

POLITECHNIKA ŚWIĘTOKRZYSKA

Wydział Budownictwa i Architektury



ROZPRAWA DOKTORSKA

**Wpływ dodatku modyfikatora polimerowego na właściwości
fzykomechaniczne recyklowanej mieszanki na zimno z emulsją
asfaltową**

mgr inż. Jakub Krasowski

Promotor:

dr hab. inż. Przemysław Buczyński, prof. PŚk

Kielce 2024

Dziękuję

Panu dr hab. inż. Przemysławowi Buczyńskiemu, prof. PŚk za poświęcony czas, cenne uwagi i sugestie, wyrozumiałość i zaangażowanie, dzięki któremu możliwe było napisanie tej pracy.

Koleżankom oraz Kolegom z Katedry Inżynierii Komunikacyjnej za pomoc i miłą atmosferę.

Rodzinie oraz bliskim za okazane wsparcie, cierpliwość i motywację.

Niniejszą rozprawę doktorską dedykuję mojej Mamie.

SPIS TREŚCI

Wykaz oznaczeń i skrótów	5
1. Wstęp	7
2. Cel, tezy oraz zakres rozprawy	9
2.1. Cel rozprawy doktorskiej.....	9
2.2. Główne tezy rozprawy doktorskiej	10
2.3. Zakres rozprawy doktorskiej.....	10
3. Przegląd literatury w zakresie rozwoju technologii modyfikacji materiałów budowlanych	12
3.1. Modyfikacja kompozytów mineralno-cementowych	12
3.2. Modyfikacja kompozytów mineralno-asfaltowych	19
3.3. Próby „modyfikacji” mieszanek mineralno-cementowych z emulsją asfaltową.....	23
3.4. Podsumowanie	30
4. Plan eksperymentu oraz plan badań	34
4.1. Plan eksperymentu	34
4.2. Plan badań.....	36
5. Projekt składu mieszanki MCE	38
5.1. Materiały	38
5.1.1. Kruszywo naturalne i z recyklingu.....	38
5.1.2. Cement portlandzki	39
5.1.3. Emulsja asfaltowa.....	39
5.1.4. Redyspergowalny proszek polimerowy	40
5.2. Projekt składu mieszanki MCE z modyfikatorem polimerowym RPP.....	42
5.3. Przygotowanie i wykonanie prób do badań w warunkach laboratoryjnych	43
5.4. Podsumowanie	44
6. Wyniki badań laboratoryjnych wpływu modyfikatora polimerowego na właściwości fizykomechaniczne mieszanki MCE	45
6.1. Wyniki badań właściwości fizycznych.....	47
6.1.1 Zawartość wolnych przestrzeni (V_m)	47
6.1.2 Nasiąkliwość (n_w).....	49
6.2. Wyniki badań właściwości mechanicznych.....	52
6.2.1. Wytrzymałość na pośrednie rozciąganie (ITS_{DRY}).....	52
6.2.2. Moduł sztywności mieszanki MCE w teście pośredniego rozciągania (S_m)....	57
6.3. Odporność na działanie czynników klimatycznych.....	64

6.3.1. Odporność na działanie wody - TSR.....	64
6.3.2. Odporność na działanie wody i mrozu - ITSR.....	67
6.4. Ocena wpływu modyfikatora polimerowego na odporność na pękanie mieszanki MCE.....	69
6.4.1. Odkształcenie przy maksymalnej sile ϵ_{\max}	72
6.4.2. Odporność na pękanie K_{IC}	74
6.4.3. Wskaźnik pęknięć P.....	78
6.5. Właściwości reologiczne mieszanek MCE z modyfikatorem polimerowym.....	81
6.6. Podsumowanie.....	91
7. Optymalizacja składu mieszanki MCE.....	94
7.1. Optymalizacja w aspekcie zachowania wymagań polskich wytycznych.....	97
7.2. Optymalizacja w aspekcie odporności na działanie wody oraz mrozu.....	98
7.3. Optymalizacja w aspekcie zwiększonej odporności na pękanie.....	100
7.4. Optymalizacja w aspekcie uzyskania optymalnej sztywności.....	101
7.5. Podsumowanie.....	103
8. Moduł sztywności oraz trwałość zmęczeniowa w teście czteropunktowego zginania mieszanki mineralno-cementowej z emulsją asfaltową oraz mineralno-cementowej z polimerem.....	104
8.1. Badanie modułu sztywności w teście czteropunktowego zginania.....	104
8.2. Badanie trwałości zmęczeniowej w teście czteropunktowego zginania.....	105
9. Propozycja typowych układów warstw konstrukcyjnych nawierzchni z podbudową wykonaną w technologii recyklingu głębokiego na zimno.....	112
9.1. Kryteria zmęczeniowe.....	115
9.2. Propozycja typowych konstrukcji nawierzchni podatnych z podbudową z mieszanki MCP wykonanej w technologii recyklingu głębokiego na zimno.....	117
10. Wnioski.....	122
Streszczenie.....	124
Bibliografia.....	126

Wykaz oznaczeń i skrótów

Oznaczenia

$ E^* $	– moduł dynamiczny [MPa]
ITS_{DRY}	– wytrzymałość na pośrednie rozciąganie [kPa]
$ITSR$	– odporność na działanie wody i mrozu [%]
K_{IC}	– odporność na pękanie [$N/mm^{3/2}$]
S_m	– moduł sztywności [MPa]
TSR	– odporność na działanie wody [%]
V_m	– zawartość wolnej przestrzeni [%]
x_i	– i -ta zmienna niezależna [–]
y	– zmienna zależna (mierzona) [–]
P	– wskaźnik podatności [–]
$\varepsilon(t)$	– odkształcenie wyrażone w funkcji czasu [–]
ε_{max}	– maksymalne odkształcenie [%]
ρ_{bssd}	– gęstość objętościowa [Mg/m^3]
ρ_{mv}	– gęstość [Mg/m^3]
φ	– kąt przesunięcia fazowego [$^\circ$]

