

MAREK IWĄSKI

miwanski@tu.kielce.pl
ORCID 0000-0002-0414-682X

Optimalizacja składu spoiwa mieszane- go recyklowanej mieszanki mineralno-asfaltowej wytwarzanej w technologii asfaltu spienionego



**ANNA CHOMICZ-
KOWALSKA**

a.kowalska@tu.kielce.pl
ORCID 0000-0002-2784-8197



GRZEGORZ MAZUREK

gmazurek@tu.kielce.pl
ORCID 0000-0002-9735-1725



PRZEMYSŁAW BUCZYŃSKI

p.buczynski@tu.kielce.pl
ORCID 0000-0003-0798-8093



MATEUSZ M. IWĄSKI

matiwanski@tu.kielce.pl
ORCID 0000-0002-3183-0141



KRZYSZTOF MACIEJEWSKI

kmaciejewski@tu.kielce.pl
ORCID 0000-0002-3002-9547



PIOTR RAMIĄCZEK

piotrr@tu.kielce.pl
ORCID 0000-0002-8143-4788

Politechnika Świętokrzyska

spoiwo stosowany jest przede wszystkim cement [1, 2], wapno hydratyzowane [3, 4, 5] lub różnego rodzaju spoiwa, które w swoim składzie zawierają oba te składniki oraz różnego rodzaju dodatki [6].

W celu otrzymania jak najkorzystniejszych właściwości recyklowanej mieszanki mineralno-asfaltowej wykonywanej w technologii na zimno, prowadzone są badania w zakresie optymalizacji parametrów mieszanki mineralnej, np. z wykorzystaniem pyłów mineralnych powstających w czasie przeróbki skały na kruszywo, czy też w czasie suszenia kruszywa w wytwórniach mieszanek mineralno-asfaltowych [7]. Na szeroką skalę realizowane są badania dotyczące optymalizacji właściwości emulsji asfaltowej i asfaltu spienionego [8, 9] oraz ich poprawy w wyniku modyfikacji lepiszcza przed procesem spieniania, za pomocą różnego rodzaju dodatków, takich jak np. wosk syntetyczny F-T, czy też powierzchniowo aktywne środki PAS [10].

Recyklowane obecnie mieszanki mineralno-asfaltowe, wytwarzane w technologii na zimno, przeznaczane są nie tylko na dolne warstwy konstrukcji remontowanych nawierzchni, ale również można z nich wykonywać dolne warstwy konstrukcyjne nowych nawierzchni. Dlatego też szczególną uwagę zwraca się na odpowiedni dobór rodzaju i ilości spoiwa,

Rozwój gospodarki zrównoważonej oraz coraz częstsze wdrażanie w drogownictwie technologii energooszczędnych i przyjaznych dla środowiska, stwarza coraz to nowe wyzwania w zakresie jak najszerszego wykorzystania materiałów odzyskiwanych w procesie remontów i modernizacji dróg. W związku z tym, coraz powszechniej stosowanym materiałem, ponownie wykorzystywanym do wytwarzania nowych warstw konstrukcyjnych nawierzchni drogowej, jest destruk asfaltowy. Do chwili obecnej był on stosowany przede wszystkim w technologii recyklingu głębokiego na zimno konstrukcji nawierzchni. Istotna zmiana nastąpiła wraz z opracowaniem nowego Katalogu Typowych Konstrukcji Nawierzchni Podatnych i Półsztywnych wprowadzonego do wykonawstwa przez GDDKiA w 2016 roku. W dokumencie tym wprowadzono nowy typ konstrukcji nawierzchni, w którym warstwa podbudowy asfaltowej może być wykonana z recyklowanej mieszanki mineralno-asfaltowej z wykorzystaniem destruktu asfaltowego.

Recyklowane mieszanki mineralne składają się z destruktu asfaltowego (RAP), destruktu mineralnego powstałego z frezowania warstw podbudowy oraz kruszywa doziarniającego, z reguły o granulacji od 0 do 4 mm. Natomiast jako

spoiwa, którego zadaniem jest uzyskanie nie tylko jak najkorzystniejszych charakterystyk mechanicznych, ale również odpowiedniej trwałości warstwy konstrukcyjnej. Nie może zwłaszcza nastąpić jej przesztywnienie, co w konsekwencji prowadzi do powstawania spękań i obniżenia trwałości zmęczeniowej wykonanej warstwy konstrukcyjnej.

W związku z tym, w ramach projektu badawczego TECHMATSTRAEG 1 realizowanego przez Politechnikę Świętokrzyską w konsorcjum z Politechniką Wrocławską, Instytutem Badawczym Dróg i Mostów oraz firmą drogową BUDAR Sp. z o.o. z Kielc wykonano badania dotyczące recyklowanej mieszanki mineralno-asfaltowej z asfaltem spienionym i alternatywnie emulsją asfaltową, ze zwróceniem szczególnej uwagi na możliwość zastosowania komponowania spoiwa wieloskładnikowego. Powinno ono zapewnić na wysokim poziomie szeroki kompleks właściwości mechanicznych oraz trwałość wykonanej warstwy konstrukcyjnej. W celu skomponowania odpowiedniego rodzaju spoiwa wykorzystano następujące składniki: cement CEM I 32.5R, wapno hydratyzowane oraz uboczne cementowe produkty pylaste (UCPP) [11, 12], które mieszano ze sobą w odpowiednich proporcjach. Następnie badano wpływ otrzy-

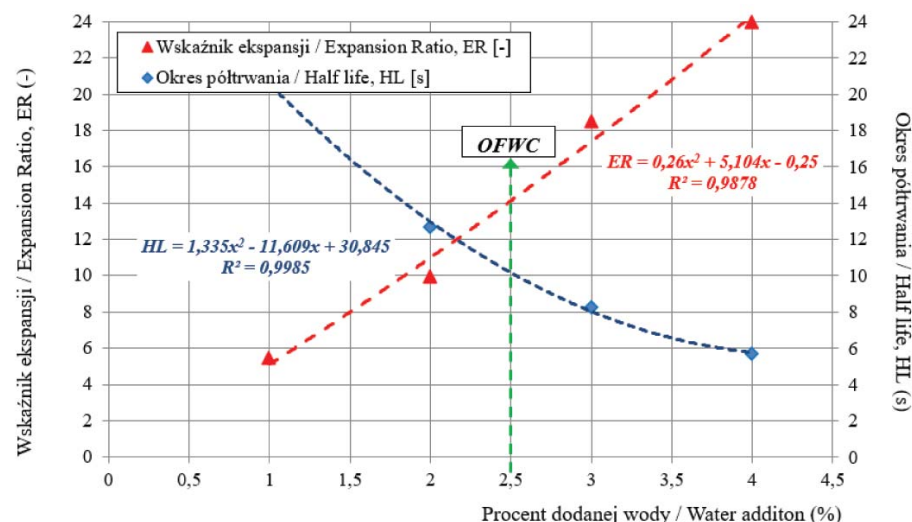
wanego spoiwa mieszanego oraz jego ilości na kompleks właściwości mechanicznych recyklowanej mieszanki mineralno-asfaltowej. W przedstawionym artykule zaprezentowano wyniki badań dotyczące recyklowanej mieszanki mineralno-asfaltowej wykonanej w technologii asfaltu spienionego (MCAS).

Materiały i metody badań

W badaniach zastosowano asfalt drogowy 70/100, który jest wykorzystywany w postaci spienionej do wytwarzania recyklowanych mieszanek mineralno-asfaltowych. Spienianie asfaltu wykonano wykorzystując urządzenie badawcze WLB 10S zgodnie z [3, 5]. Optymalną ilość wody niezbędną do uzyskania piany asfaltowej, charakteryzującej się najkorzystniejszymi parametrami spieniania, określono zgodnie z wymaganiami wytycznych [3, 8]. Rezultaty wykonanych badań podstawowych właściwości asfaltu 70/100 i charakterystyk spienienia zestawiono w tabeli 1, natomiast jego charakterystyki spienienia przedstawiono na rysunku 1.

Tabela 1. Właściwości asfaltu 70/100 [13]

Parametr	Jednostka	Metoda badawcza	Asfalt 70/100
Penetracja w 25°C	0,1 mm	PN-EN 1426	70
Temperatura mięknięcia $T_{R\&B}$	°C	PN-EN 1427	47
Temperatura łamliwości Fraassa	°C	PN-EN 12593	-18
Temperaturowy zakres plastyczności	°C	-	65
Lepkość dynamiczna w: 60°C 90°C 135°C	Pa · s	PN-EN 13320	154 27 0,9
Maksymalna Ekspansja ER	-		12
Czas połowicznego rozpadu HL	s		12
Indeks Spienienia FI	-		122
Zawartość wody spieniającej FWC	%		2,5



Rys. 1. Wyznaczenie optymalnej zawartości wody do spienienia asfaltu 70/100

W badaniach zastosowano spoiwo, które jest komponowane z trzech składników, a mianowicie: cementu (CEM I 32,5R), ubocznych cementowych produktów pylistych (UCPP) i wapna hydratyzowanego (HL).

Tabela 2. Skład fazowy surowców (%) [12]

	Cement CEM I 32,5R		Uboczne cementowe produkty pyliste UCPP		Wapno $Ca(OH)_2$	
C_3S (alit)	65,3	CaO	43,6	Portlandyt	97,4	
C_2S (belit)	10,0	Sylwin	16,7	Kalcyt	2,6	
C_4AF	4,4	C_2S (belit)	34,5			
C_3A	9,3	Kalcyt	5,1			
Arkanit	1,3					
Gips	0,9					
Kalcyt	7,7					
Kwarc	1,0					

Skład fazowy badanych składników spoiwa trójskładnikowego oszacowany metodą Rietvelda zestawiono w tabeli 2.

Tabela 3. Procentowy udział składników spoiwa hydraulicznego MCAS

Typ mieszanki Nr spoiwa/Symbol	Rodzaj składnika		
	CEM (%)	$Ca(OH)_2$ (%)	UCPP (%)
MCAS-Ref	100	-	-
MCAS-1V	20	20	60
MCAS-2V	20	60	20
MCAS-3V	60	20	20
MCAS-4C	20	40	20
MCAS-5C	40	20	40
MCAS-6C	40	40	40
MCAS-7C	33,33	33,33	33,33

Wyniki badań składu mineralnego cementu oraz wapna hydratyzowanego wykazały, że mają one skład fazowy typowy dla tych materiałów. Natomiast w przypadku ubocznych cementowych produktów pylistych obecne są dwie fazy wykazujące właściwości wiążące: CaO i C_2S oraz sylwin (chlorek potasu) i kalcyt. Składniki te mogą pochodzić z nadawy, po procesie prekalcytacji, jak i mogły zostać przeniesione z wnętrza pieca przez strumień powietrza niosący bocznikowane związki chloru.

