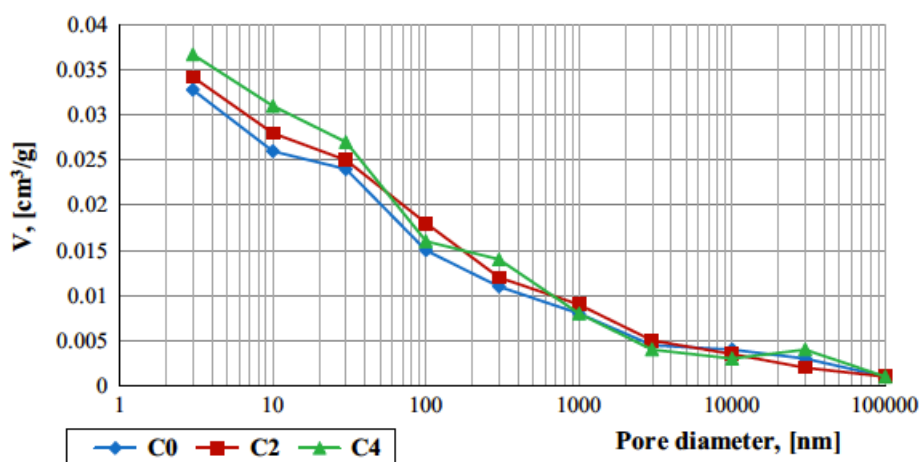
stanowiące zarazem parametry, przy których spadek wytrzymałości jest najmniejszy i wynosi $\hat{y}_{9,min} = 4,43$ [%]. Zatem, przy zoptymalizowanych wartościach zmiennych niezależnych (podatność na naprzemienne zamrażanie i rozmrażanie mierzone spadkiem wytrzymałości po 200 cyklach jest najmniejsza.



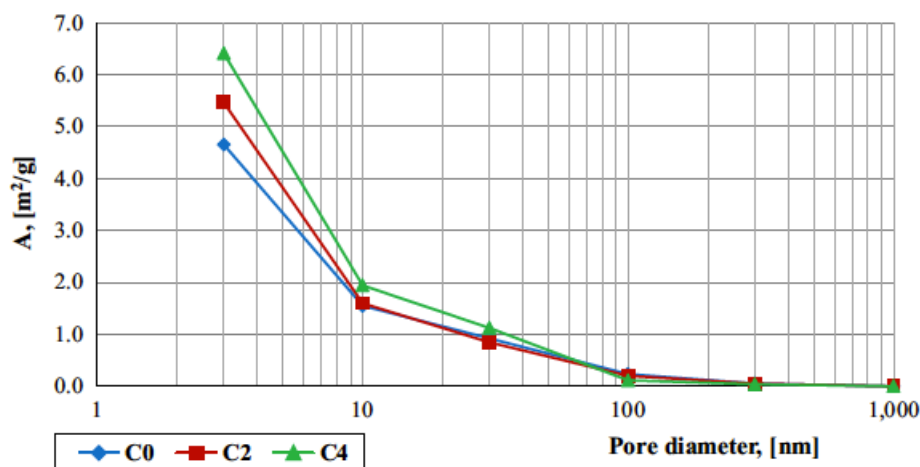
Rys. 3.20. Wykres powierzchniowej zależności spadku wytrzymałości po 200 cyklach zamrażania i rozmrażania $\Delta f_{c,F200}$ [%] od zawartości emulsji (x_1) i stosunku wodno-cementowego w/c (x_3)

3.3.10. Porowatość kompozytu

Do badań porozymetrycznych wybrano 3 spośród 17 składów różniące się jedynie zawartością emulsji bitumicznej. Były to: seria 5 bez emulsji bitumicznej oraz serie 11 i 6 z emulsją bitumiczną w ilości odpowiednio 2% i 4%. Wyniki przedstawione na rys. 3.21. i rys. 3.22. wskazują, iż dodatek emulsji bitumicznej w ilości 2% i 4% masy cementu nieznacznie wpłynął na zmianę struktury porowatości betonów. Jej korzystny wpływ przejawiał się w zwiększeniu zawartości drobnych porów kapilarnych (3÷30 nm) z jednoczesnym zmniejszeniem udziału makroporów w strukturze porowatości badanych betonów (>3 000 nm).



Rys. 3.21. Charakterystyki porowatości betonów z emulsją bitumiczną i betonów kontrolnych



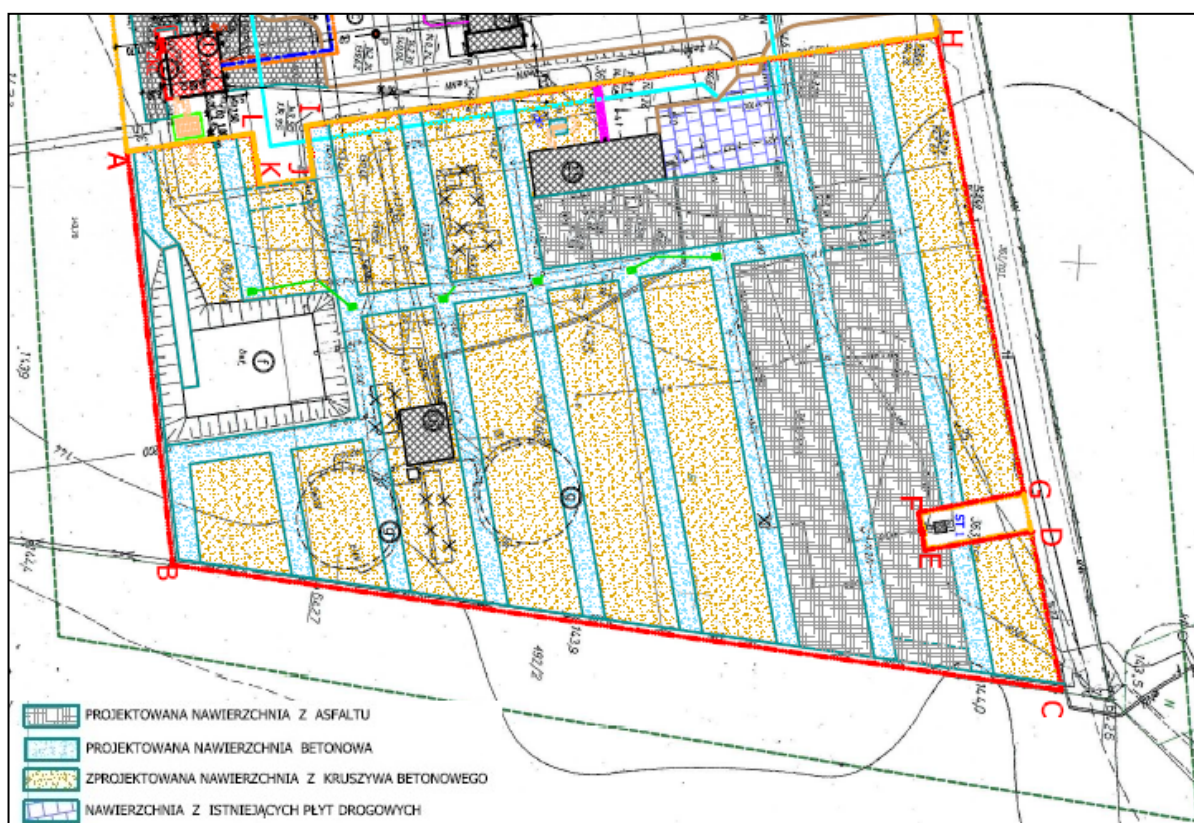
Rys. 3.22. Całkowita powierzchnia porów w betonach z emulsją bitumiczną i w betonach kontrolnych

Przedstawione wyniki badania porowatości wskazują, że modyfikacja emulsją bitumiczną betonów cementowych umożliwia otrzymanie tworzywa o zbliżonej strukturze porowatości w stosunku do betonów niemodyfikowanych z niewielkim przesunięciem porowatości w kierunku drobnych porów kapilarnych.