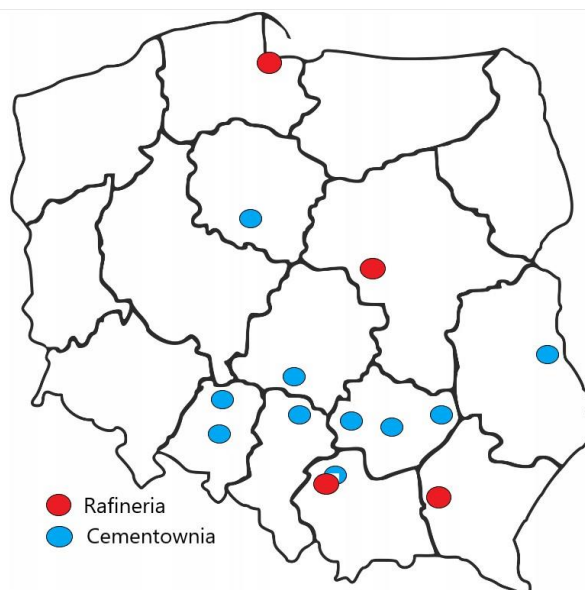
Skróty

AC	– beton asfaltowy wg normy PN-EN 13108-1 (Asphalt Concrete)
AC WMS	– beton asfaltowy o wysokim module sztywności wg normy PN-EN 13108-1 (Asphalt Concrete)
ACxP	– beton asfaltowy wg normy PN-EN 13108-1 przeznaczony do warstwy podbudowy
CBGM	– mieszanka mineralna związana cementem (Cement Bound Granular Mixture)
CEM	– cement portlandzki CEM I 42,5R
DTC-CY	– schemat badania modułu zespolonego wg aktualnej normy PN-EN 12697-26 zał. D (Direct Tension-Compression test on Cylindrical specimens)
EMU	– emulsja asfaltowa
EVA	– kopolimer etylenu i octanu winylu
HMA	– mieszanka mineralno-asfaltowa produkowana na gorąco (Hot Mix Asphalt)
IT-CY	– schemat badania modułu zespolonego wg aktualnej normy PN-EN 12697-26 zał. C (Indirect Tension to Cylindrical specimens)
MCAS	– mieszanka mineralno-cementowa z asfaltem spienionym
MCE	– mieszanka mineralno-cementowa z emulsją asfaltową

- MCP – mieszanka mineralno-cementowa z modyfikatorem polimerowym
- MM – mieszanka mineralna
- MS – błąd estymacji
- PCC – beton polimerowo-cementowy (Polymer Cement Concrete)
- RAP – destrukta asfaltowy (Reclaimed Asphalt Pavement)
- RPP – redyspergowalny proszek polimerowy
- SCB – schemat badania odporności na pękanie wg aktualnej normy PN-EN 12697-44 (Semi-Circular Bend)
- U_i^{III} – funkcja użyteczności

1. Wstęp

Ostatnie lata pokazują, jak nieprzewidywalny jest otaczający nas świat. Pandemia, anomalie pogodowe, czy konflikty zbrojne, w znacznym stopniu wpłynęły na branżę budownictwa drogowego. Wspomniane wydarzenia przyczyniły się do przerwania łańcuchów dostaw, ograniczenia wydobycia surowców, wprowadziły zawirowania na rynku pracowników, co zostało silnie odczute w szerokiej dziedzinie jaką jest budownictwo. Branża stanęła przed wyzwaniem rozwoju, w dobie wszelkich ograniczeń. Ograniczeniami stały się zarówno dostawy materiałów w stabilnych cenach, pracownicy, jak i inne względy ekonomiczne oraz ekologiczne. Poszukiwanie rozwiązań energooszczędnych, minimalizujących czas przedsięwzięcia oraz prostych w wykonaniu stało się priorytetem. Technologia wykorzystywana w drogownictwie, która od lat wychodzi naprzeciw wspomnianym oczekiwaniom, to recykling głęboki materiałów na zimno. Recykling głęboki na zimno, pozwala na wykonanie podbudowy drogowej przy zastosowaniu materiałów z rozbiórki zniszczonej nawierzchni drogi. W tym miejscu należy rozróżnić podbudowy z mieszanki mineralno-cementowo-emulsyjnej (MCE) oraz mineralno-cementowe z asfaltem spienionym (MCAS). Niemal trzydziestoletnie doświadczenie w kraju, przyczyniło się do rozwoju technologii, która z roku na rok, zyskuje na popularności. Bez wątpienia trend minimalizacji kosztów, redukcji pozyskiwania nowych materiałów, oraz emisji CO₂, będzie stawał na pierwszym miejscu oczekiwań względem branży jaką jest budownictwo drogowe. Ogromne znaczenie w skali naszego kraju, ma rozmieszczenie zakładów produkcyjnych, czy też dostęp do materiałów, wykorzystywanych we wspomnianych recyklowanych mieszankach. Analizując mapę przedstawioną na rysunku 1.1, zauważalna jest duża dysproporcja między poszczególnymi województwami, a dostępem do surowców i zakładów produkcyjnych. Mowa tutaj zarówno o cemencie, kruszywach, czy asfaltach drogowych. Aspekt ten ma duże znaczenie, w przypadku doboru technologii remontu, budowy czy przebudowy drogi. Wpływa zarówno na czas realizacji, jak i koszty inwestycji.



Rys. 1.1. Rozmieszczenie cementowni oraz rafinerii w Polsce

Północno-zachodnia, północna oraz północno-wschodnia część kraju, pozbawiona jest zakładów produkujących kluczowe składniki (asfalt, cement), które są wykorzystywane w budownictwie. Wspomniane regiony pozbawione są również bezpośredniego dostępu do kruszyw łamanych. Każda inwestycja wiąże się zatem z ogromnym wyzwaniem logistycznym, chociażby ze względu na zakup oraz transport niezbędnych materiałów. Istotne jest zatem poszukiwanie oszczędności, minimalizacja zakupów na rzecz recyklingu materiałów.

Oprócz wspomnianych czynników, z roku na rok, obserwuje się wzrost liczby użytkowników poruszających się po drogach publicznych. Konstrukcje nawierzchni drogowych poddawane są cyklicznym obciążeniom pochodzącym od kół pojazdów. Kluczowym parametrem uwzględnianym w doborze konstrukcji nawierzchni, jest trwałość zmęczeniowa układu warstw. Dla usprawnienia procesów budowlanych należy dążyć do połączenia optymalizacji grubości poszczególnych warstw konstrukcji, optymalizacji składu mieszanek oraz poprawy właściwości fizykomechanicznych. Na rynku materiałów budowlanych trendem, który cieszy się największym powodzeniem, jest modyfikacja składu materiałów. Dzięki temu możliwa jest poprawa właściwości znanych już materiałów oraz optymalizacji ich składu. Wymienione założenia mogą przyczynić się do redukcji kosztów, czy zużycia poszczególnych składników warstw nawierzchni drogowych. Podbudowy drogowe poddawane są rozciąganiu, co bezpośrednio powodują poruszające się po jezdni pojazdy. Zbyt wysoka sztywność lub mała kohezja składników może spowodować wystąpienie spękań w warstwie podbudowy z mieszanki MCE. Istotne jest, aby wykonana podbudowa posiadała odpowiednią odkształcalność przy zachowaniu trwałości eksploatacyjnej.