Kompleksową ocenę wpływu kompozycji spoiwa mieszanego na właściwości recyklowanej mieszanki mineralno-asfaltowej wykonano zgodnie z przyjętym planem eksperymentu sympleksowo-

-centroidowego [14], którego schemat ideowy przedstawiono na rysunku 2.

Ocenę spoiwa wykonano łącznie dla 7 kombinacji recyklowanej mieszanki mineralno-asfaltowej MCAS, które zostały przedstawione w tabeli 3.

Istotnym etapem analizy wyników badań była estymacja współczynników wielomianu o stopniu ustalonym na podstawie analizy wariancji. Aproksymacja parametrów oparta była na metodzie najmniejszych kwadratów (MNK). Model ogólny funkcji obiektu badań był następujący [15] (1):

$$y = b_1 \cdot x_1 + b_2 \cdot x_2 + b_3 \cdot x_3 + b_{12} \cdot x_1 \cdot x_2 + b_{13} \cdot x_1 \cdot x_3 + b_{23} \cdot x_2 \cdot x_3 + b_{123} \cdot x_1 \cdot x_2 \cdot x_3 \pm RMSE \quad (1)$$

gdzie:

- b_{ijk} – parametry eksperymentalne modelu,
- x_i – i -ta zmienna niezależna (x_1 – CEM, x_2 – $\text{Ca}(\text{OH})_2$, x_3 – UCPP),
- y – zmienna zależna,
- $RMSE$ – pierwiastek błędów średniokwadratowych (błąd estymacji).

Oceną jakości wyjaśnienia zmienności danych eksperymentalnych przez model był zmodyfikowany współczynnik determinacji R^2 [15]. Ponadto dla każdej cechy zadeklarowano wartość błędów estymacji $RMSE$.

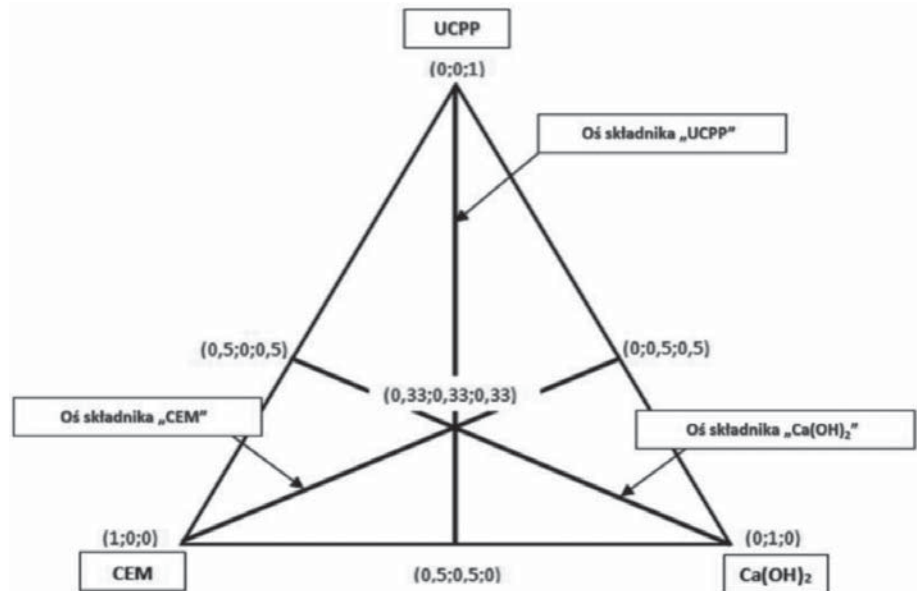
W badaniach zastosowano kruszywo dolomitowe 0/31,5 mm, pozyskiwane w czasie prac modernizacyjnych konstrukcji nawierzchni – rozbiórki podbudowy kamiennej i destruktu asfaltowy o uziarnieniu do 31,5 mm pozyskiwany z frezowania nawierzchni asfaltowej. Stosowano też kruszywo mineralne naturalne wapienne o uziarnieniu 0/2 mm jako materiał odziarniający.

Wyniki analizy sitowej materiału mineralnego oraz destruktu asfaltowego wg PN-EN 933-1 przedstawiono w tabeli 4.

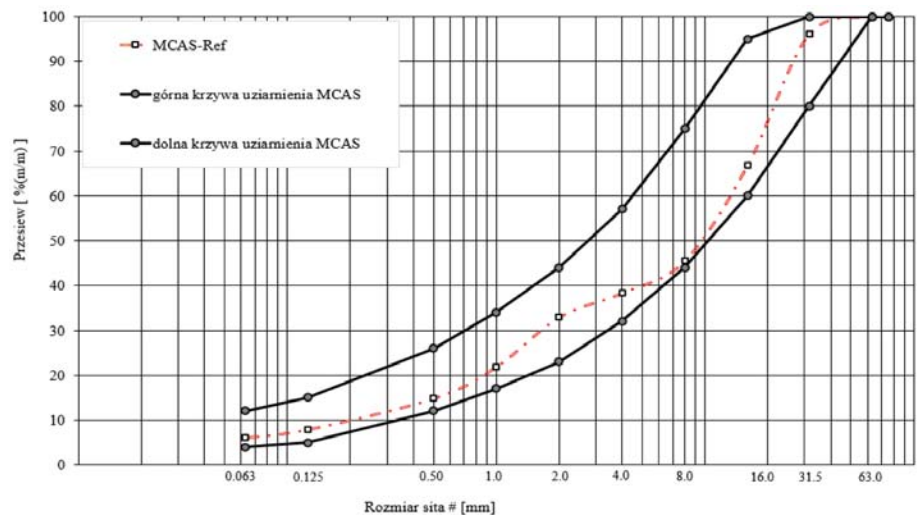
Zawartość asfaltu odzyskanego z destruktu asfaltowego wynosiła 5,35%, natomiast uziarnienie mieszanki mineralnej MCAS przedstawiono na rysunku 3.

Podstawowym celem wykonanych badań było oznaczenie oddziaływania spoiwa mieszanego zastosowanego w technologii recyklingu głębokiego na zimno, z użyciem asfaltu spienionego, na właściwości zaprojektowanej mieszanki MCAS.

Plan eksperymentu zawierał 7 przypadków (tab. 3) spoiw będących zmiennymi zależnymi kontrolującymi zmienność



Rys. 2. Plan eksperymentu sympleksowo-centroidalnego



Rys. 3. Krzywa uziarnienia projektowanej mieszanki mineralno-spoiwowej z asfaltem spienionym MCAS-Ref

Tabela 4. Skład granulometryczny destruktu asfaltowego i materiałów mineralnych [11]

Składnik (mm)	Rozmiar sita (mm)									
	31,5	16,0	8,0	4,0	2,0	1,0	0,5	0,125	0,063	<0,063
RAP 0/31,5	3,9	42,4	33,3	10,7	3,4	2,7	1,8	1,3	0,3	0,3
0/31,5	5,9	30,5	20,3	7,3	7,0	9,3	6,2	6,4	1,5	5,6
0/2,0					6,1	31,4	19,3	19,1	5,6	18,5

cech zależnych i oparty jest na planie mieszaniny (plan sympleksowo-centroidalny).

Zakres badań właściwości recyklowanej na zimno mieszanki MCAS obejmował oznaczenie następujących właściwości:

- zawartość wolnej przestrzeni w mieszance (V_a), wg EN 12697-8,

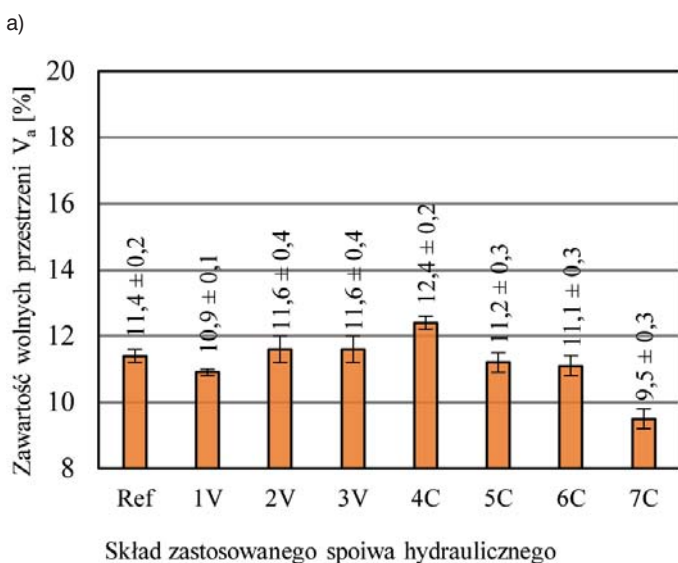
- odporności na działanie czynników atmosferycznych (wskaźnik odporności na działanie wody ITSR), wg EN 12697-12:2008 i załącznikiem nr 1 do WT-2:2014 [16],
- odporności na działanie czynników atmosferycznych wody i mrozu R_{W+M} , wg AASHTO T283,
- odporności na działanie czynników atmosferycznych R_{-2} , wg PANK4302,
- modułu sztywności w pośrednim rozciąganiu S_m metodą IT-CY w zakresie temperatury -10°C , $+4^{\circ}\text{C}$, $+13^{\circ}\text{C}$, $+25^{\circ}\text{C}$ i $+40^{\circ}\text{C}$, zgodnie z PN-EN 12697-26.

Rezultaty badań i dyskusja wyników

W celu analizy wpływu rodzaju zastosowanego spoiwa oraz jego składu na zawartość wolnych przestrzeni recyklowanej mieszanki MCAS opracowano model regresyjny wyznaczając jego parametry eksperymentalne zgodnie z (1), z wykorzystaniem założeń [14, 15]. Analizę siły wpływu danego składnika w składzie spoiwa mieszanego oraz interakcji pomiędzy nimi na zmienność cechy V_a określono za pomocą analizy wariancji (ANOVA) [17] i przedstawiono w tabeli 5.