4. Badania przemysłowe związane z poprawą właściwości betonów cementowych przy wykorzystaniu emulsji bitumicznej

4.1. Badania przemysłowe przeprowadzone przy realizacji nawierzchni drogowych

Prezentowane przedsięwzięcie obejmowało wykonanie dziesięciu utwardzonych placów do składowania 2 tysięcy nowo wyprodukowanych samochodów osobowych na terenie Zakładu Pojazdów Mechanicznych DKD w Małaszewiczach k. Terespoła. Place zostały przedzielone drogami dojazdowymi szerokości 6,0 m i łącznej długości ponad 1250 m (rys. 4.1).



Rys. 4.1. Betonowe drogi do placów składowych na terenie zakładu DKD

W trakcie realizacji stosowano 3 składy mieszanek cementowych zamieszczone w tabeli 4.1. Skład pierwszy z domieszką napowietrzającą w postaci detergentu bazował na recepturze opracowanej wg normy PN-EN 206-1. Skład drugi modyfikowany był emulsją bitumiczną i posłużył do eksperymentalnego wykonania jednej drogi pomiędzy placami nr 2 i 3, zaś skład trzeci jako wzorcowy nie zawierał detergentu ani emulsji. Poszczególne receptury charakteryzowały się stałym rodzajem i jednakowymi proporcjami poszczególnych składników.

Tabela 4.1. Składy betonów stosowanych podczas realizacji nawierzchni drogowych na terenie zakładów samochodowych DKD w Wolnym Obszarze Celnym w Małaszewiczach

skład	Ilość składników, kg/m ³							
	cement	emulsja bitumiczna	plastyfikator/ superplastyfikator	domieszka napowietrzająca	piasek płukany	grys		woda
						2 ÷ 8mm	8 ÷ 16mm	
CC-D	360	-	3,20/2,48	1,98	641	341	720	133,2
CC-E		7,2	3,20/2,50	-	663	465	743	
CC-0		-	3,40/2,50	-	670	470	750	

Przed betonowaniem wykonano deskiowania ciągów komunikacyjnych o szerokości 6,0 m. Mieszanka kompozytowa o konsystencji w przedziale 90-130 mm, mierzonej metodą opadu stożka Abramsa, układana była bezpośrednio z betonowozów na podbudowę z kruszonego betonu. Rozprowadzanie, wyrównywanie i zagęszczanie odbywało się przy użyciu pneumatycznej listwy wibracyjnej (rys. 4.2) wyposażonej we wciągarkę umożliwiające sprawny i łatwy przesuw po ustawionym deskiowaniu. Po zawibrowaniu, nawierzchnia była zacierana mechanicznie i teksturowana poprzecznie przez szczotkowanie, w celu nadania jej odpowiedniej szorstkości i łatwiejszego odprowadzania wód opadowych. Jednocześnie, stosownie do warunków pogodowych, zakrywano ją folią jako zabezpieczenie przed deszczem, jak również przed gwałtownym odparowywaniem wody pod wpływem nasłonecznienia i wysokiej temperatury. Po 24 godzinach od zabetonowania wykonywano dylatacje pozorne w odstępach co 6,0 m, przez nacinanie płyty do 1/4 grubości. Następnie, przykrywano nawierzchnię geowłókniną i polewano systematycznie wodą. Okres pielęgnacji wynosił 21 dni.



Rys. 4.2. Formowanie nawierzchni kompozytowej przy użyciu pneumatycznej listwy wibracyjnej z przesuwem wciągarkowym. Fot. Autor

Po 28 dniach dojrzewania zbadano gęstość D [kg/m^3], wytrzymałości na ściskanie $f_{cm,28}$ [MPa], nasiąkliwość masową n_w [%] i przepuszczalność wody W [mm], oraz wytrzymałość na rozciąganie przy zginaniu $f_{cm,fl}$ [MPa]. Próbkę przeznaczoną do oceny odporności na działanie mrozu umieszczono w automatycznej komorze do badania mrozoodporności, natomiast próbki porównawcze (świadki) pozostawiono w wodzie zgodnie z normą PN-B-06250. Po 150 cyklach naprzemiennego zamrażania i rozmrażania oznaczono ich masę i wytrzymałość.

Zestawienie wyników badania próbek po 28 dniach dojrzewania zamieszczono w tabeli 4.2. Wytrzymałość na ściskanie była wprost proporcjonalna do gęstości objętościowej. Najniższe wytrzymałości uzyskały kompozyty napowietrzone detergentem CC-D, zaś najwyższe - kompozyty wzorcowe CC-0.

Tabela 4.2. Wytrzymałość na ściskanie kompozytów cementowych napowietrzonych CC-D, z emulsją CC-E, wzorcowych CC-0

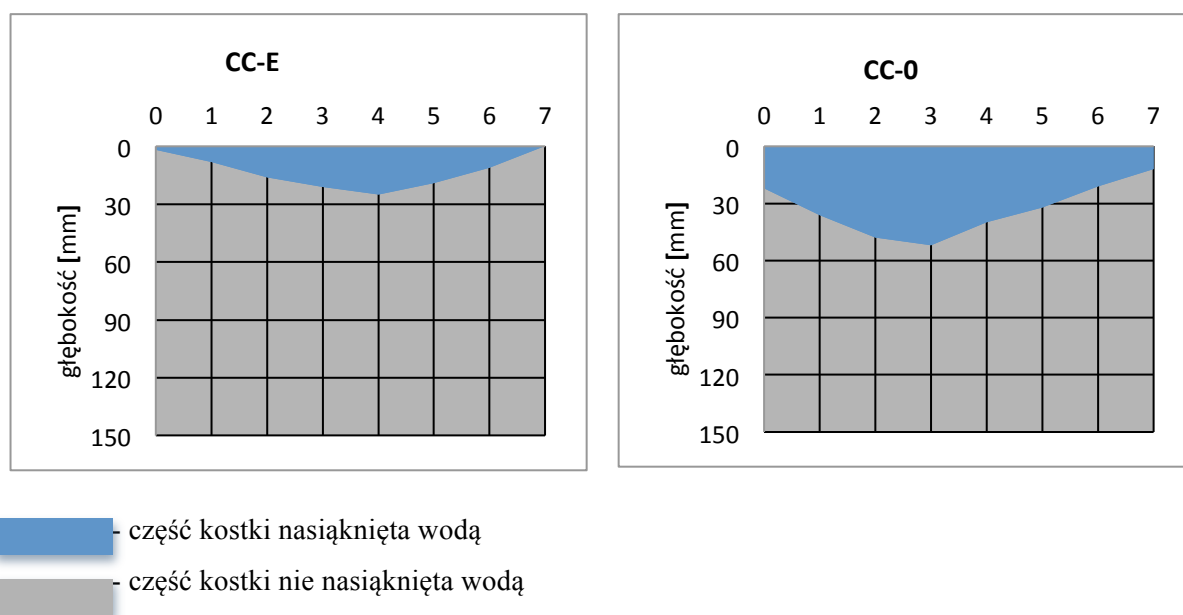
skład	wytrzymałość [MPa]	s [MPa]
CC-D	48,02	6,66
CC-E	57,61	1,38
CC-0	68,20	5,76

Największą gęstością objętościową o wartości powyżej 2360 kg/m^3 charakteryzowały się wzorcowe kompozyty cementowe CC-0. Natomiast obniżona gęstość składu CC-E do poziomu 2340 kg/m^3 wynika z napowietrzających właściwości emulsji bitumicznej. Najmniejszą gęstość poniżej 2270 kg/m^3 uzyskały kompozyty cementowe napowietrzane domieszką na bazie detergentu CC-D.