Modyfikator polimerowy pozwala na uzyskanie korzystnych właściwości betonów cementowych, czy mieszanek mineralno-asfaltowych. Mając na uwadze możliwość wykorzystania potencjału modyfikacji, zasadnym wydaje się połączenie technologii recyklingu głębokiego na zimno z emulsją asfaltową, oraz modyfikacja składu mieszanki dostępnym na rynku modyfikatorem polimerowym. Modyfikacja składu mieszanki odbywa się w przystępny sposób, z uwagi na wybór redyspergowalnego proszku polimerowego (RPP). Technologia przyczyni się do ponownego wbudowania materiałów, które zostają pozyskane w trakcie rozbiórki zdegradowanych warstw nawierzchni. Obecność modyfikatora polimerowego w mieszankach, powoduje poprawę właściwości fizykomechanicznych materiałów. Modyfikacja daje również szansę na wykluczenia niepożądanych zjawisk, jakie mogą wystąpić w podbudowie drogowej. Analiza właściwości mieszanki MCE z modyfikatorem polimerowym w postaci redyspergowalnego proszku polimerowego (RPP), stanowi solidne uzupełnienie obecnego stanu wiedzy w dziedzinie budownictwa drogowego.

2. Cel, zakres oraz tezy rozprawy doktorskiej

2.1 Cel rozprawy doktorskiej

Celem rozprawy doktorskiej jest ocena wpływu ilości modyfikatora polimerowego, w postaci redyspergowalnego proszku polimerowego (RPP), na właściwości fizykomechaniczne mieszanki mineralno-cementowej z emulsją asfaltową (MCE). Badania mają na celu określenie optymalnej ilości proszku polimerowego jako zamiennika dla tradycyjnych środków wiążących stosowanych w składzie mieszanki MCE. Optymalizację wykonano przy zachowaniu zwiększonej trwałości eksploatacyjnej oraz wymaganych właściwościach fizycznych, mechanicznych i reologicznych. Szczegółowe cele rozprawy to:

- I. Ocena wpływu ilości środków wiążących tj. cementu portlandzkiego, wolnorozpadowej emulsji asfaltowej oraz proszku polimerowego na właściwości fizyczne, mechaniczne i reologiczne recyklowanej mieszanki na zimno.
- II. Opracowanie modeli matematycznych opisujących właściwości fizyczne, mechaniczne i reologiczne, recyklowanej mieszanki na zimno.
- III. Optymalizacja ilości środków wiążących w recyklowanej mieszance.
- IV. Szczegółowe badania oraz analiza trwałości zmęczeniowej.
- V. Propozycja układu warstw konstrukcji nawierzchni z nowym typem podbudowy drogowej.

Dla uzyskania celów, wykonano następujące działania:

- Wybór planu eksperymentu oraz odpowiednich narzędzi obliczeniowych.
- Analiza literatury technicznej, wytycznych oraz doświadczeń polskich i zagranicznych związanych z podbudowami wykonywanymi w technologii recyklingu głębokiego na zimno z emulsją asfaltową.
- Analiza doświadczeń oraz dokonań dotyczących modyfikacji materiałów budowlanych oraz wykorzystywanych modyfikatorów.
- Ocena oraz dobór odpowiednich materiałów, wykorzystanych do wykonania prób recyklowanej podbudowy na zimno.
- Wykonanie badań wpływu modyfikatora polimerowego na właściwości fizyczne, mechaniczne i reologiczne recyklowanych mieszanek.
- Ocena oraz interpretacja uzyskanych wyników badań.
- Wykonanie optymalizacji składu recyklowanej podbudowy w aspekcie ilości środków wiążących i modyfikatora polimerowego.
- Badanie trwałości zmęczeniowej proponowanych rozwiązań.
- Propozycja typowych układów warstw konstrukcyjnych z podbudową z mieszanki MCP.

2.2 Główne tezy rozprawy doktorskiej

Z uwagi na liczne wymagania jakie powinna spełniać mieszanka MCE, zastosowana w warstwie podbudowy drogowej, niezbędne jest poszukiwanie optymalnego udziału procentowego składników i spoiw. Proces optymalizacji zapewni poprawę właściwości eksploatacyjnych warstwy podbudowy i jej trwałość zmęczeniową. Dla uzyskania oczekiwanych właściwości, zastosowano w składzie mieszanki modyfikator polimerowy (RPP) w postaci redyspergowalnego proszku polimerowego EVA. W świetle powyższych sformułowano następujące tezy:

- I. Możliwe jest ograniczenie ilości tradycyjnych środków wiążących tj. cementu portlandzkiego oraz emulsji asfaltowej w składzie recyklowanej mieszanki na zimno, przy zastosowaniu proszku polimerowego.
- II. Zastosowanie proszku polimerowego w składzie recyklowanej mieszanki wpływa korzystnie na kohezję przy jednoczesnym obniżeniu modułu sztywności oraz wzroście kąta przesunięcia fazowego.
- III. Zastosowanie proszku polimerowego w składzie recyklowanej mieszanki na zimno powoduje wzrost jej podatności, zapewniając większą trwałość eksploatacyjną nawierzchni w porównaniu z zastosowaniem tradycyjnych środków wiążących.

2.3 Zakres rozprawy doktorskiej

Praca składa się z 10 rozdziałów, których celem jest ocena wpływu modyfikatora polimerowego na właściwości fizykomechanicznej recyklowanej mieszanki na zimno z emulsją asfaltową. Głównym efektem analiz jest optymalizacja składu mieszanki oraz wskazanie optymalnego udziału procentowego poszczególnych składników w recyklowanej mieszance, przy założeniu odpowiednich kryteriów optymalizacji. Kolejno dokonana analizy trwałości zmęczeniowej proponowanych rozwiązań. Uzyskane wyniki pozwoliły na wykonanie propozycji konstrukcji nawierzchni z podbudową w technologii recyklingu głębokiego na zimno, z modyfikatorem polimerowym.

Pierwsze dwa rozdziały stanowią wprowadzenie do analizowanej tematyki. **Rozdział 1** to omówienie obecnej sytuacji na rynku budownictwa drogowego oraz kierunków w jakich podąża branża. **Rozdział 2** wskazuje cel i zakres niniejszej pracy, oraz przedstawia główne tezy przyjęte w rozważaniach.