Tabela 5. Parametry dopasowania funkcji obiektu badań względem zawartości wolnych przestrzeni (V_a) mieszanki MCAS

Zmienna	V_a (%); $R^2=0,919$; $R_{adj}^2=0,885$; Resztowy MS=0,093		
	Parametr eks.	Błąd stand.	pvalue
(A)CEM	11,608	0,175	< 0,001
(B)Ca(OH) ₂	11,609	0,175	< 0,001
(C)UCPP	10,907	0,175	< 0,001
AB	-1,852	0,861	0,049
AC	-0,109	0,861	0,906
BC	4,624	0,861	< 0,001
ABC	-59,823	6,060	< 0,001



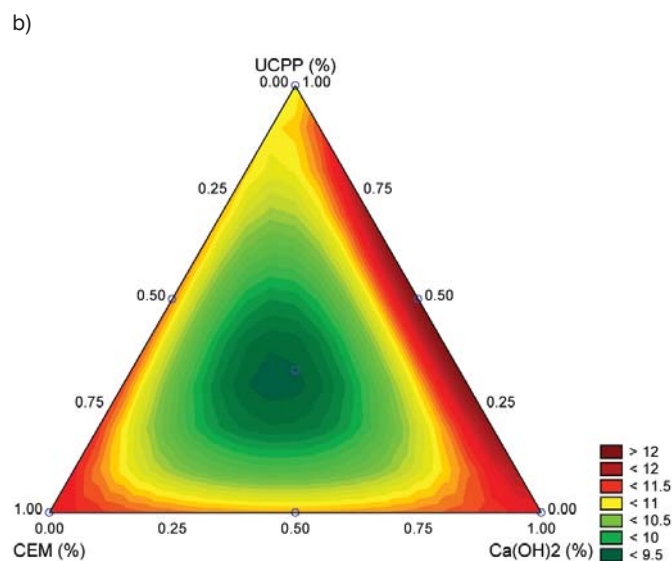
Na podstawie oceny parametrów statystycznych przedstawionych w tabeli 5 można jednoznacznie stwierdzić, że zawartość cementu, wapna hydratyzowanego i pyłów cementowych stanowi istotny czynnik wpływający na zawartość wolnych przestrzeni recyklowanej mieszanki MCAS, ponieważ odnosząca się do niej wartość p-value jest mniejsza niż zakładany poziom istotności $\alpha = 0,05$ ($p_{\text{value}} < 0,05$). Należy również stwierdzić, że występuje synergia pomiędzy wszystkimi składnikami spoiwa mieszanego w aspekcie analizowanego parametru.

Natomiast analizę siły wpływu danego rodzaju spoiwa mieszanego oraz interakcji pomiędzy nim a zmiennością cechy V_a przedstawiono w formie graficznej w postaci wykresu na rysunku 4a, a opracowany model regresyjny w postaci powierzchni odpowiedzi relacji pomiędzy składem spoiwa, a zmienną V_a przedstawiono na rysunku 4b.

Na podstawie analizy uzyskanych wyników badań można stwierdzić, że porównywalną zawartością wolnych przestrzeni V_a , jaką posiada referencyjna recyklowana mieszanka mineralno-asfaltowa, charakteryzującą się mieszanki MCAS zawierające spoiwa 2V, 3V i 5C, charakteryzujące się dużą zawartością cementu lub UCPP oraz alternatywnie wapna hydratyzowanego (rys. 4b). Natomiast zwiększenie zawartości udziału składnika Ca(OH)₂ w spoiwie (4C), przy małej zawartości cementu, powoduje wzrost zawartości wolnych przestrzeni w recyklowanej mieszance [11].

Analiza ilościowa wpływu składu spoiwa na zawartość wolnych przestrzeni recyklowanej mieszanki MCAS pozwala stwierdzić, że zastosowanie w jego składzie cementu w ilości powyżej 25% oraz wapna hydratyzowanego > 50% lub pyłów UCPP > 50% zapewnia osiągnięcie V_a porównywalną z referencyjną zawartością wolnych przestrzeni (100% CEM).

Szczególne znaczenie ma zapewnienie odporności recyklowanej mieszanki MCAS na oddziaływanie wody i mrozu. W związku z tym, w badaniach zastosowano kilka



Rys. 4. Zależność zawartości wolnych przestrzeni V_a mieszanki MCAS od: a) rodzaju spoiwa, b) powierzchni odpowiedzi zmiennej V_a

metod, które w znaczący sposób różnią się od siebie procesem pielęgnacji (oddziaływania wody i ujemnych temperatur) badanego obiektu – mieszanki mineralno-asfaltowej.

Pierwszym kryterium, wg którego oceniano odporność na oddziaływanie wody i mrozu mieszanki MCAS były wymagania stawiane przez WT-2 2014 [16]. Badanie tej charakterystyki wykonano z zastosowaniem 1 cyklu zamrażania. Analizę oddziaływania danego składnika w składzie spoiwa mieszanego oraz interakcji pomiędzy poszczególnymi składnikami na zmienność cechy ITSR, określono za pomocą analizy wariancji (ANOVA) [17] i przedstawiono w tabeli 6.

Na podstawie analizy zestawionych parametrów statystycznych (tab. 6) można stwierdzić, że podobnie jak w przypadku zawartości wolnych przestrzeni, wszystkie składniki spoiwa mieszanego stanowią istotny czynnik wpływający na odporność na oddziaływanie wody i mrozu charakteryzowaną przez wskaźnik ITSR recyklowanej mieszanki MCAS, ponieważ odnosząca się do niej wartość p_{value} jest mniejsza niż zakładany poziom istotności $\alpha = 0,05$ ($p_{\text{value}} < 0,05$). Natomiast nie stwierdzono występowania synergii pomiędzy poszczególnymi składnikami spoiwa i ich wpływu na parametr ITSR.

Analizę siły wpływu danego rodzaju składnika spoiwa mieszanego oraz interakcji pomiędzy składnikami na zmienność cechy ITSR przedstawiono na rysunku 5a, a model regresyjny w postaci powierzchni odpowiedzi zaprezentowano na rysunku 5b.

Na podstawie analizy wskaźnika odporności na działanie wody i mrozu ITSR drobnoziarnistej mieszanki MCAS, można stwierdzić zróżnicowany wpływ rodzaju spoiwa na analizowaną charakterystykę. Największą odpornością charakteryzowała się mieszanka zawierająca spoiwo 7C (33,33% CEM, 33,33% Ca(OH)₂ oraz 33,33% UCPP). Natomiast najniższą mieszanka ze spoiwem 2V (20% CEM, 60% Ca(OH)₂ oraz 20% UCPP). Jest to o tyle istotne, że wapno hydratyzowane powinno wpływać korzystnie na

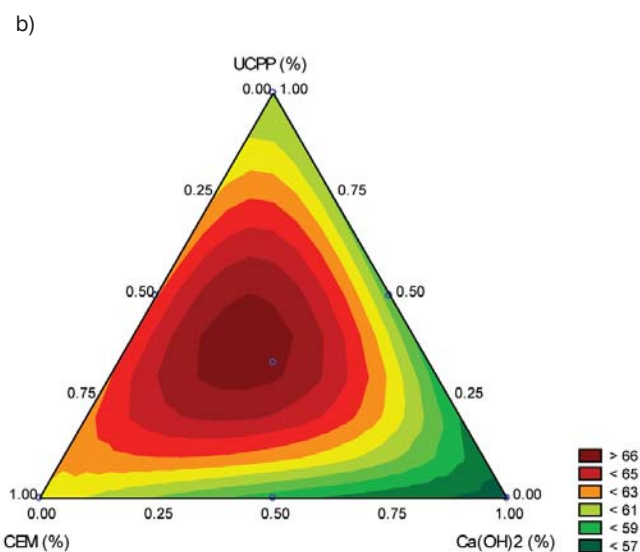
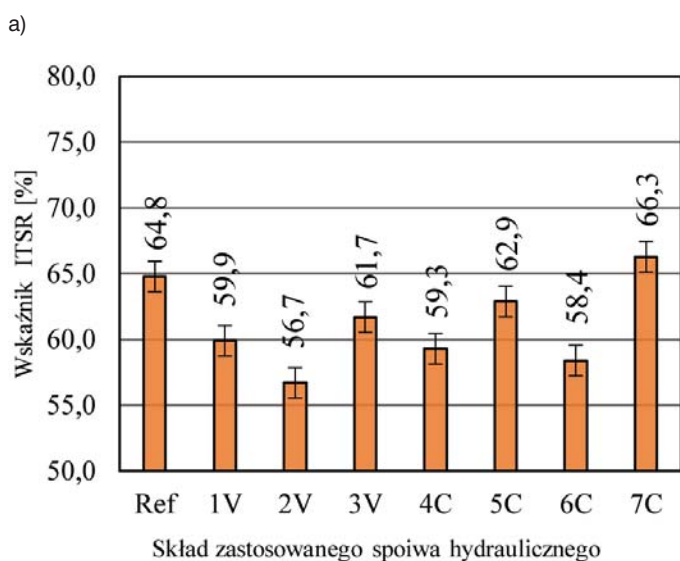
Tabela 6. Parametry dopasowania funkcji obiektu badań względem odporności na działanie czynników atmosferycznych charakteryzowanych przez wskaźnik ITSR mieszanki MCAS

Zmienna	ITSR (%); $R^2=0,439$; $R_{\text{adj}}^2=0,195$; Resztowy MS=17,010		
	Parametr eks.	Błąd stand.	Pvalue
(A)CEM	61,744	2,381	< 0,001
(B)Ca(OH) ₂	56,653	2,381	< 0,001
(C)UCPP	59,925	2,381	< 0,001
AB	-3,343	11,665	0,778
AC	8,248	11,665	0,491
BC	4,038	11,665	0,734
ABC	159,688	82,074	0,072

poprawę adhezji mieszanki mineralnej do lepiszcza [18, 19]. Natomiast zaobserwowano, że zwiększenie jego ilości spowodowało spadek odporności na oddziaływanie wody i mrozu mieszanki MCAS.

Następnie ocenę odporności na działanie wody wykonano w oparciu o wskaźnik RW_{W+M} wyznaczany zgodnie z wymaganiami AASHTO T283. Analizę oddziaływania danego składnika w składzie spoiwa mieszanego i interakcji pomiędzy poszczególnymi składnikami na zmienność cechy RW_{W+M} określono za pomocą analizy wariancji (ANOVA) [17] i przedstawiono w tabeli 7.

Dokonując analizy parametrów statystycznych zestawionych w tabeli 7 można stwierdzić, że tak jak w przypadku poprzednio analizowanych właściwości, zawartość cementu, wapna hydratyzowanego i pyłów cementowych stanowi istotny czynnik wpływający na badaną właściwość charakteryzowaną przez wskaźnik RW_{W+M} recyklowanej mieszanki MCAS, ponieważ odnosząca się do niej wartość p_{value} jest mniejsza niż zakładany poziom istotności



Rys. 5. Wskaźnik odporności na działanie wody i mrozu ITSR mieszanki MCAS: a) rodzaj spoiwa, b) powierzchnia odpowiedzi zmiennej ITSR

$\alpha = 0,05$ ($p_{\text{value}} < 0,05$). Występuje również synergia pomiędzy wszystkimi składnikami spoiwa mieszanego, co pozwala wnioskować, że oddziaływanie ich powinno być rozpatrywane kompleksowo, a nie pojedynczo w aspekcie ocenianego parametru.