Z analizy wytrzymałości na ściskanie próbek poddawanych zamrażaniu $f_{cm,F150}$ i świadków $f_{cm,80÷140}$ wynika, że niezależnie od zastosowanych domieszek wszystkie kompozyty spełniały założone kryterium mrozoodporności. Po 150 cyklach zamrażania i rozmrażania w żadnym wypadku nie zaobserwowano spadku wytrzymałości w stosunku do początkowej, natomiast wytrzymałości próbek zamrażanych nie były niższe w stosunku do porównawczych o więcej, niż dopuszczalne normowo 20%. Różnice w masie próbek przed i po badaniu mrozoodporności były pomijalne, a ubytek masy stwierdzono tylko w przypadku betonów wzorcowych – seria CC-0. Wyniósł on zaledwie 0,07% przy dopuszczalnym normowo 5%.

Przeprowadzone badania potwierdzają, iż przy odpowiednim doborze składników i stosunkowo niskim wskaźniku $w/c \leq 0,37$ jest możliwy do spełnienia wymóg mrozoodporności F150 bez konieczności stosowania domieszek napowietrzających, które obniżają właściwości mechaniczne w tym również szczególnie istotną w przypadku nawierzchni drogowych, wytrzymałość na rozciąganie przy zginaniu. W stosunku do kompozytów modyfikowanych emulsją była ona niższa o 7%, zaś w stosunku do betonów bez domieszki napowietrzającej o 13%.

W badaniach przemysłowych, podobnie jak w poprzedzających je badaniach stosowanych, największy wpływ emulsji bitumicznej zaobserwowano przy oznaczaniu nasiąkliwości. Użyta domieszka emulsji spowodowała jej obniżenie o 25%. Przeprowadzane badania potwierdzają, iż jedynie kompozyty cementowe z domieszką bitumiczną (CC-E) spełniają obostrzone do 4% kryterium nasiąkliwości. Podobnie korzystny wpływ emulsji uwidoczniły badania wodoszczelności. Maksymalna przepuszczalność wody pod ciśnieniem 0,8 MPa w kompozytach z emulsją sięgała 26 mm, zaś w pozostałych przypadkach była wyraźnie wyższa i wynosiła od 30 do 52 mm. Badania przeprowadzono po 28 dniach w przypadku składu wzorcowego CC-0, natomiast w pozostałych przypadkach po 35 (CC-E) i 46 (CC-D) dniach. Wykresy obrazujące przełomy próbek z zaznaczoną na niebiesko częścią nasiąkniętą wodą zamieszczono na rys. 4.3.



Rys. 4.3. Wykresy głębokości wnicania wody – skład CC-E i CC-0

Na rys. 4.4 przedstawiono drogi dojazdowe z kompozytów cementowych w trakcie użytkowania.



Rys. 4.4. Place do składowania nowo wyprodukowanych samochodów osobowych Fot. Autor

Po 3 latach użytkowania dokonano szczegółowych oględzin wykonanych nawierzchni, podczas których nie stwierdzono zużycia, ani żadnych oznak destrukcji mrozowej. Ponadto, w przypadku nawierzchni wykonanych z kompozytów cementowych modyfikowanych emulsją bitumiczną, nie zauważono rys skurczowych, co miało miejsce w pozostałych przypadkach. Rys. 4.5 przedstawia nawierzchnię drogową z kompozytu cementowego modyfikowanego emulsją bitumiczną po 3 latach użytkowania. Przeprowadzone badanie wytrzymałości na rozciąganie przy zginaniu próbek przechowywanych przez 3 lata w warunkach rzeczywistej eksploatacji pokazało wyraźny jej przyrost (ok. 25%) w stosunku do wyników badań na próbkach 28 dniowych. W przypadku kompozytów bez włókien wynosiła ona 7,61 MPa, zaś z włóknami 7,50 MPa. Nie stwierdzono zatem wyraźnego wpływu włókien syntetycznych na wytrzymałość na rozciąganie przy zginaniu.



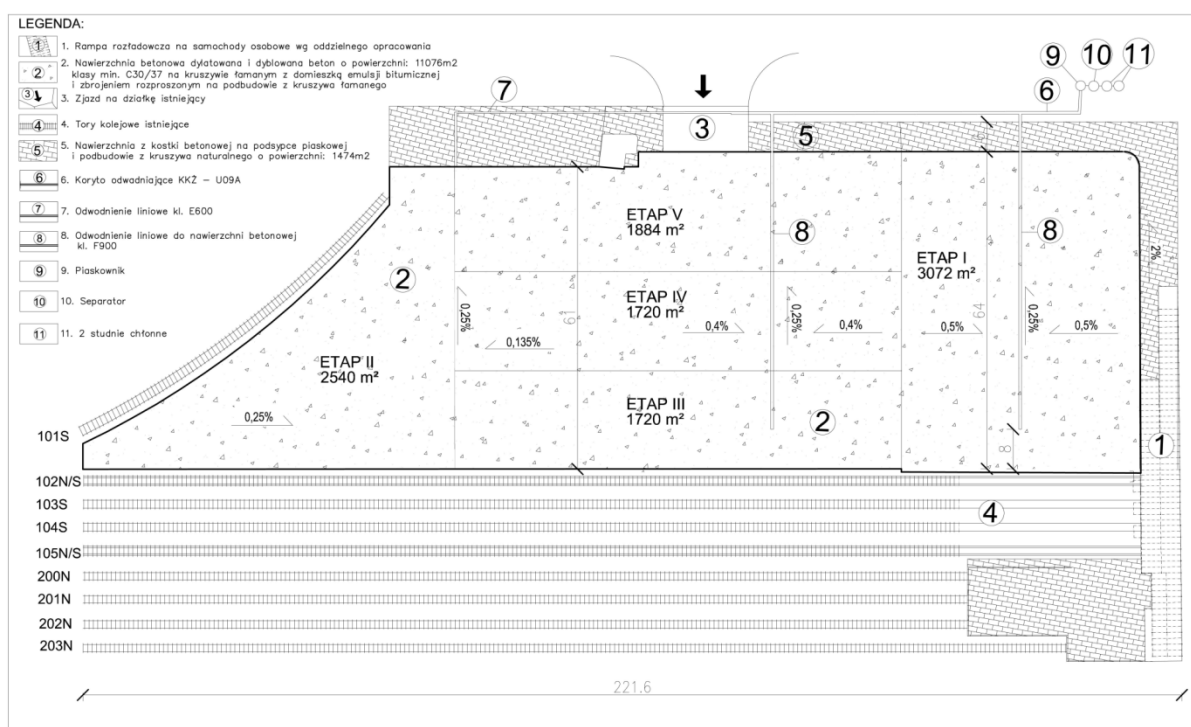
Rys. 4.5. Nawierzchnia drogową z kompozytu cementowego modyfikowanego emulsją bitumiczną po 3 latach eksploatacji. Fot. Autor

4.2. Realizacja nawierzchni placu kontenerowego z kompozytów cementowych modyfikowanych emulsją bitumiczną

4.2.1. Konstrukcja nawierzchni

Rozszerzenie działalności terminala w Wolnym Obszarze Celnym koło Terespoła, o dystrybucję towarów w kontenerach wymagało ciężkiego sprzętu przeładunkowego w postaci kontenerowych żurawi jezdnych i inwestycji w odpowiednią nawierzchnię odporną na silne obciążenia mechaniczne (naciski na osie żurawi kontenerowych są 10 krotnie większe niż dopuszczalne na drogach w UE) i agresywne oddziaływania środowiskowe (klasy ekspozycji XC4, XF4, XM2). Dodatkowo, przy doborze układu konstrukcyjnego poszczególnych warstw nawierzchni oraz technologii wykonania wzięto pod uwagę konieczność nieprzerwanej pracy terminala i możliwie krótki czas realizacji inwestycji. Mając na względzie powyższe, przyjęto nowatorskie w polskich warunkach rozwiązanie konstrukcyjno-materiałowe nawierzchni betonowej ułożonej bezpośrednio na podbudowie z kruszywa łamanego stabilizowanego mechanicznie, z pominięciem chudego betonu. Ponadto, założono ulepszenie istniejącego podłoża piaszczystego poprzez doziarnienie i dogęszczenie lub stabilizację cementową.