Rozdział 3 poświęcono analizie aktualnej wiedzy dotyczącej polimerów stosowanych w materiałach budowlanych, oraz procesów jakie zachodzą w betonach cementowych i asfaltach, na skutek modyfikacji polimerami. Wyróżniono kompozyty cementowe oraz do tychczasowe doświadczenia z ich modyfikacją. Kolejno analizie poddano asfalty oraz kompozyty mineralno-asfaltowe. Dla wymienionych materiałów, również podjęto próbę opisanie dostępnych w literaturze doświadczeń związanych z modyfikacją, m.in. polimerami. Trzecia grupa kompozytów jakie zostały omówione to recyklowane na zimno mieszanki. Szczególną uwagę poświęcono na przegląd aktualnych doświadczeń krajowych oraz zagranicznych z mieszankami mineralno-cementowymi z emulsją asfaltową. Opisano próby poprawy parametrów recyklowanych mieszanek przez zmianę udziału poszczególnych składników, dozowanie modyfikatorów czy dodatków. Żadna z dostępnych publikacji nie podejmuje tematyki mieszanki mineralno-cementowo-emulsyjnej z modyfikatorem

polimerowym. Kolejno omówiono aktualne problemy jakie pojawiają się w przypadku wyboru technologii recyklingu głębokiego na zimno. Opisano również korzyści jakie mogą płynąć z efektywnej modyfikacji recyklowanej mieszanki, oraz konieczność podjęcia próby modyfikacji składu recyklowanej na zimno mieszanki z emulsją asfaltową.

Rozdział 4 to opis planu eksperymentu, planu badań oraz ich charakterystyka. Do oceny wybrany został plan Boxa-Behnkena, w którym zmienne występują na trzech poziomach, tj. (-1,0,+1) tzw. wartości kodowane. Przyjęto sterowanie trzema czynnikami, tj. ilością cementu (CEM), emulsji asfaltowej (EMU) oraz modyfikatora polimerowego (RPP). W **rozdziale 5** dokładnie scharakteryzowano zastosowane w pracy materiały, potrzebne do wykonania mieszanki mineralno-cementowej z emulsją asfaltową i modyfikatorem polimerowym.

Rozdział 6 to charakterystyka laboratoryjnych metod badawczych oraz analiza otrzymanych wyników. Zbadano wpływ modyfikatora polimerowego na właściwości fizyczne, mechaniczne, reologiczne recyklowanych na zimno mieszanek. Odporność na pośrednie rozciąganie, zawartość wolnych przestrzeni, moduł sztywności, odporność na pęknięcie, czy parametry reologiczne, to tylko kilka z analizowanych cech, które zostały opisane modelami matematycznymi, w postaci wielomianu stopnia drugiego. Dokładne rozpoznanie charakterystyki mieszanki MCE z modyfikatorem polimerowym, pozwoliło w **rozdziale 7** na optymalizację składu mieszanki. Umożliwiły to cztery dobrane kryteria optymalizacji, oraz funkcja użyteczności. Wytypowane zostały dwie mieszanki, które charakteryzowały się najlepszymi właściwościami, spełniające przyjęte w kryteriach założenia.

W **rozdziale 8** skupiono się na analizie modułu sztywności oraz trwałości zmęczeniowej mieszanek wyłonionych w procesie optymalizacji. Badania stanowią solidne potwierdzenie stosowania modyfikacji w mieszankach MCE. **Rozdział 9** stanowi propozycję typowych konstrukcji dla dokumentu jakim jest Katalog Typowych Konstrukcji Nawierzchni Podatnych i Półsztywnych, wydany w 2014. W ramach pracy wykonano propozycje konstrukcji typu E, z podbudową wykonaną w technologii recyklingu głębokiego na zimno.

Rozdział 10 zawiera podsumowanie i wnioski jakie przyniosła wykonana ocena wpływu modyfikatora polimerowego RPP na właściwości mieszanki z emulsją asfaltową. Przedstawiono również streszczenie pracy oraz zestawiono bazę literatury wykorzystaną w niniejszej pracy.

3. Przegląd literatury w zakresie rozwoju technologii modyfikacji kompozytów budowlanych

Konstrukcje budowlane złożone są z kompozytów. Kompozyty według definicji, są połączeniem przynajmniej dwóch materiałów, gdzie jeden z nich stanowi rolę lepiszcza [1]. Powszechnie znanymi kompozytami są zatem betony cementowe, czy mieszanki mineralno-asfaltowe. Przywołane materiały są eksploatowane w zróżnicowanym środowisku. Wraz z upływem czasu i postępem technologii, kompozyty stosowane w budownictwie zostały poddane modyfikacji. Wynika to z poszukiwania trwalszych rozwiązań, spełniających specjalne wymagania, czy również poszukiwaniu oszczędności w momencie wykonywania przedsięwzięcia budowlanego. Polimery to najpopularniejsze składniki, stosowane do modyfikacji materiałów. Definiowane są jako związki chemiczne, składające się z jednako- wych, cyklicznie powtarzających się elementów, gr. polymeres – „składające się z wielu części” [2]. Ich obecność w składzie ma wpływ na zmianę parametrów materiałów budowlanych. Bardzo często obserwowanym zjawiskiem jest wzrost podatności modyfikowanych polimerem materiałów [3]. Cechy te są niezwykle pożądane w przypadku zapraw, betonów cementowych, czy asfaltów drogowych. Należy zaznaczyć, że warunkiem skutecznej modyfikacji, jest odpowiedni dobór jakościowy oraz ilościowy polimeru. Polimery stosowane m.in. w betonach cementowych można podzielić na kilka podgrup. Na wstępie warto zaznaczyć, że rozróżniamy dwie grupy z uwagi na charakter zmian pod wpływem czynników zewnętrznych. Polimery termoplastyczne, tzw. termoplasty oraz ulegające trwałemu utwardzeniu, czyli duroplasty. Termoplasty należą do grupy polimerów, które mięknią pod wpływem ogrzewania, natomiast po ochłodzeniu twardnieją. Proces ten jest odwracalny i powtarzalny, jeśli nie nastąpi rozkład termiczny polimeru. Duroplasty mają zdolność do przestrzennego sieciowania makrocząsteczek, prowadzi to do ich nieodwracalnego utwardzenia. Należy wskazać, że reakcja ta następuje pod wpływem specjalnych środków chemicznych, czyli utwardzaczy (polimery chemoutwardzalne), lub pod wpływem temperatury (polimery termoutwardzalne) [2] [4].