Tabela 7. Parametry dopasowania funkcji obiektu badań względem odporności na działanie czynników atmosferycznych wg AASHTO T283 (R_{W+M}) mieszanki MCAS

Zmienna	R_{W+M} (%); $R^2=0,771$; $R_{\text{adj}}^2=0,673$; Resztowy MS=11,529		
	Parametr eks.	Błąd stand.	pvalue
(A)CEM	45,886	1,960	< 0,001
(B)Ca(OH) ₂	39,374	1,960	< 0,001
(C)UCPP	52,803	1,960	< 0,001
AB	12,940	9,603	0,199
AC	-32,119	9,603	0,005
BC	-7,962	9,603	0,421
ABC	299,661	67,568	< 0,001

Analizowano też oddziaływanie wpływu danego składnika w spoiwie mieszanym oraz interakcji pomiędzy składnikami na zmienność cechy R_{W+M} mieszanki MCAS. Wyniki w formie graficznej przedstawiono na rysunku 6a, a opracowany model regresyjny w postaci powierzchni odpowiedzi relacji pomiędzy składem spoiwa a zmienną R_{W+M} przedstawiono na rysunku 6b.

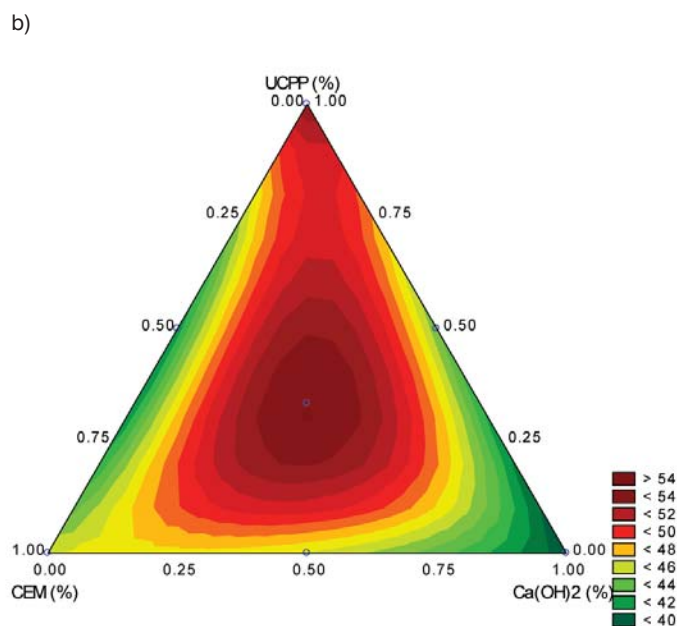
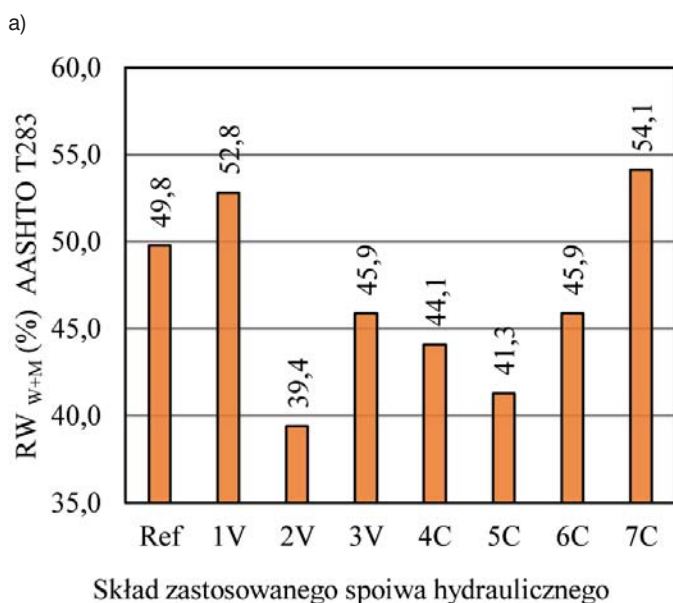
Obserwując rezultaty przedstawione na rysunku 6a należy stwierdzić, że zdecydowanie największy wpływ na wartość współczynnika R_{W+M} wg AASHTO T283 odgrywa cement. Odmienne do cechy V_a , na którą istotny wpływ miał też drugi

ważny składnik UCPP. Istotna okazała się również interakcja pomiędzy wszystkimi składnikami. Może to wskazywać na silną synergię pomiędzy nimi oraz to, że oddziaływania spoiwa nie należy rozpatrywać przez pryzmat pojedynczych składników.

Odporność na działanie wody charakteryzowana przez wskaźnik R_{W+M} mieszanki MCAS wskazuje, że zmniejszenie udziału cementu w składzie spoiwa mieszanego powoduje obniżenie jej odporności na oddziaływanie wody (rys. 6b). Przy czym wskaźnik ten pozostaje na zbliżonym poziomie w przypadku stosowania w recyklowanej mieszance MCAS spoiwa 3V, 4C i 6C. Zastosowanie spoiwa 7C składającego się ze zrównoważonych ilości składników (33% CEM, 33% Ca(OH)₂ i 33% UCPP) zapewnia uzyskanie największej wartości wskaźnika R_{W+M} mieszanki MCAS, którego wartość była większa o 15% niż w rozwiązaniu referencyjnym (CEM=100%).

Reasumując, na podstawie wykonanych badań można stwierdzić, że zapewniona zostanie odporność na oddziaływanie wody i mrozu mieszanki MCAS, gdy rekomendowane spoiwo mieszane będzie zawierać w swoim składzie od 20% do 33% cementu oraz od 33% do 40% wapna hydratyzowanego i od 33% do 40% UCPP.

Kolejnym kryterium oceny odporności na działanie czynników atmosferycznych jest oznaczenie odporności na spękania w niskiej temperaturze mieszanki MCAS, które zostało wykonane zgodnie z wymaganiami fińskiej normy PANK 4302. Istota tego badania polega na ocenie odporności na powstawanie spękań w czasie oddziaływania mrozu na konstrukcyjną warstwę wykonaną z mieszanki mineralno-asfaltowej. Analizę oddziaływania danego składnika w składzie spoiwa mieszanego oraz interakcji pomiędzy nimi na zmienność cechy R_{-2} (PANK 4302) określono za pomocą analizy wariancji (ANOVA) [17] i przedstawiono w tabeli 8.



Rys. 6. Zależność R_{W+M} wskaźnika odporności na działanie wody wg AASHTO T283 mieszanki MCAS w aspekcie: a) rodzaju spoiwa, b) powierzchni odpowiedzi zmiennej R_{W+M}

Analiza zestawionych parametrów statystycznych w tabeli 8 pozwala jednoznacznie stwierdzić, że tak jak w poprzednio analizowanych właściwościach, zawartość składników spoiwa mieszanego stanowi istotny czynnik wpływający na odporność na spękania, charakteryzowany przez wskaźnik R_{-2} recyklowanej mieszanki MCAS, ponieważ odnosząca się do niej wartość p_{value} jest mniejsza niż zakładany poziom istotności $\alpha = 0,05$ ($p_{\text{value}} < 0,05$). Można też zauważyć silną synergię pomiędzy wszystkimi składnikami spoiwa, co może wskazywać, że ich oddziaływania na analizowany parametr nie należy rozpatrywać przez pryzmat pojedynczych składników, ale ich kompleks.

Tabela 8. Parametry dopasowania funkcji obiektu badań względem odporności na działanie czynników atmosferycznych – wskaźnik R_{-2} wg PANK 4302 mieszanki MCAS

Zmienna	R_{-2} (MPa), $R^2 = 0,761$; Popr: $R^2 = 0,657$; Resztowy MS=0,012		
	Parametr eks.	Błąd stand.	Pvalue
(A)CEM	1,093	0,063	< 0,001
(B)Ca(OH) ₂	0,896	0,063	< 0,001
(C)UCPP	0,916	0,063	< 0,001
AB	-0,620	0,310	0,065
AC	-0,153	0,310	0,629
BC	-0,573	0,100	0,086
ABC	12,440	2,189	< 0,001

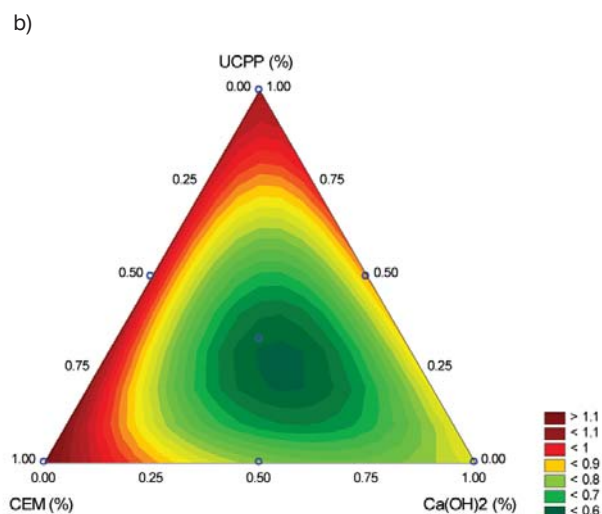
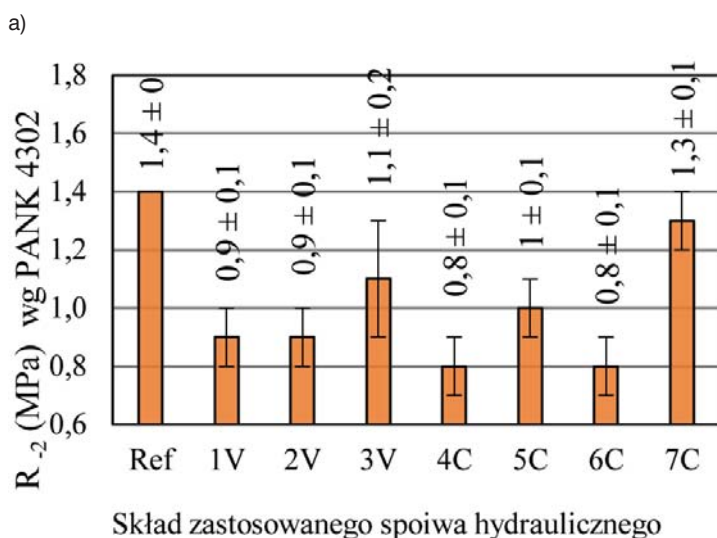
Natomiast wpływ danego składnika w spoiwie mieszanym oraz interakcji pomiędzy tymi składnikami na zmienność cechy R_{-2} wg PANK 4302 przedstawiono na rysunku 7a, a opracowany model regresyjny w postaci powierzchni odpowiedzi na rysunku 7b.