Stosownie do oczekiwań inwestora przyjęto 5 etapową realizację (rys. 4.6), aby możliwe było jednocześnie funkcjonowanie terminala na 3/5 powierzchni i prowadzenie prac na 2/5 powierzchni (1/5 powierzchni – roboty, 1/5 powierzchni – pielęgnacja i dojrzewanie). W ten sposób wykonano nawierzchnię terminala kontenerowego z betonu modyfikowanego emulsją bitumiczną o powierzchni 11076 m².

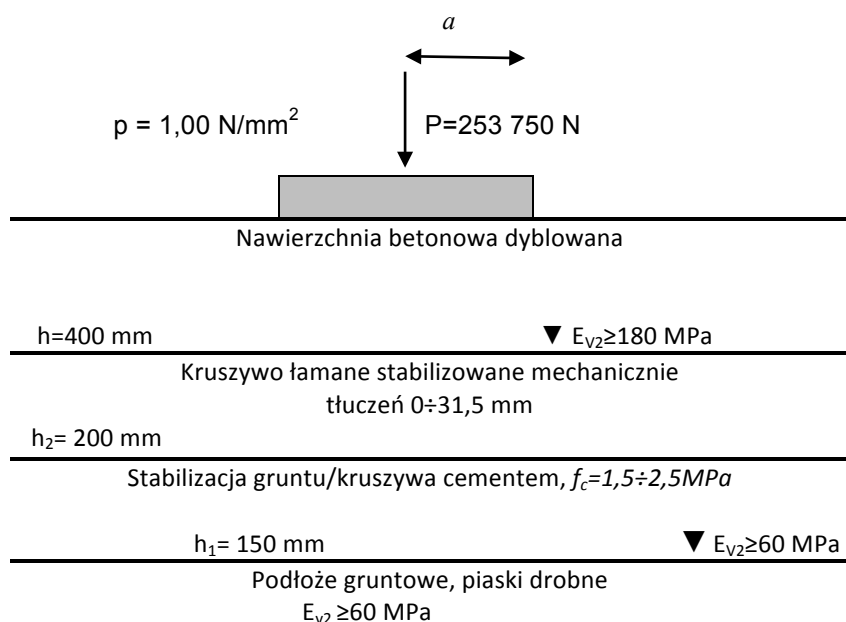


Rys. 4.6. Etapowanie prac przy realizacji Innowacyjnego Multimodalnego Terminalu Kontenerowego w WOC k. Terespoła

Przy projektowaniu konstrukcji nawierzchni terminala przyjęto obciążenie od kontenerowego żurawia jezdnych (ang. Reach Stacker) model SC 4531 TA 5, którego maksymalne obciążenie przekazywane na przednią oś podczas podnoszenia kontenera wynosi 101,5 t., zaś ciśnienie kontaktowe wywierane przez oponę na nawierzchnię wynosi 1,0 N/mm² (1 MPa). Obciążenie osi

przedniej przenoszone jest na każde z 4 kół, tj. $101,5 \text{ t}/4 = 25,375 \text{ t}$ ($253\,750 \text{ N}$). Obciążenie to wynika z masy własnej pojazdu Reach Stacker równej $71,1 \text{ t}$ oraz obciążenia podnoszonego kontenera. Ponadto, uwzględniono obciążenia od składowanych w stosy 30 tonowych kontenerów stosując współczynnik redukcyjny ciężaru zależny od liczby kontenerów w stosie. Przyjęto ciężar obliczeniowy stosu z pięcioma kontenerami $0,6 \times 5 \times 300 \text{ kN} = 900,00 \text{ kN}$, przekazywany na nawierzchnię za pośrednictwem czterech narożnych stopek o wymiarach $162 \times 178 \text{ mm}$, z ciśnieniem stykowym o wartości $7,8 \text{ N/mm}^2$.

Schemat układu warstw przedstawiono na rys. 4.7.



Rys. 4.7. Schemat układu warstw konstrukcyjnych nawierzchni

4.2.2. Realizacja nawierzchni

Na podstawie badań laboratoryjnych wyspecyfikowano trzy składy betonów o $w/c=0,35$ do wykonania nawierzchni betonowej (tabela. 4.3). Składy dobrano z uwagi na ceny jednostkowe gryszy granitowego i bazaltowego w trakcie betonowania nawierzchni, ceny domieszek do betonu, a także z uwagi na wartość średniej temperatury dobowej w trakcie realizacji nawierzchni i miejsce wbudowania w konstrukcję.

Tabela 4.3. Specyfikacja betonu recepturowego trzech składów betonów o $w/c=0,35$ zastosowanego na nawierzchnię Innowacyjnego Multimodalnego Terminala Przeładunkowego k. Terespola

skład	Ilość składników, kg/m ³									
	cement	emulsja	domieszki		piasek płukany	grysy bazaltowe		grysy granitowe		woda
			upłynniająca	przyspieszająca		2 ÷ 8mm	8 ÷ 16mm	2 ÷ 8mm	8 ÷ 16mm	
CC1-E	360	6,66	3,15 ¹⁾ /2,45 ²⁾	-	690	488	782			125
CC2-E			3,15 ¹⁾ /2,45 ²⁾	-	649			464	743	
CC3-E			3,85 ³⁾ /0	2,1 ⁴⁾	665			506	702	
1) plastyfikator na bazie lingosulfonianów										
2) superplastyfikator na bazie eterów polikarboksylenowych										
3) superplastyfikator, który może być wtórnie dozowany na placu budowy										
4) bezchlorkowa domieszka przyspieszająca twardnienie na bazie azotanu wapnia										

Konsystencję sprawdzano każdorazowo na budowie przed ułożeniem mieszanki betonowej. Mieszanka charakteryzowała się jednorodną konsystencją K4, badaną metodą opadu stożka $S \leq 110$ mm (rys 4.8).



Rys. 4.8. Badanie konsystencji mieszanki betonowej na placu budowy. Fot. Autor

Górną powierzchnię świeżo ułożonej i zawibrowanej mieszanki betonowej zacierano mechanicznie, a następnie przeprowadzono zabiegi mające na celu nadanie powierzchni odpowiedniej szorstkości przez szczotkowanie w kierunku poprzecznym – co zapewni szybsze odprowadzanie wody (rys. 4.9). Następnie systematycznie zraszano beton wodą przez ułożoną na nim geowłókninę. Okres pielęgnacji wynosił 21 dni.



Rys. 4.9. Zacieranie i teksturowanie nawierzchni z betonu. Fot. Autor

Odstępy pomiędzy dylatacjami nie przekraczały 5 m. Pierwsze cięcie o szerokości 3 mm na 1/3 grubości płyty wykonano w zależności od temperatury od 12 do 24 godzin od zabetonowania. Poszerzenie szczelin do min 8 mm i głębokość min 8 mm wykonano po 28 dniach dojrzewania betonu. Krawędzie tak wykonanych szczelin sfazowano skośnie (o wymiarach skosów 3×3 mm). Szczeliny wypełniono trwale elastyczną dwuskładnikową masą zalewową na bazie polimeru polisiarczkowego. Do użytkowania nawierzchni przystąpiono po 28 dniach od zabetonowania.

4.2.3. Wyniki badań i ich analiza

Badania laboratoryjne z wykorzystaniem próbek betonów pobieranych w trakcie betonowań przeprowadzone po 28 dniach dojrzewania potwierdziły wysoką wytrzymałość na ściskanie $f_{cm,28}=49,74\div 58,20$ MPa i rozciąganie przy zginaniu $f_{ctm,fl}=5,55\div 5,72$ MPa (w dwupunktowym układzie obciążenia). Stwierdzono wysoką mrozoodporność F200 wg PN-B-06250 i FT2 wg PKN-CEN/TS 12390-9 oraz niską wodoprzepuszczalność (głębokość penetracji <30 mm), a także obniżoną w wyniku zastosowania domieszki bitumicznej nasiąkliwość masową do 3,62%. Średnia głębokość penetracji wody przy ciśnieniu 0,8 MPa dla betonu z grysem granitowym wyniosła 14,33 mm, a maksymalna 26 mm. Natomiast, dla składu z grysem bazaltowym wartości te były nieznacznie niższe i wyniosły odpowiednio 13,1 mm i 25 mm. Zastawienie metod badań i wyników zamieszczono w tabeli 4.4.