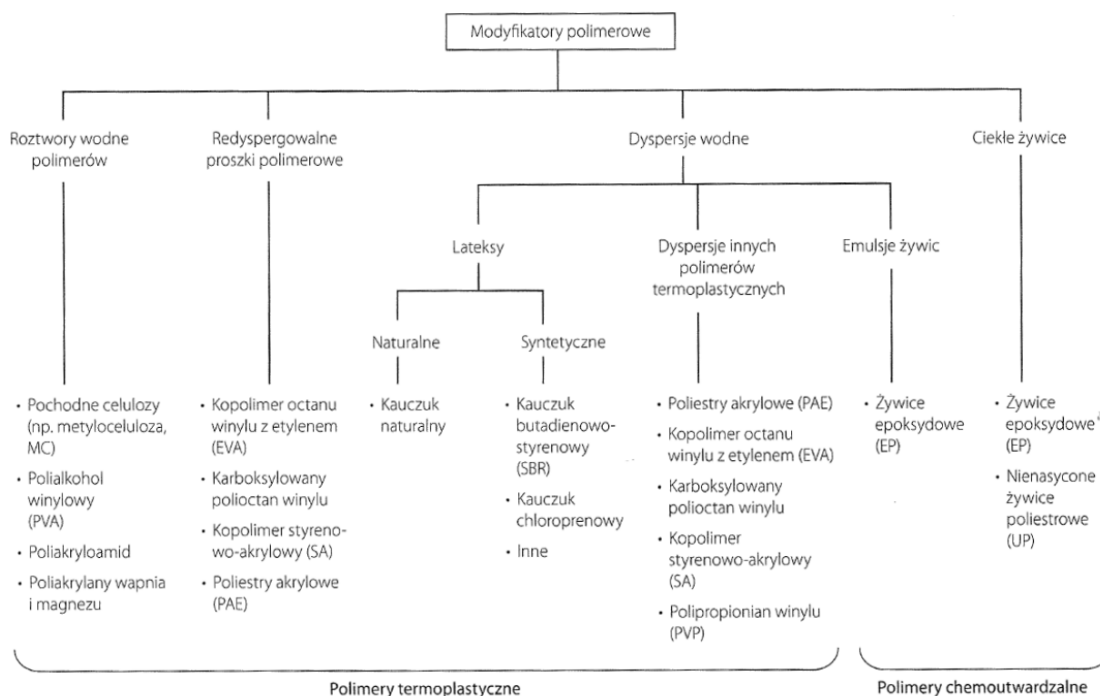
Znajomość składu betonów cementowych i mieszanek MCE, oraz ich zastosowania, wskazuje na kilka podobieństw. Omawiane kompozyty pracują w różnych środowiskach, gdzie oddziałują na nie czynniki zewnętrzne, takie jak woda czy mróz. Zarówno betony jak i mieszanki MCE poddawane są siłom ściskającym i rozciągającym [5] [6]. Istotna zatem wydaje się modyfikacja składu kompozytów budowlanych, dzięki której jest szansa na poprawę kluczowych parametrów. Zasadne wydaje się sprawdzenie jak modyfikator polimerowy oddziałuje na mieszankę MCE.

3.1 Modyfikacja kompozytów mineralno-cementowych

Optymalna ilość polimeru, która jest wprowadzona do mieszanki betonowej, może spowodować istotne zmiany, w strukturze twardniejącego betonu. Poprawie ulegają kluczowe parametry, mające wpływ na charakter pracy kompozytów wykonanych z betonu cementowego. Przykłady zmiany właściwości jest m.in. wzrost wytrzymałości na rozciąganie betonów modyfikowanych polimerami. Kolejną pożądaną cechą jest spadek nasiąkliwości, czy

wzrost mrozoodporności. Oczekiwaną cechą w przypadku niektórych kompozytów cementowych jest również poprawa odporności na ścieranie [2].

Polimery do mieszanek betonowych dodawane mogą być w różnej postaci. Można zaliczyć przynajmniej cztery główne grupy. Pierwsza z nich to dyspersje wodne polimerów, do których zalicza się lateksy oraz emulsje żywic wodorozcieńczalnych. Są to układy dwufazowe, gdzie faza ciekła lub stała, rozpuszczona jest w fazie ciekłej. Dyspersje wodne polimerów termoplastycznych stanowią najliczniejszą grupę modyfikatorów, które wykorzystywane są do betonów polimero-cementowych [4]. Druga grupa to polimery stałe, czyli proszki otrzymywane z dyspersji wodnych, zdolne do powtórnego dyspergowania – „redyspergowalne”. Proszek polimerowy uzyskiwany jest wskutek odparowania wody z dyspersji polimerowej, stosuje się w tym celu suszenie rozpyłowe [7]. Trzecia grupa, którą należy wskazać, to wodne roztwory polimerów, które z technologicznego punktu widzenia, mogą być korzystniejsze niż dyspersje. Rozpuszczalność polimerów w wodzie jest jednak ograniczona. Polimery wodnorozpuszczalne są po utwardzeniu wrażliwe na działanie wody, co może niekorzystnie wpływać na parametry materiałów zawierających je w swoim składzie. Przykładem takiego związku może być polialkohol winylowy (PVA) [8]. Czwarta z wyszczególnionych grup polimerów to ciekłe żywice syntetyczne. Występują zwykle w formie związków o bardzo dużej lepkości, które pod wpływem zewnętrznych czynników chemicznych lub fizycznych utwardzają się [2]. Graficzne podsumowanie wymienionych czterech grup, przedstawiono na rysunku 3.1.

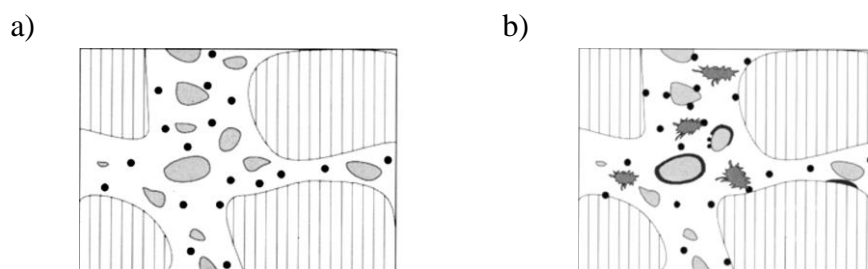


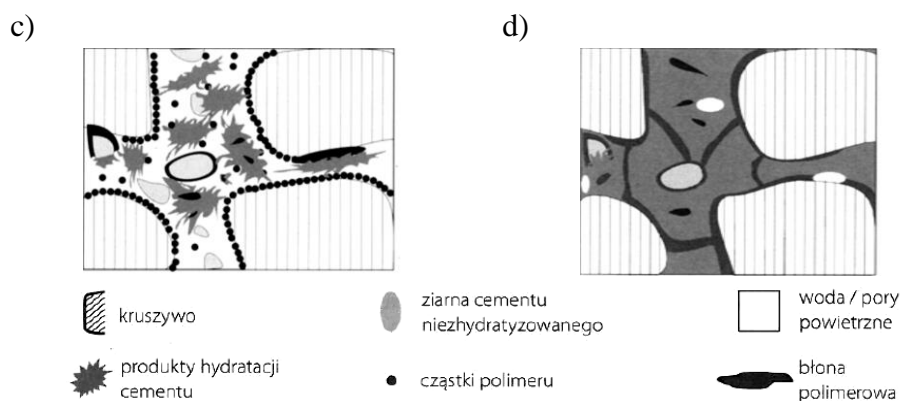
Rys. 3.1. Rodzaje polimerów stosowanych do wykonywania spoiw polimero-cementowych [4]

Tym samym betony cementowe jako materiały powszechnie stosowane w każdej gałęzi budownictwa, powinny spełniać różne wymagania, w zależności od konkretnych potrzeb konstrukcji czy danego obiektu. Mowa tutaj między innymi o klasie ekspozycji, wytrzymałości na ściskanie, wytrzymałości na rozciąganie czy ekspozycji na środowisko agresywne chemicznie. Z pomocą przychodzi inżynieria materiałowa oraz modyfikacja materiałów.