Analiza uzyskanych wyników pozwala jednoznacznie stwierdzić, że najbardziej odpornymi na działanie czynników

atmosferycznych wg PANK 4302 są mieszanki zawierające 100% cementu. Nie zanotowano jednoznacznej zależności pozwalającej określić wpływ rodzaju spoiwa na wartość analizowanego parametru. Należy podkreślić, że w przypadku spoiw wieloskładnikowych, większość otrzymanych wyników była na zbliżonym do siebie poziomie. Wyjątkiem była mieszanka MCAS ze spoiwem 7C, która uzyskała wyniki podobne do mieszanek z cementem. Wynik żadnej z analizowanych mieszanek nie przekroczył granicznej wartości 4,8 MPa, co pozwala stwierdzić, że wszystkie z nich spełniły wymagania odporności na spękania w zakresie niskiej temperatury.

Istotną charakterystyką materiałową jest moduł sztywności S_m oznaczany w schemacie pośredniego rozciągania IT-CY mieszanki MCAS. Pozwala on wnioskować o trwałości materiału w zakresie temperatur eksploatacyjnych warstw konstrukcyjnych. W związku z tym, do oceny wpływu spoiwa na nośność i trwałość recyklowanej podbudowy, niezbędne jest wykonanie jego oznaczenia w schemacie pośredniego rozciągania w temperaturach charakterystycznych, tj. -10°C ; $+5^\circ\text{C}$; $+13^\circ\text{C}$; $+25^\circ\text{C}$; $+40^\circ\text{C}$. Analizę oddziaływania danego składnika w składzie spoiwa mieszanego i interakcji pomiędzy poszczególnymi składnikami na zmienność cechy S_m określono za pomocą analizy wariancji (ANOVA) [17] i przedstawiono w tabeli 9.

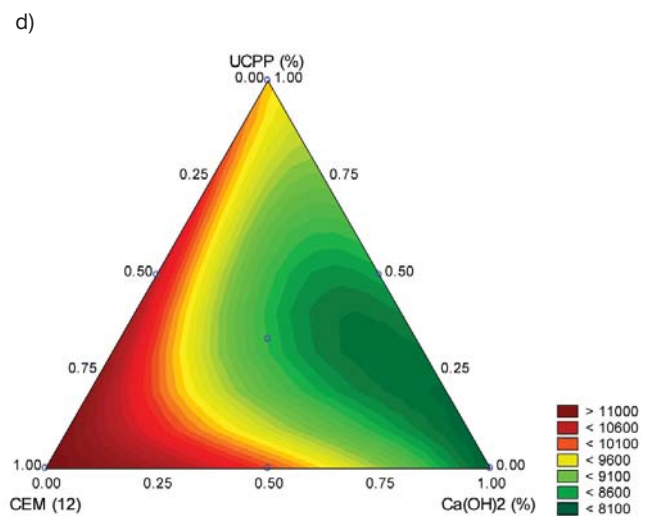
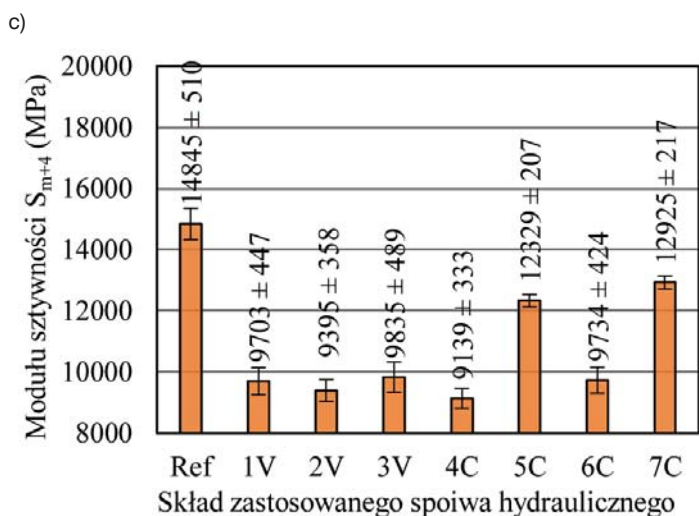
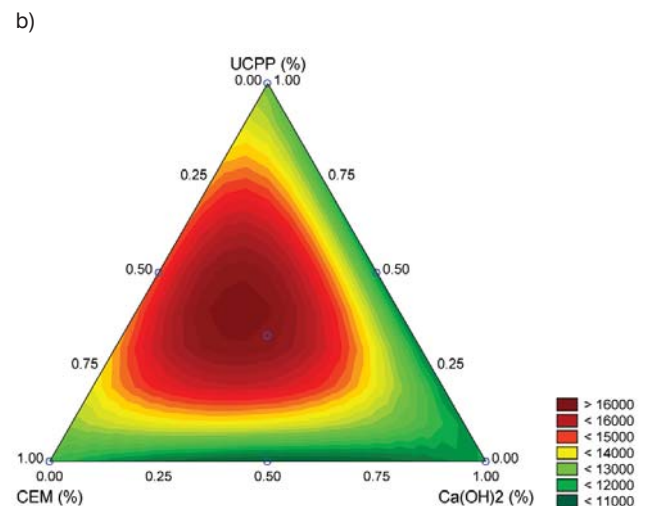
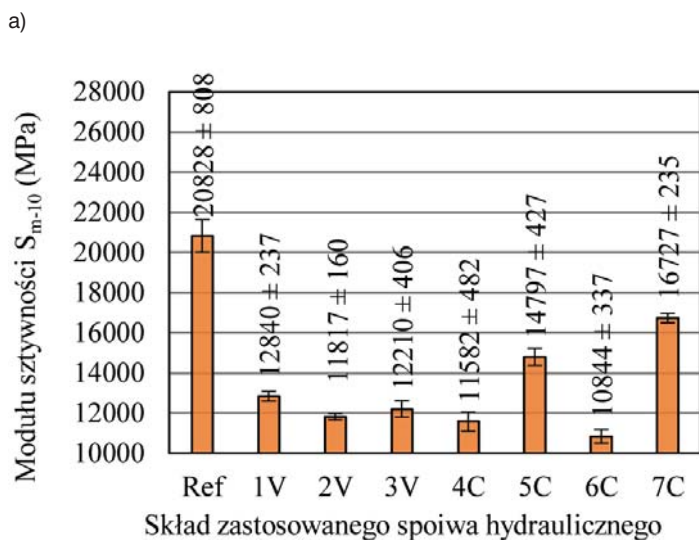
Analiza zestawionych parametrów statystycznych w tabeli 9 pozwala jednoznacznie stwierdzić, że tak jak w poprzednio analizowanych właściwościach, zawartość składników spoiwa mieszanego stanowi istotny czynnik wpływający na moduł sztywności S_m analizowany w zakresie temperatury od -10°C do $+40^\circ\text{C}$ recyklowanej mieszanki MCAS, ponieważ odnosząca się do niej wartość p_{value} jest mniejsza niż zakładany poziom istotności $\alpha = 0,05$ ($p_{\text{value}} < 0,05$). W przypadku oznaczania modułu sztywności S_m w zakresie temperatury od -10°C do $+13^\circ\text{C}$ obserwuje się synergię oddziaływania tych składników na analizowany parametr. Może to wskazywać, że w zakresie tych temperatur wszystkie składniki spoiwa mieszanego