Tabela 4.4. Wyniki badań kompozytów cementowych modyfikowanych emulsją bitumiczną w warunkach przemysłowych

Lp.	Badane właściwości	Wyniki	Metoda badania
1	Klasa wytrzymałości na ściskanie wg PN-EN 206-1 [128], nie niższa niż:	C35/45	PN-EN 12390-3
2	Wytrzymałość na rozciąganie przy zginaniu [MPa]	5,55÷5,72	PN-EN 12390-5
3	Kategoria mrozoodporności wg PN-EN 13877-2 [115]	FT2	PKN-CEN/TS 12390-9
4	Nasiąkliwość wagowa [%]	3,62	PN-B-06250
5	Odporność na wnikanie wody [mm]	26 mm	PN-EN 12390-8
6	Mrozoodporność przy badaniu metodą bezpośrednią	F 200	PN-B-06250

Ponadto pomiar ścieralności wykonany na tarczy Böhmego wykazał wyższą o ponad 5% odporność na ścieranie kompozytu cementowego modyfikowanego emulsją bitumiczną w porównaniu do betonu z domieszką napowietrzającą. Dodatkowe badania wytrzymałości na rozciąganie przy zginaniu po 90 dniach dały szczególnie zadawalający średni wynik 7,21 MPa.

Przeprowadzone badania betonu potwierdziły, iż uzyskano kompozyt cementowy klasy minimum C35/45 spełniający wymagania stawiane betonom stosowanym w najsurowszych klasach ekspozycji XF4, XD3, XC4, XA3, XM3 zawarte w normie PN-EN 206 oraz wymagania funkcjonalne dla betonu nawierzchniowego (GDDKiM).

Wykonana w opisany powyżej sposób nawierzchnia betonowa z betonu modyfikowanego emulsją bitumiczną o powierzchni 11076 m² jest wykorzystywana jako plac manewrowo-składowy i przenosi zakładane obciążenia od żurawi kontenerowych oraz układanych w stosy kontenerów o masie do 120 t (rys 4.10).



Rys. 4.3. Składowanie kontenerów w stosy. Fot. Autor

5. Podsumowanie i wnioski

Teza niniejszej pracy zakłada wykazanie, że w wyniku modyfikacji betonu cementowego domieszkami i dodatkami bitumicznymi oraz skutecznego sposobu zagęszczenia mieszanki betonowej istnieje możliwość zapewnienia trwałości konstrukcji z betonu w klasie ekspozycji XF i XD przez minimum 50 lat.

Opisane w literaturze wyniki badań wykazały, że wyraźną poprawę odporności na cykliczne zamrażanie i rozmrażanie betonu (klasa ekspozycji XF) oraz agresję chlorków nie pochodzących z wody morskiej (klasa ekspozycji XD) można uzyskać w wyniku modyfikacji struktury betonu poprzez wprowadzenie do mieszanki betonowej dodatku asfaltu. Wprowadzenie do mieszanki betonowej pasty asfaltowej powoduje blokadę połączeń między kapilarami w betonie oraz pokrycie ich powierzchni hydrofobowym materiałem organicznym, co znacznie utrudnia wnikanie w strukturę porów agresywnych jonów Cl^- oraz innych substancji destrukcyjnych w stosunku do stwardniałego zaczynu cementowego. Ponadto, stwierdzono, że wibroprasowanie betonów cementowych z pastą asfaltową umożliwia otrzymanie tworzywa o korzystnej strukturze porowatości i podwyższonej odporności na działanie czynników atmosferycznych. Jednakże zastosowanie dodatku bitumicznego w ilości powyżej 5% w stosunku do masy cementu prowadziło do znacznego obniżenia właściwości mechanicznych, a w szczególności wytrzymałości na ściskanie powyżej dopuszczalnego normowo progu 25%. Wyżej przytoczone próby i badania tworzyw cementowych modyfikowanych bitumem omówione w części literaturowej dotyczyły betonów o zawartości cementu 450 kg/m^3 z dodatkiem pasty asfaltowej od 5 do 13%. Kruszywo drobne stanowił piasek normowy, a kruszywo grube grysy bazaltowe do 8 mm. Pomimo niskich wartości współczynnika $w/c = 0.22 \div 0.40$, składy te nie zawierały domieszek upłynniających, stąd w rezultacie otrzymywano trudnourabialne mieszanki o konsystencji od K1 do K3. Dlatego, w celu skutecznego ich zagęszczenia, stosowano wibrowanie z prasowaniem i wibrowanie z wibroprasowaniem. Ponadto, należy podkreślić, że mieszanek o takich konsystencjach (wilgotnej, gęstoplastycznej i plastycznej) nie daje się pompować ani transportować betoniarkami samochodowymi, co zasadniczo ogranicza możliwości ich zastosowania jedynie do zakładów prefabrykacji np. przy produkcji drobnowymiarowych elementów drogowych, takich jak kostka brukowa lub krawężniki.

Celem utylitarnym rozprawy było uzyskanie betonów przeznaczonych do układania na placu budowy np. przy realizacji nawierzchni betonowych, zbiorników szczelnych bądź innych elementów narażonych na agresywne oddziaływanie środowiska, szczególnie w klasach ekspozycji XF i XD. Podstawowe różnice między przyjętymi w pracy recepturami betonów a omawianymi w części literaturowej i badaniach podstawowych polegały na:

- zastąpieniu dotychczas stosowanego dodatku asfaltu w postaci pasty, domieszką emulsji bitumicznej,
- zmniejszeniu ilości dodawanego bitumu z $5 \div 13\%$ do $2 \div 4\%$ w stosunku do masy cementu,
- zmniejszeniu zawartości cementu z $450 \div 500$ do 360 kg/m^3 ,
- zwiększeniu maksymalnego wymiaru kruszywa grubego z 8 do 16 mm i obniżenie punktu piaskowego z 42 do 34%,
- dodatkowym zastosowaniu domieszki upłynniającej w postaci superplastyfikatora nowej generacji tzw. PCE (polieteru karboksylenowe).

Przeprowadzone badania podstawowe potwierdziły większą skuteczność emulsji bitumicznej w stosunku do pasty asfaltowej, zarówno w przypadkach nasiąkliwości jak i parametrów wytrzymałościowych. Pasta to roztwór asfaltu w wysokowrzącym rozpuszczalniku organicznym (wg patentu RP nr 136449), natomiast emulsja nie zawiera rozpuszczalnika organicznego, dzięki czemu jest czysta ekologicznie. Ponadto, emulsję bitumiczną można łatwiej dozować, tj. bezpośrednio do mieszanki lub po wcześniejszym wymieszaniu z częścią wody zarobowej. Natomiast, równomierne