Oprócz powszechnie stosowanych dodatków czy domieszek, należy również wskazać omawianą wcześniej modyfikację polimerami.

Tematyka betonów polimero-cementowych oraz zapraw cementowych modyfikowanych polimerami, jest często rozważana w publikacjach naukowych. Z uwagi na potrzeby poprawy parametrów materiałów i kompozytów cementowych jest niezwykle istotna. Poszukiwanie trwałych i zrównoważonych rozwiązań jest obecnie najważniejszym i najtrudniejszym wyzwaniem dla inżynierów materiałowych. Analizie poddawany jest między innymi wpływ konkretnych modyfikatorów polimerowych, oraz ich zawartości, na czas wiązania zaprawy cementowej. Przykładem jest praca [9], która wskazuje na wpływ obecności proszków polimerowych w zaprawie cementowej, na opóźnienie czasu wiązania. Badania pokazały, iż obecność redyspergowalnych proszków polimerowych w zaprawie powoduje opóźnienie wiązania cementu portlandzkiego. Jest ono proporcjonalne do ilości dodatku w zaprawie. Z kolei w pracy [10] autorzy prezentują wyniki badań zapraw cementowych. Były one prostymi mieszaninami wypełniacza w postaci piasku kwarcowego, cementu portlandzkiego CEM I 42,5 R, wykorzystanego jako spoiwo hydrauliczne, oraz metylohydroksyetylocelulozy. Dodatkami do zaprawy były dwa ogólnodostępne na rynku redyspergowalne proszki polimerowe, dodawane w ilości 0%-5% całkowitej masy mieszanki. Wybrane polimery miały różną budowę chemiczną: kopolimer styrenowo-akrylowy (SA) oraz kopolimer octan winylu-etylen (EVA). Zawarte w publikacji badania wskazują, że nawet niewielka ilość proszku polimerowego, która jest dodana do zaprawy cementowej, istotnie wpływa na czas początkowego i końcowego wiązania zaprawy. Efekt ten silnie zależy od zawartości procentowej dodatku. Potwierdzają się zatem wskazane wcześniej założenia, modyfikator polimerowy reguluje czas wiązania zapraw cementowych. W publikacji [11] oceniono poddano koalescencję cząstek polimeru w zaprawach modyfikowanych polimerami oraz w wodnych zaprawach modyfikowanych polimerami. Z wyników badań przeprowadzonych z pomocą mikroskopu skaningowego, można odczytać, że składniki zaprawy niemodyfikowanej są ze sobą luźno połączone, dzięki czemu mają strukturę o porównywalnie niższych właściwościach mechanicznych i wytrzymałościowych. Zaprawy modyfikowane polimerem ze sobą kompaktowo połączone ze względu na obecność przeplatającej się fazy polimerowej, tworząc w ten sposób monolityczną strukturę o ulepszonych właściwościach mechanicznych i wytrzymałościowych. Dla zrozumienia idei modyfikacji, istotna jest analiza modelu tworzenia się struktury betonu polimero-cementowego. Schemat podzielony na cztery etapy, został przedstawiony na rysunku 3.2.





Rys. 3.2. Model tworzenia się mikrostruktury kompozytu polimerowo-cementowego [12] [13]

W pierwszym etapie dochodzi do rozproszenia polimeru we wspomnianej ciekłej fazie zaczynu cementowego. Kolejno następuje gromadzenie się cząstek polimeru na powierzchni produktów hydratacji cementu, niehydratyzowanych ziarnach cementu oraz kruszywa, tworząc tym samym, gęsto upakowane agregaty. Podczas trzeciego etapu, pozostałe, dotychczas nierozproszone cząstki polimeru, razem z wodą zarobową, zostają zamknięte w porach kapilarnych. W momencie ubytku wody kapilarnej ulegają flokulacji. W następstwie dochodzi do wytworzenia gęsto upakowanej warstwy. W ostatnim, czwartym etapie, razem z procesem wysychania mieszanki betonowej, cząsteczki polimeru, które są gęsto upakowane oraz zaabsorbowane na różnych powierzchniach, ulegają koalescencji. Dochodzi do wytworzenia ciągłej błonki. Tym samym spoiwo cementowe i polimer tworzy matrycę mieszanki. Podobną tematykę analizowano w pracy [13], [14] oraz [15], gdzie przy pomocy mikroskopu skaningowego, zbadano wpływ polimeru EVA na właściwości zaprawy cementowej, oraz ewentualne zmiany spowodowane kondycjonowaniem w wodzie. Należy odnotować, że nie zaobserwowano zmian struktury polimerowej, mimo przebywania i kondycjonowania w wodzie. Jest to istotna informacja, wskazująca na słuszność modyfikacji materiałów, poprawy ich parametrów, bez negatywnego oddziaływania m.in. wody na kompozyty wykonane z betonu cementowego. Z punktu widzenia projektantów, wykonawców, czy użytkowników, oprócz wpływu modyfikacji na czas wiązania, istotne jest również oddziaływanie długoterminowe polimeru w zaprawie czy kompozycie cementowym. Autorzy publikacji [16] [17] analizowali właściwości zapraw modyfikowanych polimerami, poddanych oddziaływaniu środowiska przez okres 10 lat. Do modyfikacji wykorzystano trzy rodzaje polimerów, między innymi polimer EVA. Należy zaznaczyć, że po upływie tak długiego czasu, zaprawy posiadały należytą przyczepność czy wytrzymałość na zginanie i ściskanie. Analiza mikroskopem skaningowym nie wykazała zmian w strukturach zapraw. Wskazuje to na długofalowe korzyści wynikająca z zastosowania modyfikacji polimerem kompozytów cementowych. Wiązania polimerowe, oraz wytworzona błona, jest obecna w modyfikowanym materiale na przestrzeni lat. Istnieją również próby dodawania innych modyfikatorów do zapraw polimero-cementowych. Przykładem może być nanokrzemionka ($nSiO_2$) [18]. Badania wykazały, że dodatek nanokrzemionki ma ogromny potencjał przyspieszenia reakcji pucolanowej. Daje to szansę, na zwiększenie potencjału stosowania betonów polimerowo-cementowych w budownictwie. Dostępna literatura wskazuje również na próby naprawy kompozytów cementowych, przez zastosowanie zapraw modyfikowanych polimerem [19] [20]. Kluczowa jest tutaj poprawa wydajności oraz jakości naprawy. Materiał zawierający w sobie

polimer pozwala na uzyskanie lepszych wartości parametru jakim jest odporność na rozciąganie, zamarzanie oraz rozmrażanie, czy podwyższone temperatury otoczenia. Charakteryzuje się również lepszą przyczepnością do podłoża, co doskonale sprawdza się w momencie napraw kompozytów cementowych.