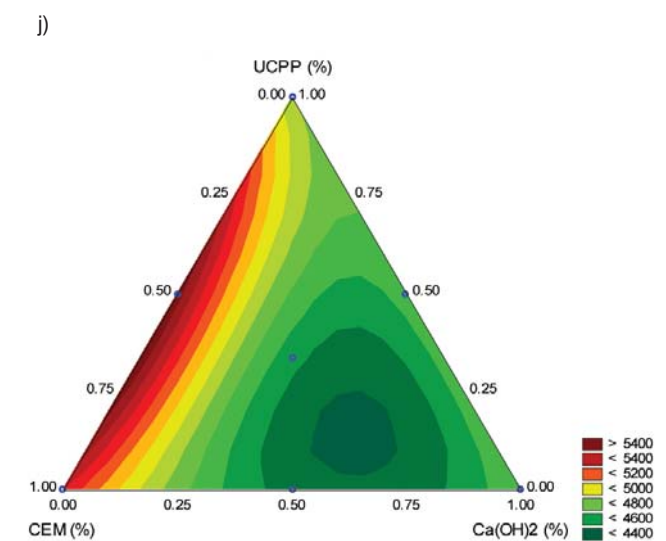
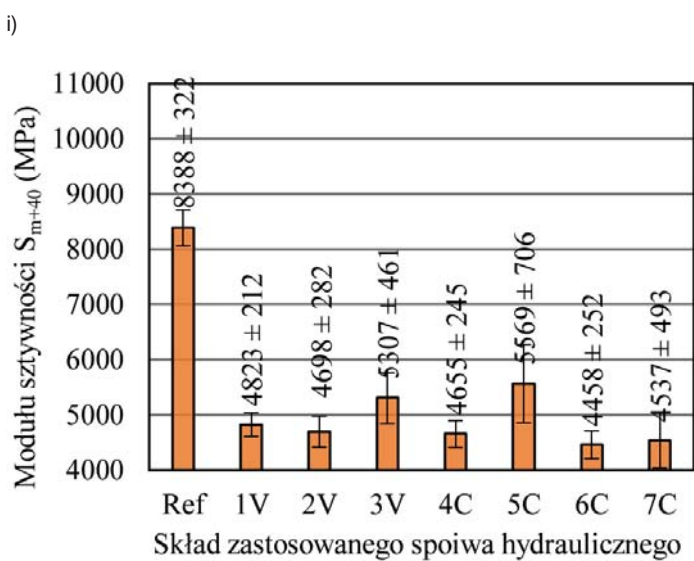
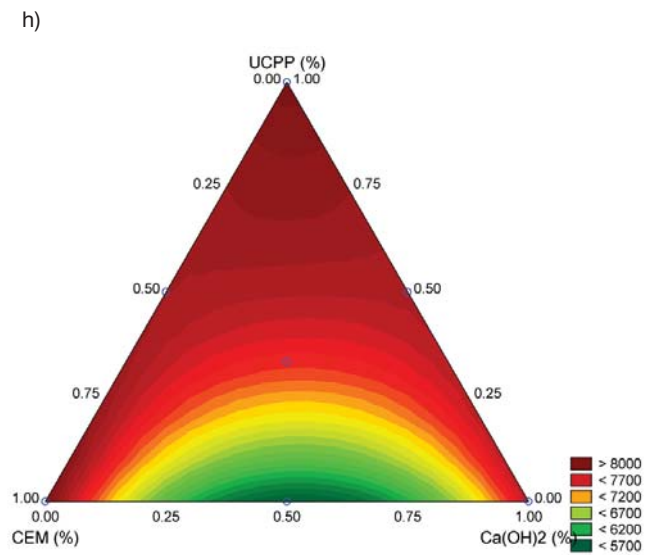
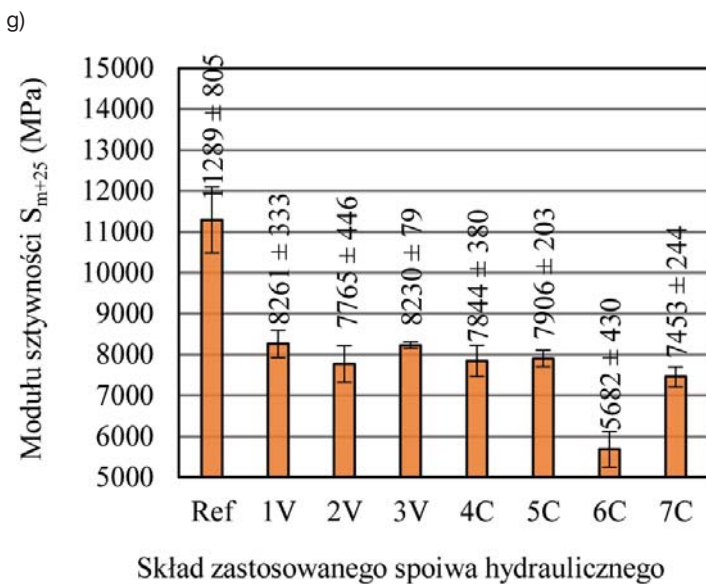
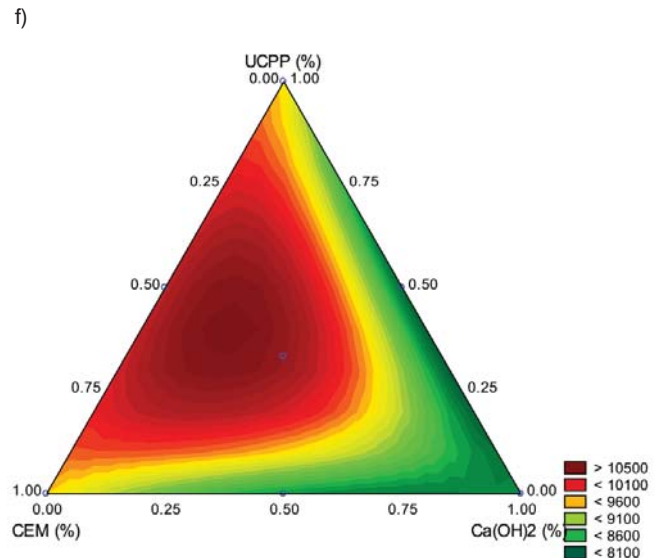
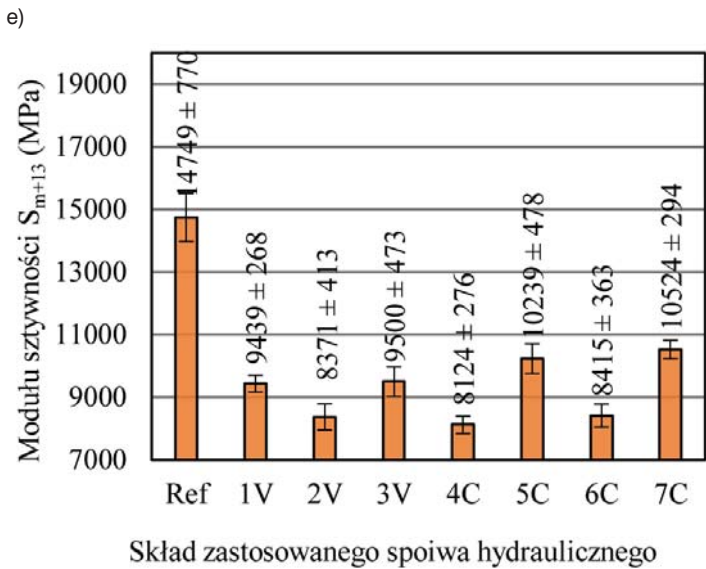
Rys. 7. Zależność wskaźnika odporności na spękania R_{-2} wg PANK 4302 mieszanki MCAS w aspekcie: a) rodzaju spoiwa, b) powierzchni odpowiedzi zmiennej R_{-2}

Tabela 9. Parametry dopasowania funkcji obiektu badań względem modułu sztywności S_m w pośrednim rozciąganiu IT-CY w aspekcie temperatury, dla mieszanki MCAS

Zmienna	Temperatura badania °C									
	-10		+4		+13		+25		+40	
	Par. eks.	pvalue	Par. eks..	pvalue	Par. eks.	pvalue	Par. eks.	pvalue	Par. eks.	pvalue
(A)CEM	12209,8	< 0,001	11168,5	< 0,001	9500,00	< 0,001	8230,25	< 0,001	5306,75	< 0,001
(B)Ca(OH) ₂	11816,5	< 0,001	8070,3	< 0,001	8371,00	< 0,001	7765,00	< 0,001	4698,00	< 0,001
(C)UCPP	12839,8	< 0,001	9767,0	< 0,001	9438,75	< 0,001	826,50	< 0,001	4823,25	< 0,001
AB	-4677,5	< 0,001	196,,5	0,098	-2084,00	0,034	-926,50	< 0,001	-217,50	0,043
AC	9089,0	< 0,001	270,0	0,814	3077,50	0,003	-135,50	0,104	2016,00	0,060
BC	-2983,5	< 0,001	-145,5	0,213	-3123,50	0,002	-67,00	0,406	-421,50	0,682
ABC	115544,3	< 0,001	-29229,0	< 0,001	4475,25	< 0,001	1681,50	0,007	-9204,75	0,211
R ²	0,977		0,876		0,880		0,894		0,535	
R _{adj} ²	0,969		0,840		0,846		0,864		0,400	
Reszt. MS	118591,7		214278,4		141217,9		10667,1		171825,2	



Rys. 8. Powierzchnia odpowiedzi dla modułu sztywności odpowiednia w temperaturze -10°C, +4°C +13°C, +25°C i +40°C recyklowanej mieszanki w aspekcie rodzaju spoiwa – a), c) oraz mieszanki MCAS – b), d)



Rys. 8. Powierzchnia odpowiedzi dla modułu sztywności odpowiednia w temperaturze -10°C , $+4^{\circ}\text{C}$, $+13^{\circ}\text{C}$, $+25^{\circ}\text{C}$ i $+40^{\circ}\text{C}$ recyklowanej mieszanki w aspekcie rodzaju spoiwa – e), g), i) oraz mieszanki MCAS – f), h), j)

wpływają razem na moduł sztywności S_m , a nie tylko pojedynczo.

Oddziaływanie wpływu danego składnika w spoiwie mieszanym oraz interakcji pomiędzy składnikami na zmienność cechy S_m przedstawiono na rysunkach 8a, 8c, 8e, 8g, 8i, a opracowany model regresyjny w postaci powierzchni odpowiedzi na rysunkach 8b, 8d, 8f, 8h, 8j.

Wykonane badania wykazały, że w przypadku mieszanki MCAS najwyższymi wartościami modułu sztywności charakteryzowała się mieszanka referencyjna zawierająca 100% cementu. Wszystkie mieszanki MCAS charakteryzują się mniejszą sztywnością w zakresie zastosowanych temperatur badań. Jedynie w przypadku temperatury -10°C i $+4^{\circ}\text{C}$ mieszanka 7C charakteryzuje się zbliżonym modułem sztywności do referencyjnej mieszanki MCAS. Praktycznie w każdym zakresie temperaturowym, najniższymi sztywnościami charakteryzowała się mieszanka ze spoiwem 6C (40% CEM, 40% $\text{Ca}(\text{OH})_2$ oraz 20% UCPP).

Optimalizacja składu innowacyjnego spoiwa mieszanego

Na podstawie dokonanych analiz można stwierdzić, że każdy ze składników w spoiwie mieszanym w odmienny sposób oddziaływał na wybrane cechy mechaniczne recyklowanej mieszanki MCAS. Dla przykładu, kompozycja spoiwa mieszanego rekomendowana do uzyskania najkorzystniejszego poziomu wolnych przestrzeni oraz odporności na oddziaływanie wody i mrozu, nie uzyskiwała pożądanej sztywności. Aby uzyskać rozwiązanie kompromisowe należało rozwiązać problem optymalizacyjny. W związku z tym, zastosowano wielokryterialną optymalizację statystyczną wykorzystując funkcję uogólnionej użyteczności Harringtona [20, 21]. Funkcja ta pozwala na odnalezienie najlepszego rozwiązania spełniającego założone kryteria będące wymaganiem normowym lub też opinią ekspercką.

W artykule uwzględniono dwa rodzaje funkcji profilowych. Pierwsza, dwustronna, stosowana była dla zmiennych, dla których wartości akceptowalne znajdowały się w pewnym przedziale. Natomiast druga, jednostronna, dotyczyła zmiennej, dla której została zdefiniowana krytyczna wartość progowa. Szczegółowe informacje na temat ich matematycznego zapisu można odnaleźć w pracy [20, 21]. Użyteczność uogólnioną U^{III} przyjmuje się jako ważoną średnią geometryczną poszczególnych użyteczności cząstkowych d_u (2):

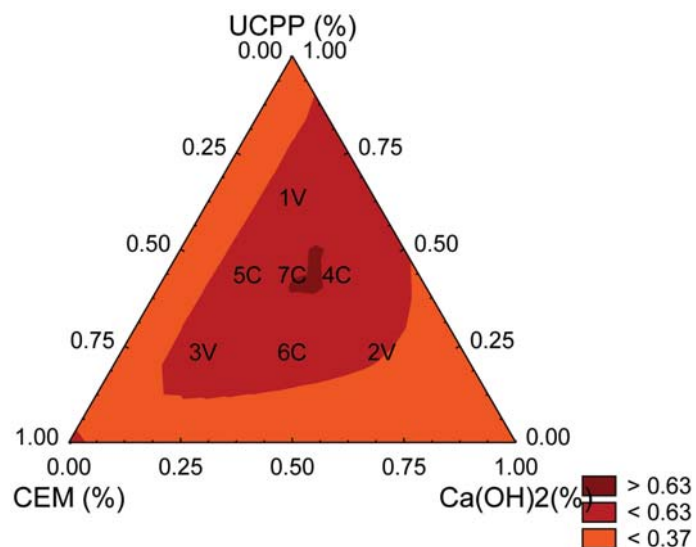
$$U^{III} = \left[\prod_{u=1}^n d_u \right]^{\frac{1}{n}} \quad (2)$$

gdzie:

n – liczba zmiennych.