rozmieszczenie pasty asfaltowej w objętości zarobu uzyskiwano poprzez wykorzystanie cementu jako nośnika, co wymagało wcześniejszego wymieszania jej z cementem. Badania podstawowe wykazały też, że zmniejszenie zawartości bitumu z $5\div 13\%$ do $2\div 4\%$ w stosunku do masy cementu ograniczyło spadek parametrów wytrzymałościowych uzyskanego tworzywa z przedziału 21-41% do 13-18%, co jest akceptowalne zgodnie z normą PN-EN 934-2. Przy ustalaniu ilości cementu przyjęto minimalną ilość, jaką zaleca norma PN-EN 206 dla najsurowszych klas ekspozycji, w tym XA 3, tj. 360 kg/m^3 . Zmniejszenie zawartości cementu to jednocześnie ograniczenie skurczu powodującego spękanie i mikrorysy szczególnie niebezpieczne w przypadku zagrożenia chlorkami (XD). Trafność tej decyzji potwierdziły badania autora opisane w rozdziale 6, jak i późniejsza publikacja innych autorów (Flaga i in. 2015). Obniżona zawartość cementu została zrekompensowana podwyższeniem maksymalnego wymiaru kruszywa grubego z 8 do 16mm i obniżeniem punktu piaskowego z 42 do 34%. Ponadto, grubsze frakcje kruszywa mają korzystny wpływ na wytrzymałość na rozciąganie przy zginaniu, która jest szczególnie istotne w przypadku betonów nawierzchniowych. Natomiast, zastosowanie domieszki upłynniającej w postaci superplastyfikatora nowej generacji na bazie eterów polikarboksylenowych tzw. PCE umożliwiło produkcję mieszanki przy niskiej wartości współczynnika wodno-cementowego ($0,30\div 0,37$), którą dało się skutecznie zagęścić listwą wibracyjną lub wibratorami pograżalnymi. Obniżenie wartości współczynnika w/c pozwoliło zredukować objętość, oraz ciągłość struktury porów kapilarnych. Pozostałe pory kapilarne są blokowane dzięki hydrofobowym właściwościom emulsji bitumicznej, co radykalnie obniża nasiąkliwość i zapewnia wodoszczelność betonu. Dzięki temu, uzyskano materiał o wysokich parametrach wytrzymałościach i odpowiednio ukształtowanej mikrostrukturze. Przeprowadzone badania kompleksowe pozwalają prognozować co najmniej 50 letnią trwałość tego materiału w klasach ekspozycji XF i XD.

Pierwszym celem pracy było opracowanie rozwiązań zapewniających trwałość betonów cementowych w wyniku oddziaływań środowiskowych w klasie ekspozycji XF4 i XD3 przez minimum 50 lat. Do realizacji tego celu zaplanowano doświadczenie w oparciu o przyjęty plan eksperymentu dla trzech zmiennych wejściowych na pięciu poziomach zmienności. Czynniki zmiennymi w badaniach były: x_1 – zawartość emulsji bitumicznej ($0\div 4\%$), x_2 – zawartość upłynniacza PCE ($0\div 1,1\%$), x_3 – współczynnik wodno-cementowy ($0,3\div 0,44$). Analiza statystyczna wyników badań umożliwiła opracowanie opisów matematycznych poszczególnych właściwości mieszanki i betonu w postaci wielomianów drugiego stopnia ze współdziałaniami drugiego rzędu w zależności od wybranych czynników. Badanymi cechami (wielkościami wyjściowymi) w eksperymencie były konsystencja Vebe, zawartość powietrza A_c i gęstość mieszanki betonowej D oraz wytrzymałość na ściskanie $f_{cm,28}$, $f_{cm,120}$, $f_{cm,F200}$, gęstość pozorna D_c , nasiąkliwość masowa n_w oraz mrozoodporność kompozytu cementowego $\Delta f_{cm,F200}$. Optymalizowaną cechą (wielkością wyjściową) była mrozoodporność mierzona spadkiem wytrzymałości po 200 cyklach naprzemiennego zamrażania i rozmrażania $\Delta f_{cm,F200}$. Założono przy tym, zgodnie z normą PN-88/B-06250, iż spełnienie wymogu mrozoodporności F 200 odpowiada przewidywanej użytkowości konstrukcji przez okres 100 lat, albo co najmniej 50 lat dla elementów znajdujących się w strefie zmieniającego się poziomu wody lub narażonych na działanie środków rozmrażających, tj. w klasach ekspozycji XF4 i XD3. Optymalizacja zależności opisującej mrozoodporność pozwoliła określić wartości poszczególnych czynników (zmiennych niezależnych), dla których kompozyt będzie się charakteryzował najwyższą odpornością na cykliczne zamrażanie i rozmrażanie. W celu wyznaczenia współrzędnych punktu osobliwego obszaru spadku wytrzymałości po 200 cyklach zamrażania i rozmrażania opisanego wielomianem, zróżniczkowano go względem trzech zmiennych niezależnych i otrzymano układ trzech równań. Rozwiązaniem tego układu równań są współrzędne punktu osobliwego - fizycznie istniejące wartości $x_{1opt}=3,25\%$; $x_{2opt}=0,88\%$; $x_{3opt}=0,35$ stanowiące zarazem parametry dotyczące składu betonu zapewniające największą odporność na cykliczne zamrażanie i rozmrażanie. W tym wypadku, spadek wytrzymałości na ściskanie $\Delta f_{cm,F200} [\%]$ wyniósł zaledwie 4,43%.

Drugim celem pracy było określenie mechanizmu kształtowania kapilarno-porowatej struktury betonów cementowych modyfikowanych emulsją bitumiczną. Opierając się na wynikach przeprowadzonych badań mikrostruktury i składu fazowego stwierdzono, że modyfikacja emulsją bitumiczną betonów cementowych powoduje korzystną zmianę struktury porowatości w stosunku do betonów nie modyfikowanych. Przede wszystkim, wpływa na zwiększenie objętości porów w porównaniu do betonu kontrolnego. Zaobserwowano jednocześnie przesunięcie porowatości w kierunku mniejszych porów kapilarnych. Taki układ struktury porowatości pozwala osiągnąć mniejszą nasiąkliwość i podatność na podciąganie kapilarne oraz większą mrozoodporność materiału. Właściwości te są korzystne ze względu na odporność korozyjną i trwałość w warunkach oddziaływań czynników atmosferycznych. W praktyce, w przypadku stosowania emulsji bitumicznej, nie należy stosować równolegle z nią domieszek napowietrzających do betonu. Wyniki dyfraktometrii rentgenowskiej wskazują, że ilość nieprzereagowanego alitu oraz fazy glinianowej i ettringitu we wszystkich badanych seriach betonów, jest zbliżona. Po 60 dniach hydratacji refleksy fazy CSH są znacznie intensywniejsze w przypadku betonów modyfikowanych emulsją bitumiczną. Hydratacja krzemianu trójtłapniowego oraz reagującego z opóźnieniem krzemianu dwutłapniowego, spowodowała zwiększanie się ilości żeluz, a tym samym, ogólny wzrost szczelności kamienia cementowego. Porównując wyniki dyfraktometrii rentgenowskiej zauważono, że domieszka w postaci emulsji bitumicznej wpływa znacząco na przebieg procesu hydratacji cementu w ciągu 60 dni. Wyniki termicznej analizy różnicowej dowiodły, że w przypadku separatorów pochodzących z badanych betonów zarejestrowano zbliżoną zawartość wody związanej w produktach hydratacji w zakresie temperatur 20÷600°C. Domieszka emulsji bitumicznej spowodowała spadek zawartości wodorotlenku wapnia w badanych próbkach zaczynów cementowych, co świadczyć może o przyspieszeniu procesu hydratacji cementu. Ubytek masy spowodowany rozkładem węglanu wapnia w zakresie temperatur 600÷1000°C wykazywał systematyczny wzrost wraz ze wzrostem zawartości emulsji. Zawartość CaCO₃ w separacie pochodzącym z betonu zawierającego 4% emulsji bitumicznej wzrosła ponad 2-krotnie w porównaniu z separatem z betonu kontrolnego. Obserwacje prowadzone na przełomach próbek za pomocą mikroskopu skaningowego pozwoliły stwierdzić, że obecność emulsji w ilości 2% i 4% w stosunku do masy cementu wpłynęła na modyfikację morfologii powstającej fazy CSH, nadając jej głównie formę włóknistą, która jest bardziej korzystna w aspekcie trwałości konstrukcji z betonu. Wpływ emulsji bitumicznej na mikrostrukturę betonu uznano za korzystny z uwagi na jego właściwości użytkowe. Emulsja bitumiczna działając jak domieszka uszczelniająca zmniejsza nasiąkliwość betonu poprzez hydrofobizację systemu kapilar. Pokrywa ściany porów utrudniając migrację wilgoci i wody do wnętrza porów kapilarnych. Zapobiega to m.in. podciąganiu kapilarnemu soli rozpuszczalnych przez powierzchnię betonu, co może prowadzić do powstania wykwitów.