Naukowcy nieprzerwanie analizują dostępne materiały i poszukują polimeru, który najkorzystniej wpływa na właściwości zaprawy cementowej [21]. W pracy [22] skupiono się na możliwościach wykorzystania wybranych surowców wtórnych do modyfikacji opracowanej zaprawy o wysokiej wytrzymałości na bazie polimero-cementu. Celem było osiągnięcie takich samych lub lepszych właściwości fizyko-mechanicznych uzyskanego materiału, przy maksymalnym poziomie zastąpienia cementu, surowcem wtórnym. Ze względu na wysoką zawartość SiO_2 w dwóch surowcach wtórnych, dobrano następujące materiały: popiół lotny wysokotemperaturowy i szkło sodowo-wapniowe z recyklingu, które zastąpiło cement w ilości 20% i 40%. Badania wskazują, że odpowiednie surowce wtórne mogą z powodzeniem stanowić spoiwo zastępcze, stosowane w ilości do 40%. W przypadku popiołu lotnego wytrzymałość na ściskanie po 28 dniach była wyższa o 10%, a w przypadku szkła szlifowanego o 12%, w porównaniu z tradycyjną zaprawą cementową. Praca wskazuje, że odpowiednie surowce wtórne są w stanie poprawić właściwości opracowanej zaprawy. Głównym rezultatem jest udoskonalenie podstawowych fizyko-mechanicznych właściwości, przy jednoczesnym uzyskaniu lepszej struktury kompozytu cementowego.

Warto również wspomnieć o wynikach badań zaprezentowanych w publikacji [23]. Autorzy opracowali technologię, która zapewnia gradientowy rozkład polimeru w zaprawie modyfikowanej polimerami. Celem było zminimalizowanie dodatku polimeru, bez utraty podstawowych właściwości. Zaprawę zmodyfikowano przy użyciu reagującego magnetycznie lateksu polimerowego i poddano działaniu pola magnetycznego podczas formowania. Napędzane siłą magnetyczną cząstki polimeru zostają skumulowane na powierzchni zaprawy, a w utwardzonej zaprawie powstaje gęsta warstwa ochronna, o znacznie większej zawartości polimeru, co zwiększa nieprzepuszczalność modyfikowanego materiału. Wyniki testu zginania wykazały, że gradientowy rozkład polimeru prowadzi do wyższej wytrzymałości na zginanie, gdy strona bogata w polimer została umieszczona po stronie rozciąganej, w momencie badania. **Potwierdza to wpływ oddziaływania modyfikatora polimerowego na właściwości kompozytu cementowego, oraz poprawę odporności materiału na rozciąganie.**

Oprócz modyfikacji zapraw cementowych, należy również wskazać na wyniki badań związane z modyfikacją kompozytów oraz materiałów wykonanych z betonów polimero-cementowych. Najczęściej wymieniane korzyści, jakie płyną z modyfikacji polimerem, to poprawa wytrzymałości na rozciąganie kompozytów [24]. Beton cementowy odznacza się wysoką wytrzymałością na ściskanie, natomiast przy niewielkiej odporności na rozciąganie. Przykładem jest publikacja [25], w której przedstawiono wpływ octanu etylenowo-winyloвого (EVA) na czas wiązania cementu przy różnych temperaturach otoczenia, oraz na wytrzymałość modyfikowanego betonu na ściskanie, zginanie i rozciąganie. Testy czasu wiązania przeprowadzono przy zróżnicowanej procentowej zawartości polimeru EVA, w różnych temperaturach (tj. 22, 35 i 50°C). W pracy ustalono, że czas wiązania mieszanki wydłużał się wraz ze wzrostem zawartości polimeru EVA. Potwierdzają to wcześniej analizowane publikacje. Ponadto do oceny wytrzymałości przygotowano próbki betonu

modyfikowanego polimerem, z różnymi ilościami procentami EVA w stosunku do ilości cementu, a następnie zbadano pod kątem wytrzymałości na ściskanie, zginanie i rozciąganie po dojrzeniu przez odpowiednio: 3, 7 i 28 dni. Wyniki wykazały, że wytrzymałość na ściskanie i zginanie betonu modyfikowanego polimerem EVA, ma tendencję do szybkiego wzrostu, przy zawartości polimeru EVA do 16%. Po przekroczeniu tej ilości procentowej, tempo wzrostu wytrzymałości staje się powolne. Jest to istotna informacja, która może przyczynić się do racjonalnego podejścia do procesu modyfikacji betonów cementowych. Z pewnością należy sprawdzić to na innych przykładach. Z kolei autorzy publikacji [26] w swoich badaniach, opracowali nowy kompozyt cementowy modyfikowany polimerami o ulepszonych właściwościach mechanicznych dzięki wprowadzeniu kwasu akrylowego (AA) i kwasu 2-akrylanomido-2-metylopropanosulfonowego (AMPS) do matrycy cementowej. Miało to na celu utworzenia silnej sieci polimerowo-cementowej poprzez polimeryzację in situ. Co ciekawe próbki z 3,0% kopolimeru AA-AMPS wykazały najwyższy wzrost, aż 81,1% wytrzymałości na zginanie, przy zachowaniu odpowiedniej wytrzymałości na ściskanie podczas standardowego kondycjonowania. **Silne interakcje chemiczne między łańcuchami kopolimerów Ca^{2+} i AA-AMPS, które mogą pomóc w tworzeniu przeplatanej sieci cementu polimerowego w matrycy cementowej, przyczyniły się do zwiększonej wytrzymałości na zginanie.** Przykład ten pokazuje, jak wady standardowych betonów cementowych, w tym duży rozmiar porów, pękanie oraz kruchość, można skutecznie zniwelować, poprzez wytworzenie sieci cementu polimerowego w matrycy cementowej, a następnie uzyskanie poprawy właściwości mechanicznych. Daje to szansę na opracowanie unikalnego materiału o wysokiej wytrzymałości na zginanie, poprzez polimeryzację monomerów w obrębie matrycy cementowej.