Jednym z założeń optymalizacji była potrzeba zapewnienia redukcji sztywności recyklowanej mieszanki MCAS, niekorzystnie wpływającej na jej trwałość w okresie eksploatacji, przy jednoczesnym zapewnieniu jej odporności na spękanie niskotemperaturowe oraz zachowaniu mak-

symalnej wodoodporności. Uwzględniając wzór (2), po wcześniejszym obliczeniu użyteczności cząstkowych d_u , uzyskano powierzchnie odpowiedzi uogólnionej funkcji użyteczności, którą przedstawiono na rysunku 9.



Rys. 9. Powierzchnia odpowiedzi funkcji użyteczności recyklowanej mieszanki mineralno-asfaltowej względem innowacyjnego spoiwa mieszanego

Należy zwrócić uwagę (rys. 9), że mieszanina 7C oraz mieszanina referencyjna 100% cementu, względem przyjętych kryteriów, uzyskała wartość $U^{III} > 0,63$. Jest to wynik, który sugeruje otrzymanie bardzo dobrego rozwiązania spełniającego wszystkie kryteria i niebędącego blisko wartości granicznych danego kryterium. Pozostałe rozwiązania sugerują uzyskanie co najmniej satysfakcjonującej jakości materiału. W związku z tym, ograniczając ilość cementu w składzie spoiwa do 66%, można uzyskać ekwiwalentną jakość mieszanki recyklowanej ze spoiwem mieszanym o podobnych cechach fizyczno-mechanicznych do referencyjnej mieszanki recyklowanej. W zbiorze rozwiązań procesu optymalizacji znajdowały się również przypadki, które noszą znamiona wątpliwych i nieakceptowalnych kombinacji składników innowacyjnego spoiwa. Kompozycja 1V znajdowała się w obszarze wątpliwym i bliskim rozwiązaniom nieakceptowalnym. Obszar ten obejmował rozwiązania, w których ilość pyłów UCPP była większa od 60%.

Natomiast rozwiązania 3V, 5C, 7C, 6C należą do satysfakcjonującego obszaru optymalizacji i pozwalają na aplikację pyłów UCPP $> 60\%$. Należy również dodać, że obszar, w którym znajdują się wyżej wymienione kombinacje innowacyjnego spoiwa odpowiada wartościom akceptowalnym. Wspomniany zatem powyżej zbiór rozwiązań należy uznać jako rekomendowany. W związku z tym, najbardziej korzystnym rozwiązaniem, w którym spoiwo spełni swoją rolę w mieszance MCAS jest mieszanina składników opisana przez wartości graniczne takie jak: CEM $> 30\%$, $\text{CaOH}_2 < 40\%$ oraz UCPP $< 40\%$. Należy unikać aplikacji $\text{CaOH}_2 > 60\%$ oraz UCPP $> 60\%$, gdyż takie rozwiązania mogą doprowadzić do przedwczesnej utraty

trwałości warstwy konstrukcyjnej wykonanej z mieszanki MCAS.

Analiza wyników badań potwierdza słuszność założeń celu badań, jakim był projekt trójskładnikowego spoiwa, pozwalającego na zwiększenie trwałości konstrukcji nawierzchni, przy wykorzystaniu mieszanek recyklowanych z asfaltem spienionym. Ponadto, pomimo sugestii że dominujący wpływ na zmienność wyników każdej z cech miał cement, w kontekście jakości materiału, spełniającego zadane kryteria, jego oddziaływanie było drugorzędne. Ujawniła się również silna interakcja $\text{Ca}(\text{OH})_2$ i UCPP, która była związana ze zmianą objętości mieszanki recyklowanej. Zaobserwowano również silną i istotną interakcję CEM i UCPP, która przyjęła wartość ujemną. Było to związane z celem optymalizacji, który zakładał redukcję sztywności recyklowanej mieszanki w wysokich temperaturach użytkowych. Należy również stwierdzić, że zastosowanie wyłącznie wapna hydratyzowanego lub UCPP nie spowoduje znaczącego wzrostu jakości warstwy konstrukcyjnej.

W celu wybrania najlepszego rozwiązania jakościowego opracowywanego spoiwa mieszanego należało również rozważyć inne aspekty towarzyszące. W tym przypadku ważną kwestią była utylizacja maksymalnej ilości pyłów UCPP.

W rezultacie wyodrębniono 3 grupy kompozycji spoiwa mieszanego. Profil każdej z nich powstał poprzez oszacowanie średniej dla każdej z cech znajdującej się w danym skupieniu. Skupienie zostało tak określone, aby zakwalifikowane przypadki były do siebie maksymalnie zbliżone, ale jednocześnie maksymalnie różne względem innych skupień. Pierwsza grupa reprezentowana była przez rozwiązania kompozycji spoiwa, w których uzyskano najwyższą sztywność. Do tej grupy należały próbki referencyjne (100% cementu). Pomiędzy próbkami grupy 2 i 3 największą siłą dyskryminacyjną wprowadziła cecha sztywności. Próbki zakwalifikowane do grupy 3 miały niższą sztywność, ale nieco większą wartość parametru $\text{TSR} = 79,4\%$, podczas

gdzie w grupie 2 TSR wyniósł do 75,9%. Do grupy 2 należały rozwiązania, które zawierały w składzie cement w ilości 40% ÷ 60%, a ilość UCPP wynosiła zaledwie 20%, co z punktu widzenia efektywności utylizacji pyłów UCPP było wynikiem przeciętnym. Natomiast do grupy 3 należały pozostałe rozwiązania, w których dodatek UCPP stanowił więcej niż 20%. Graficzną interpretację grupowania przedstawiono na rysunku 10.

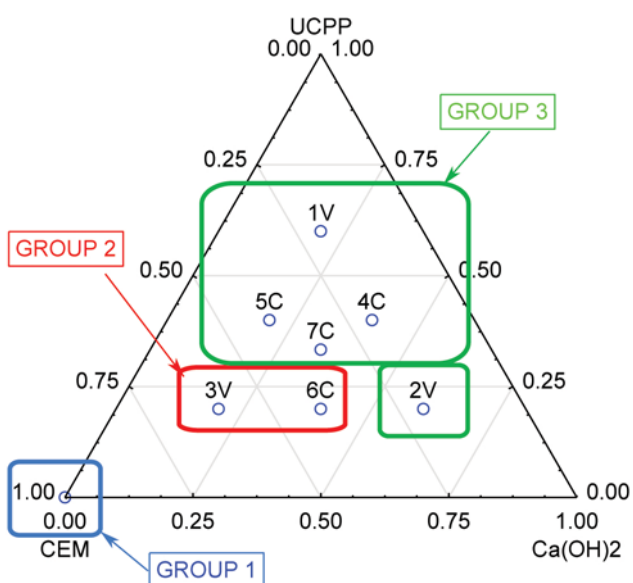
Z punktu widzenia założenia o minimalizacji sztywności, zapewnienia wymaganej odporności na oddziaływanie wody i mrozu oraz możliwie dużej utylizacji pyłów UCPP, najbardziej rekomendowaną w tym zakresie grupą były rozwiązania znajdujące się w skupieniu 3. W tym skupieniu znajdowało się również rozwiązanie optymalne 7C.

Odcinek doświadczalny

Mając do dyspozycji przedstawione wyniki dotyczące badania optymalizacji składu innowacyjnego spoiwa do technologii recyklowanej podbudowy z asfaltem spienionym, na przełomie 2019 i 2020 roku został wykonany odcinek doświadczalny wraz z systemem monitoringu. Odcinek składał się z czterech sekcji, w których dwie obejmowały zastosowanie spoiwa do technologii recyklingu z asfaltem spienionym. Pierwsza z dwóch sekcji wykonana została ze spoiwem cementowym (referencyjnym), natomiast druga z wybranym wariantem spoiwa mieszanego typu 5C, ponieważ była ona bardzo podobna do kompozycji 7C (rozwiązanie optymalne) oraz pozwalała na utylizację >20% pyłów UCPP. W związku z tym, rozwiązanie 5C było rozwiązaniem rekomendowanym do zastosowania w wykonawstwie drogowym. Gwarantuje ono uzyskanie mieszanki MCAS spełniającej kryteria optymalizacji z wynikiem znajdującym się bardzo blisko rozwiązania o cechach ponadprzeciętnych oraz pozwala na zastosowanie 40% pyłów UCPP ograniczając tym samym sztywność wywołaną wysoką zawartością cementu.

Odcinek podbudowy wykonano w technologii recyklingu głębokiego na miejscu i zainstalowano system monitoringu warunków środowiskowych oraz stanu odkształcenia pod warstwami konstrukcji. Na warstwie podbudowy wykonano warstwę SMA typu JENA, spełniającą rolę jednocześnie warstwy wiążącej i ścierniczej. Konstrukcja drogi została przeznaczona dla ruchu średniego typu KR3. Na rysunku 11 przedstawiono prace związane z wykonywaniem odcinka doświadczalnego, a schemat wykonania odcinków doświadczalnych podbudowy z danym rodzajem spoiwa, zaprezentowano na rysunku 12.

W rezultacie po wykonaniu odcinka doświadczalnego porównano próbki sporządzone w laboratorium oraz próbki pobrane z nawierzchni w postaci odwiertów. Do oceny zróżnicowania ich właściwości wykorzystano analizę wariancji. Weryfikację postawionej hipotezy wykonano przy założonym błędzie progowym 5%. Do weryfikacji wystąpienia istotnych różnic wykorzystano parametryczny test ANOVA (F-test) oraz, w przypadku podejrzenia o brak normalności dystrybucji wyników, dodatkowo nieparametryczny test Kruskala-Wallis (KW-H).