Trzecim celem pracy było opracowanie i wdrożenie technologii modyfikacji strukturalnej betonów cementowych emulsją bitumiczną. Aplikacja technologii ochrony strukturalno-materiałowej betonów cementowych poprzez modyfikację ich składu emulsją bitumiczną miała miejsce podczas wymiany nawierzchni w Innowacyjnym Multimodalnym Terminalu Kontenerowo-Przeładunkowym na terenie Wolnego Obszaru Celnego w Małaszewiczach Małych gm. Terespol w latach 2012 i 2013. Nawierzchnia terminala o grubości 40 cm i powierzchni 11 076 m² została wykonana z betonu cementowego modyfikowanego domieszką emulsji bitumicznej bezpośrednio na podbudowie z kruszywa łamanego i podłożu stabilizowanym cementem. Wdrożenie tego pionierskiego rozwiązania pozwoliło na uzyskanie nawierzchni sztywnej, odpornej na silne obciążenia mechaniczne od kontenerowych żurawi jezdnych (ang. Reach Stacker) i stosów z kontenerami oraz agresywne oddziaływania środowiskowe. Podczas tej realizacji, w warunkach przemysłowych, wyprodukowano i wbudowano ponad 4400 m³ kompozytu z domieszką emulsji bitumicznej.

Ponadto implementacja kompozytów cementowych z emulsją bitumiczną, zagęszczanych przy użyciu łąty wibracyjnej, miała miejsce przy realizacji dróg lokalnych na parkingu przy Zakładach Pojazdów Mechanicznych DKD w Małaszewiczach. Przeprowadzona implementacja potwierdziła możliwość stosowania kompozytów cementowych modyfikowanych emulsją bitumiczną w warunkach przemysłowych. W celu usprawnienia procesu wytwarzania konieczna jest automatyzacja dozowania, zarówno zbrojenia rozproszonego w postaci włókien, jak i domieszki emulsji bitumicznej. W przypadku dozowania manualnego wskazane jest wydłużenie procesu mieszania w ostatniej fazie, kiedy wszystkie składniki znajdują się już w mieszalniku, co pozwala na równomierne rozprowadzenie domieszki bitumicznej i włókien w mieszance. Przeprowadzone przez autora obserwacje przebiegu realizacji pozwalają zarekomendować stosowaną technologię formowania i zagęszczanie, z wykorzystaniem pneumatycznej listwy wibracyjnej, jako efektywną przy tego typu realizacjach.

Otrzymane rezultaty badań są spójne z uzyskanymi podczas badań stosowanych i świadczą, że również w warunkach przemysłowych, w wyniku zastosowania domieszki bitumicznej, możliwe jest obniżenie nasiąkliwości poniżej 4% przy jednoczesnym ograniczeniu zawartości cementu do 360 kg/m³. Pozwala to na zastosowanie uzyskanego kompozytu w najsurowszych klasach ekspozycji. Tak korzystny wpływ emulsji na obniżenie nasiąkliwości i podwyższenie szczelności betonów jest wynikiem hydrofobizujących właściwości zastosowanej domieszki. W efekcie zhydrofobizowane zostają powierzchnie porów wewnątrz struktury betonu, co powoduje, że beton staje się trudno zwilżalny. Utrudnia to penetrację wody, a wraz z nią szkodliwych w stosunku do matrycy cementowej substancji takich jak jony chlorkowe Cl⁻, amonowe NH₄⁺, magnezowe Mg²⁺ i siarczanowe SO₄²⁻.

Dokonana implementacja oraz otrzymane wyniki badań potwierdziły przydatność kompozytów modyfikowanych emulsją bitumiczną w budownictwie komunikacyjnym, szczególnie w przypadku nawierzchni silnie obciążonych jak place kontenerowe, gdzie istotną rolę, oprócz odporności na oddziaływanie środowiskowe, odgrywają parametry mechaniczne. Ponadto, mogą mieć one zastosowanie w środowisku silnie agresywnym chemicznie np. w budownictwie rolniczym przy realizacji zbiorników na gnojówkę, płyt do składowania obornika, posadzek w obiektach inwentarskich, jak również w infrastrukturze komunalnej do budowy oczyszczalni ścieków i składowisk odpadów oraz w budownictwie hydrotechnicznym do wznoszenia obiektów narażonych na działanie wód agresywnych.

Wnioski ogólne

1. W świetle powyższego podsumowania wykazano, że w wyniku modyfikacji betonu cementowego domieszkami i dodatkami bitumicznymi oraz skutecznego sposobu zagęszczenia mieszanki betonowej istnieje możliwość zapewnienia trwałości konstrukcji z betonu w klasie ekspozycji XF i XD przez minimum 50 lat, zatem teza rozprawy doktorskiej została udowodniona zaś postawione cele zostały zrealizowane.
2. W konsekwencji przeprowadzonego eksperymentu oraz prac rozwojowych, prowadzonych w warunkach przemysłowych, uzyskano innowacyjny materiał konstrukcyjny o podwyższonej odporności na agresywne oddziaływania środowiskowe w klasach ekspozycji XF4, XD3 i XA3 ze szczególnym przeznaczeniem do budownictwa komunikacyjnego, rolniczego i hydrotechnicznego. Uzyskany kompozyt cementowy odpowiada co najmniej klasie betonu C35/45 i charakteryzuje się wysoką mrozoodpornością F200, małą nasiąkliwością $n_w \leq 3,6\%$, przy jednoczesnym ograniczeniu zawartości cementu do 360 kg/m³. Pozwala to na prognozowanie co najmniej 50 letniej trwałości, definiowanej wg. Eurokodu 2 jako zapewnienie stanu użytkowości konstrukcji w określonych warunkach, bez istotnego obniżenia przydatności lub ponoszenia nadmiernych i nieprzewidzianych kosztów utrzymania.

Wnioski poznawcze

Przeprowadzone badania i ich analiza pozwala na sformułowanie następujących wniosków poznawczych:

1. W wyniku zastosowania anionowej emulsji bitumicznej możliwe jest odstąpienie od stosowania domieszek napowietrzających, które znacznie obniżają wytrzymałość betonu na ściskanie.
2. Zastosowanie emulsji bitumicznej jako zamiennika dotychczas stosowanej pasty asfaltowej umożliwiło produkcję mieszanek betonowych modyfikowanych bitumem w istniejących węzłach betoniarskich. Emulsję wprowadzano bezpośrednio do mieszalnika, bez konieczności wcześniejszego wymieszania z cementem.
3. Szczególnie korzystny wpływ emulsji bitumicznej zaobserwowano w przypadku nasiąkliwości, wodoszczelności, przenikalności chlorków i modułu sprężystości.
4. Badania strukturalne przeprowadzone na modyfikowanych betonach potwierdziły korzystną zmianę struktury porowatości w stosunku do betonów niemodyfikowanych. Emulsja bitumiczna jako domieszka uszczelnia strukturę betonu poprzez hydrofobizację systemu kapilar. Pokrywa ściany porów, przez co utrudnia przenikanie wody do wnętrza porów kapilarnych. Jednocześnie, zapobiega podciąganiu soli rozpuszczalnych w wodzie na powierzchnię betonu, a tym samym zapobiega powstawaniu wykwitów.
5. Zastosowanie domieszki upłynniającej nowej generacji na bazie eterów polikarboksylenowych PCE umożliwiło skuteczne zagęszczanie mieszanek na stole wibracyjnym już przy $w/c = 0,3$ bez konieczności stosowania specjalnych technik wibroprasowania.
6. Wyniki badań stosowanych przeprowadzonych z wykorzystaniem próbek przygotowanych w warunkach laboratoryjnych pozwoliły na stwierdzenie, iż modyfikacja betonu emulsją bitumiczną i domieszką upłynniającą na bazie eterów polikarboksylenowych, umożliwia otrzymanie materiału konstrukcyjnego o wysokiej wytrzymałości $f_{cm,28}$ w przedziale 60-70 MPa, niskiej nasiąkliwości $< 2\%$, odpornego na cykliczne zamrażanie i rozmrażanie, przy jednoczesnym obniżeniu punktu piaskowego z 42 do 34% i zmniejszeniu ilości cementu z 500 do 360 kg/m³.
7. Ustalono optymalne parametry składu betonu, przy których uzyskany kompozyt charakteryzował się największą mrozoodpornością mierzoną spadkiem wytrzymałości po 200 cyklach naprzemiennego zamrażania i rozmrażania: zawartość emulsji 3,25%; zawartość upłynniacza PCE 0,88 %; wskaźnik wodnocementowy $w/c=0,35$.
8. Opracowano i wdrożono technologię wytwarzania mieszanki betonowej w węźle betoniarskim w zakresie dozowania domieszki w postaci emulsji bitumicznej do mieszalnika oraz technologię formowania, zagęszczania i teksturowania nawierzchni sztywnych z betonów cementowych modyfikowanych emulsją bitumiczną.
9. Na podstawie badań kompleksowych zrealizowanych w ramach eksperymentu, ustalono optymalne receptury betonów i technologię ich wykonywania w warunkach przemysłowych, a następnie dokonano wdrożenia przy realizacji nawierzchni betonowych zagęszczanych wibratorami pogrążalnymi i listwą wibracyjną.
10. Wyniki badania próbek betonowych pobieranych w warunkach przemysłowych potwierdzają, iż modyfikacja betonu emulsją bitumiczną, przy odpowiednim zagęszczeniu mieszanki betonowej i właściwej pielęgnacji, przyczynia się do wyraźnego ograniczenia nasiąkliwości i wodoprzepuszczalności, co świadczy iż w warunkach przemysłowych możliwe jest uzyskanie betonów cementowych modyfikowanych emulsją, zapewniających trwałość konstrukcji w środowiskach agresywnych.

Wnioski praktyczne

Oprócz wyżej wymienionych wniosków poznawczych sformułowane zostały wnioski praktyczne, szczególnie istotne w przypadku implementacji w warunkach przemysłowych:

1. Skuteczne zagęszczanie mieszanki betonowej na stole wibracyjnym przy $w/c \leq 0,37$ możliwe jest dzięki zastosowaniu domieszki upłynniającej. Przy $w/c = 0,30 \div 0,37$ nie ma możliwości skutecznego zagęszczenia na stole wibracyjnym, czy za pomocą wibratora pograżalnego bez zastosowania domieszek upłynniających.
2. Zastosowana domieszka upłynniająca PCE pozwala na obniżenie w/c o 30% przy zachowaniu niezmienionej konsystencji.
3. Emulsja bitumiczna poprawia urabialność mieszanek betonowych, co pozwoliło na wyprodukowanie w węźle betoniarskim na skalę przemysłową mieszanki betonowej o konsystencji S3 przy zachowaniu niskiego w/c na poziomie 0,35. W tym celu zastosowano plastyfiktor i upłynniacz. Konsystencja S3 umożliwiła formowanie na budowie elementów betonowych zagęszczanych wibratorami wglębnymi.
4. W celu uzyskania konsystencji K5 umożliwiającej betonowanie przy użyciu pompy do betonu minimalna wartość w/c wynosi 0,37.
5. Przy $w/c=0,37$ bez upłynniacza uzyskano konsystencję K1 mało przydatną w praktyce budowlanej.
6. Przy $w/c=0,30$ z upłynniaczem w maksymalnej ilości uzyskano konsystencję mieszanki K2/K3, której nie daje się transportować betonowozami, a jedynie samochodami samowyładowczymi.
7. Emulsja bitumiczna poprawia szczelność betonu, co ma korzystny wpływ na jego mrozoodporność.
8. Mrozoodporności betonów wyraźnie zwiększa się wraz z obniżaniem $w/c \leq 0,37$ pod warunkiem skutecznego zagęszczenia mieszanki.
9. Największą mrozoodporność uzyskały betony o $w/c=0,30$ z domieszkami emulsji bitumicznej oraz upłynniacza, natomiast betony o $w/c=0,30$ bez domieszki emulsji i upłynniacza uległy destrukcji po 200 cyklach zamrażania i rozmrażania, ze względu na brak możliwości skutecznego zagęszczenia na stole wibracyjnym.
10. Termin wykonywania badań kompozytów cementowych powinien być uzależniony od zastosowanego cementu. W przypadku CEM I (N) badania wytrzymałości, nasiąkliwości i mrozoodporności należy przeprowadzać po czasie równoważnym 56 lub 90 dni.

Wnioski rozwojowe

Mając na względzie dalsze badania nad kompozytami cementowymi z emulsją bitumiczną wydaje się zasadne rozważenie możliwości dozowania emulsji proporcjonalnie do ilości wody zarobowej, a nie do masy cementu. Sugerowany przedział to 5-15 kg emulsji na 100 litrów wody. Kolejnym wnioskiem rozwojowym byłoby prowadzenie badań nad wpływem emulsji na parametry zwilżania, tj. napięcie powierzchniowe i kąt zwilżania. Parametry te pozwoliłyby na ocenę stopnia hydrofobizacji.

Publikacje autora związane z tematyką rozprawy

1. Falkowski K.: *Analiza możliwości redukcji zawartości chlorków w eksploatowanych obiektach mostowych*. Politechnika Białostocka. 1995.
2. Falkowski K.: Ochrona materiałowo-strukturalna betonów cementowych przed mrozem oraz agresją środków odladzających. *Inżynier budownictwa*. Nr 2, 2011, 51-54.
3. Falkowski K.: Technologia ochrony materiałowo strukturalnej betonów cementowych w środowisku agresywnym. *Budownictwo i Inżynieria Środowiska*. Vol 3, nr 1, 2012, 25-31.
4. Falkowski K.: Kompozyty cementowe modyfikowane emulsją bitumiczną. *Materiały Budowlane*. Nr 12, 2014, 45-49.
5. Falkowski K.: Nawierzchnie betonowe silnie obciążone na przykładzie terminala kontenerowego. *Konferencja Dni Betonu*. Wisła 2014, 1085-1094.
6. Falkowski K.: Implementacja kompozytów cementowych modyfikowanych emulsją bitumiczną w warunkach przemysłowych. *Materiały Budowlane*. Nr 4, 2015, 50-53.
7. Falkowski K.: Projektowanie i realizacja placu manewrowego z kompozytów cementowych. *Budownictwo Technologie Architektura*. Nr 2, 2015, 50-53.
8. Falkowski K.: O sposobach zapewnienia trwałości konstrukcji z betonu w środowisku agresywnym. *Technologia i Organizacja Budownictwa*. Białystok: Oficyna Wydawnicza Politechniki Białostockiej, 2016, Tom II, 137-168.
9. Falkowski K.: Nawierzchnie dróg lokalnych z betonu lanego. *Materiały Budowlane*. Nr 10, 2017, 122-124.
10. Bołtryk M., Pawluczuk E., Falkowski K.: A report on the fabrication of concrete pavement with the application of anionic bitumen emulsion. *Construction & Building Materials*. No 154, 2017, 1004-1014.

e-mail: krzysztoffalkowski1@wp.pl

Autor pracy Krzysztof Falkowski uczestniczył w projekcie „Stypendia dla doktorantów województwa podlaskiego”, współfinansowanego w ramach Programu Operacyjnego Kapitał Ludzki, Działanie 8.2 Transfer wiedzy, Poddziałanie 8.2.2 Regionalne Strategie Innowacji, ze środków Europejskiego Funduszu Społecznego, budżetu państwa oraz środków budżetu Województwa Podlaskiego.

Author Krzysztof Falkowski was a beneficiary of the project „Scholarships for PhD students of Podlaskie Voivodeship”. The project is co-financed by European Social Fund, Polish Government and Podlaskie Voivodeship.