Rys. 10. Grupowanie (skupienia) metodą k-średnich

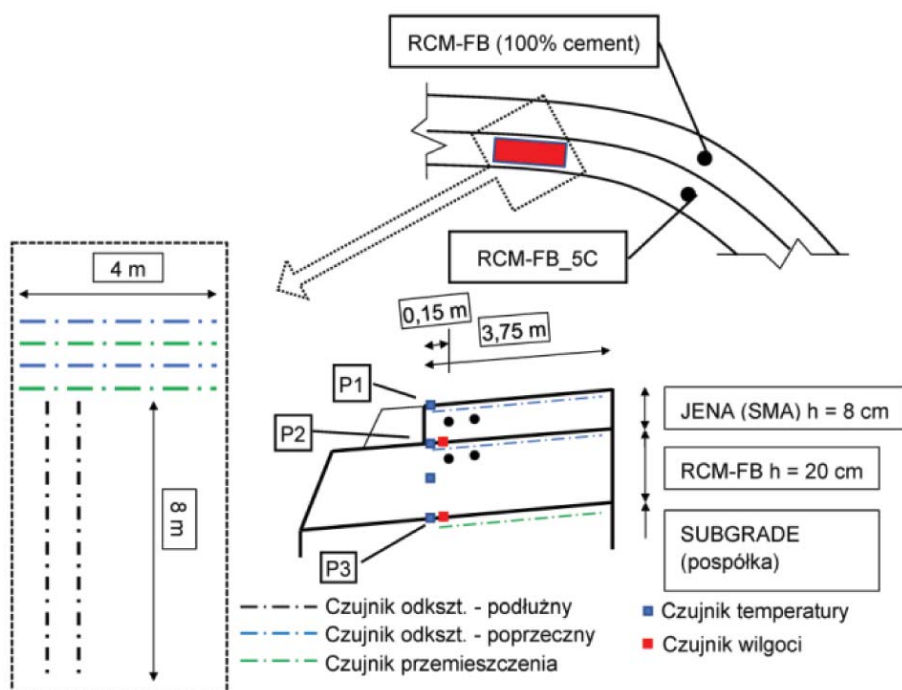
a)



b)



Rys. 11. Wykonywanie odcinka doświadczalnego; a) zespół maszyn w czasie pracy, b) widok wykonanej podbudowy z recyklowanej mieszanki MCAS (Fot. P. Buczyński)



Rys. 12. Schemat konstrukcji nawierzchni składającej się odcinków z wykonanej podbudowy z cementem (RCM-FB) oraz spoiwem mieszanym 5C (RCM-FB_5C)

Obserwując wyniki porównań tylko w przypadku oznaczenia sztywności S_m oraz wolnych przestrzeni V_a , zaobserwowano istotne zróżnicowanie pomiędzy rodzajami próbek. Wyniki badań próbek pobrane na odcinku doświadczalnym, jak i sporządzone w laboratorium, potwierdziły podobną wartość V_a , ale istotnie mniejszą od tych, które pobrano na odcinku doświadczalnym w sekcji referencyjnej (100% cementu). Może to świadczyć o tym, że mieszanka MCAS wykonana na odcinku doświadczalnym odznaczała się strukturą bardziej zamkniętą niż mieszanka referencyjna, gdzie zastosowano wyłącznie cement. W ten sam sposób wyniki

badania próbek przypisane parametrowi sztywności S_m ze spoiwem mieszanym, zarówno na odcinku doświadczalnym, jak i wykonane w laboratorium, uzyskały zdecydowanie niższą wartość niż referencyjne. Natomiast wyniki oznaczenia odporności na spękania niskotemperaturowe (wg PAN 4023) oraz odporności na działanie wody i mrozu pozostały na tym samym poziomie, bez istotnego zróżnicowania wyników badań względem rodzaju próbki, przy błędzie statystycznym wynoszącym 5%. Przedstawione wyniki badań potwierdzają skuteczność i efektywność przyjętego rozwiązania spełniającego założenia celu badań. Uzyskano rozwiązanie składu innowacyjnego spoiwa, które nadaje warstwie MCAS wymaganą odporność na działanie wody i mrozu oraz odporność na spękania niskotemperaturowe, porównywalne z próbkami zawierającymi klasycznie cement. Udało się ponadto znacznie ograniczyć sztywność w niskich temperaturach, tym samym minimalizując

możliwość wystąpienia przedwczesnych spękań w recyklowanej podbudowie.

Podsumowanie i wnioski

Na podstawie analizy wykonanych badań można stwierdzić, że zmiana składu spoiwa w recyklowanej mieszance mineralno-cementowej z asfaltem spienionym MCAS miała duży wpływ na jej właściwości. Badania wykazały bardzo złożone oddziaływanie zastosowanych spoiw (cementu,

wapna hydratyzowanego i ubocznych cementowych produktów pylastych) na właściwości fizyczne oraz mechaniczne mieszanki MCAS. W związku z tym, na podstawie wykonanych badań można sformułować następujące wnioski:

- zastosowanie kompozycji spoiwa mieszanego pozwala na efektywną kontrolę właściwości recyklowanej podbudowy,
- zrealizowany proces optymalizacji składu spoiwa mieszanego pozwolił na ustalenie, że optymalna jego kompozycja, odznaczająca się zmniejszoną sztywnością w niskich temperaturach oraz wymaganą odpornością na oddziaływanie wody i mrozu, rekomendowana do wykonania warstwy podbudowy recyklowanej, powinna zawierać 33% cementu, 33% $\text{Ca}(\text{OH})_2$ oraz 33% pyłów z sytemu odpylania UCPP,
- na podstawie przeprowadzonej analizy grupowania można stwierdzić, że nie obniżając jakości recyklowanej podbudowy wykonanej z mieszanki MCAS, można wykorzystać do 40% pyłów UCPP w składzie spoiwa mieszanego. Natomiast dalsze zwiększenie ich zawartości może spowodować nadmierny wzrost sztywności mieszanki, a w konsekwencji przyczynić się do inicjacji spękań w warstwie podbudowy,
- brak cementu w składzie spoiwa mieszanego nie zapewniał uzyskania kryterium jakościowego przez recyklowaną mieszankę MCAS,
- analizując kształt funkcji użyteczności ujawniono również silną interakcję pomiędzy UCPP i $\text{Ca}(\text{OH})_2$. W przypadku braku składnika $\text{Ca}(\text{OH})_2$ niewielki udział pyłów UCPP doprowadziłby do znacznego wzrostu objętości zaprawy i tym samym wywołałby nadmierne spękania w warstwie podbudowy recyklowanej,
- wykonana analiza porównawcza mieszanki MCAS pobranej z odcinka doświadczalnego wykonanego ze spoiwem mieszanym o składzie: 40% cementu, 20% wapna hydratyzowanego i 40% odpadowych pyłów cementowych, z wynikami badań laboratoryjnych, potwierdza słuszność założeń programu badań oraz celu optymalizacji,
- zrealizowane badania potwierdziły możliwość utylizacji pyłów cementowych (UCPP) w procesie sporządzania spoiwa mieszanego, przeznaczonego do recyklowanych mieszanek mineralno-asfaltowych MCAS.

Bibliografia

- [1] Sybilski, D., Matras, J., Mechowski, T., Zawadzki, J., Warunki techniczne wykonywania warstw podbudowy z mieszanki mineralno-cementowo-emulsyjnej (MCE), Warszawa, IBDiM 61, 1999,
- [2] Dołżycki, B., Instrukcja projektowania i wbudowania mieszanek mineralno-cementowo-emulsyjnych (MCE), 2014,
- [3] Asphalt Academy, 2009. Technical Guideline TG2: Bitumen Stabilised Materials. A Guideline for the Design and Construction of Bitumen Emulsion and Foamed Bitumen Stabilised Materials, 2nd ed. Pretoria, South Africa, 2009,
- [4] Niazi, Y., Jalili, M., Effect of Portland cement and lime additives on properties of cold in-place recycled mixtures with asphalt emulsion. *Constr. Build. Mater.*, 2009, 23, 1338–1343,
- [5] Wirtgen Group, Cold Recycling Technology, First edition, Wirtgen GmbH, Windhagen, 2012,
- [6] Iwański, M., Mazurek, G., Buczyński, P., Iwański, M.M., Effects of hydraulic binder composition on the rheological characteristics of recycled mixtures with foamed bitumen for full depth reclamation, *Const. Build. Mater.* 2022, 330, 127274,
- [7] Buczyński, P., Iwański, M., 2017. Inactive Mineral Filler as a Stiffness Modulus Regulator in Foamed Bitumen-Modified Recycled Base Layers. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* 245, 032042. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/245/3/032042>
- [8] Jenkins, K.J., Mix Design Considerations for Cold and Half-Warm Bituminous Mixes with Emphasis on Foamed Bitumen, PhD Dissertation. Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, University of Stellenbosch, 2000,
- [9] Iwański M., Chomicz-Kowalska A., Application of the foamed bitumen and bitumen emulsion to the road base mixes in the deep cold recycling technology, *The Baltic Journal of Road and Bridge Engineering*. 11, 291-301, 2016,
- [10] Iwański M.M., Synergistic Effect of F-T Synthetic Wax and Surface-Active Agent Content on the Properties and Foaming Characteristics of Bitumen 50/70, *Materials*. 2021, 14, 300,
- [11] Report TECHMATSTRATEG1/349326/9/NCBR/2017, „Innowacyjna technologia wykorzystująca optymalizację środka wiążącego przeznaczonego do recyklingu głębokiego na zimno konstrukcji nawierzchni zapewniająca jej trwałość eksploatacyjną”. NCBR, 2019,
- [12] Czapiak, P., Zapala-Slaweta, J., Owsiak, Z., Stępień, P., 2020. Hydration of cement by-pass dust. *Constr. Build. Mater.* 231, 117139,
- [13] Iwański, M.; Chomicz-Kowalska, A.; Mazurek, G.; Buczyński, P.; Cholewińska, M.; Iwański, M.M.; Maciejewski, K.; Ramiączek, P.; Effects of the Water-Based Foaming Process on the Basic and Rheological Properties of Bitumen 70/100, *Materials*, 2021, 14, 2803, 1-16,
- [14] Lazić, Ž.R., Design of experiments in chemical engineering: a practical guide. Wiley-VCH, Weinheim, Germany, 2004,
- [15] Montgomery D. C., Design and analysis of experiments, Eighth edition, John Wiley & Sons, Inc, Hoboken, NJ, 2013,
- [16] WT-2, część I Mieszanki mineralno-asfaltowe. Wymagania Techniczne. Nawierzchnie asfaltowe na drogach krajowych. Generalna Dyrekcja Dróg Krajowych i Autostrad, Warszawa, 2014,
- [17] STATISTICA 13.3. Statsoft. Available online: www.statsoft.com (accessed on 20 August 2019),
- [18] Sebaaly P. E., Little D. N., Epps J. A., The Benefits of Hydrated Lime in Hot Mix Asphalt, The National Lime Association, Arlington. 2006,
- [19] Luxemburk, G.F. Lime Hydrate as an Additive to Improve the Adhesion of Bitumen to the Aggregates. In Proceedings of the II International Conference Durable and Save Road Pavements, Kielce, Poland, 15–16 May 1996; pp. 296–302,
- [20] Piasta Z., Lenarcik A., Applications of statistical multi-criteria optimization in design of concretes. *Optimization Methods for Material Design of Cement-based Composites*, 1998,
- [21] Piepel G. F., Cornell J. A., Mixture Experiment Approaches: Examples, Discussion, and Recommendations. *Journal of Quality Technology*, 26, 177–196, 1994.