Modyfikacja polimerem prowadzi również do obniżenia gęstości kompozytu, z uwagi na niewielką gęstość właściwą modyfikatora. Autorzy pracy [27] poddali analizie parametry lekkiego polimero-beton. Lekki beton cementowy może zmniejszyć ciężar własny konstrukcji, pozwala również zaoszczędzić ilość materiału czy robociznę, jako główne koszty ponoszone w przemyśle [28]. Istotne dla budownictwa, było opracowanie lekkiego betonu cementowego o wysokiej wytrzymałości na ściskanie (>90 MPa) oraz wysokiej urobialności. W pracy [29] zbadano właściwości mechaniczne lekkiego polimero-betonu zawierającego cztery różne proporcje polimerów (10%, 12%, 14% i 16%) rozpatrywane w trzech różnych temperaturach (-15°C , $+5^{\circ}\text{C}$ i $+25^{\circ}\text{C}$), przy użyciu badań niszczących oraz nieniszczących. Wyniki badań niszczących pokazują, że zwiększenie udziału polimerów powodowało wzrost odporności na ściskanie, rozrywanie oraz pochłanianie energii. Wraz ze spadkiem temperatury z $+25^{\circ}\text{C}$ do -15°C , wytrzymałość na ściskanie, rozrywanie, rozciąganie, zginanie i moduł sprężystości wzrosły, podczas gdy zmniejszona została absorpcja energii czy ciągliwość. Wyniki tych badań przedstawiają istotne informacje, które pomagają zrozumieć zachowanie betonów modyfikowanych polimerem. Warto zaznaczyć, że w skomplikowanych budowlach inżynierskich, często wymagany jest kompozyt o wysokim stosunku wytrzymałości do masy. Łukowski w swojej pracy [30] sprawdził możliwość połączenia modyfikacji betonu polimerem oraz utylizacji sproszkowanego perlitu, który jest uciążliwym odpadem produkcyjnym. W ostatnim czasie niezwykle istotne jest poszukiwanie alternatywnych rozwiązań w budownictwie, celem minimalizacji kosztów oraz ochrony środowiska. Badania pokazały że dodatek sproszkowanego perlitu, pomaga zmniejszyć gęstość

kompozytu. Polimer oraz sproszkowany perlit sprawiają, że mikrostruktura takiego kompozytu jest bardziej jednorodna, w porównaniu z tradycyjnymi polimero-betonami. Przedstawione kompozyty uzyskały korzystne wyniki podczas analizy wytrzymałości na rozciąganie, co pozwala sądzić, że taki sposób modyfikacji materiałów, to słuszny kierunek w budownictwie i rozwoju technologii lekkich polimero-betonów. Inne próby modyfikacji kompozytów polimero-betonowych to między innymi dodatek lotnego popiołu wapiennego [31]. Zaobserwowano przy tym wzrost wytrzymałości kompozytu na rozciąganie, w porównaniu do tradycyjnych kompozytów cementowych. Praca [32] wskazuje, że połączenie popiołu lotnego oraz polimeru prowadzi do poprawy parametrów wytrzymałościowych kompozytów, maksimum osiągnięte jest przy zawartości 2% dodanego polimeru do mieszanki.

Modyfikacja betonów cementowych, odbywa się przy różnym ilościowym dozowaniu modyfikatorów polimerowych. Eksperymentalnie zbadano również wpływ sproszkowanej redyspergowalnej emulsji polimerowej na właściwości PCC (polimer-cement-concrete), wzmocnionego włóknem węglowym [33]. Analizie poddano wytrzymałości na ściskanie, odkształcenie i twardości próbek. Dynamiczna wytrzymałość na ściskanie początkowo wzrasta, a następnie spada wraz z zwiększeniem zawartości polimeru. Wytrzymałość próbki na ściskanie jest najwyższa, gdy stosunek polimerowo-cementowy wynosi 4%. Badania pokazują również, że zwiększenie stosunku polimerowo-cementowego zmniejsza liczbę porów w osnowie betonowej, oraz powoduje ich optymalny rozkład w kompozycie. Zespół badaczy z Turcji w swej publikacji [34] podjął próbę zastąpienia cementu w betonach polimerowych, poprzez wprowadzenie do ich składu żywicy jako środka wiążącego. W badaniach wykorzystano dziesięć różnych żywic, tworzących kompozyt z polimerem. Mieszanki tego typu mogą stanowić alternatywę dla tradycyjnych kompozytów, w których kluczową rolę spoiwa odgrywa cement portlandzki.

Podjęte są również próby określania zdolności do samonaprawy kompozytu cementowego, modyfikowanego polimerem [35]. Wyniki potwierdzają zdolność materiału modyfikowanego polimerem w postaci żywicy epoksydowej, do samoregeneracji oraz pozwalają na optymalizację składu kompozytu celem uzyskania jak najwyższej zdolności do samonaprawy. Interesujące zależności wykazali autorzy publikacji [36], gdzie zbadali proces starzenia się czystego cementu w stosunku do mieszaniny cementu z modyfikatorem polimerowym. W tym przypadku wykorzystano cement portlandzki klasy CEM I oraz polimer EVA i SB. Mieszanka cementowo-polimerowa charakteryzuje się niższym starzeniem od czystego cementu. Wynika z tego, że jest bardziej odporna m.in. na działanie wilgotnego powietrza. Cząstki polimeru mogą wytworzyć częściowy film polimerowy na ich strukturze, co zapobiega pogorszeniu właściwości spoiwa.

Nie bez znaczenia jest wpływ warunków środowiskowych [37] [38], czy temperatury otoczenia na właściwości kompozytów polimero-betonowych. W związku z tym do badań przygotowano próbki polimero-betonu oraz zwykłego betonu cementowego. Poddano je działaniu czterech roztworów chemicznych o pH wartości 2,5, 7,0, 12,5 oraz wodą morską w odstępach 1, 3, 6, 9 i 12 miesięcy. Żywicę epoksydową (w ilości 10% i 12%) oraz cement portlandzki zastosowano jako spoiwo w próbkach wykonanych do badań. Skaningowa mikroskopia elektronowa (SEM) została dodatkowo zastosowana do zbadania zmian w mikrostrukturach próbek poddanych rocznej ekspozycji. Kwaśny roztwór był najbardziej destrukcyjny dla betonu cementowego niż polimero-betonu. Jego oddziaływanie znacznie obniżyło

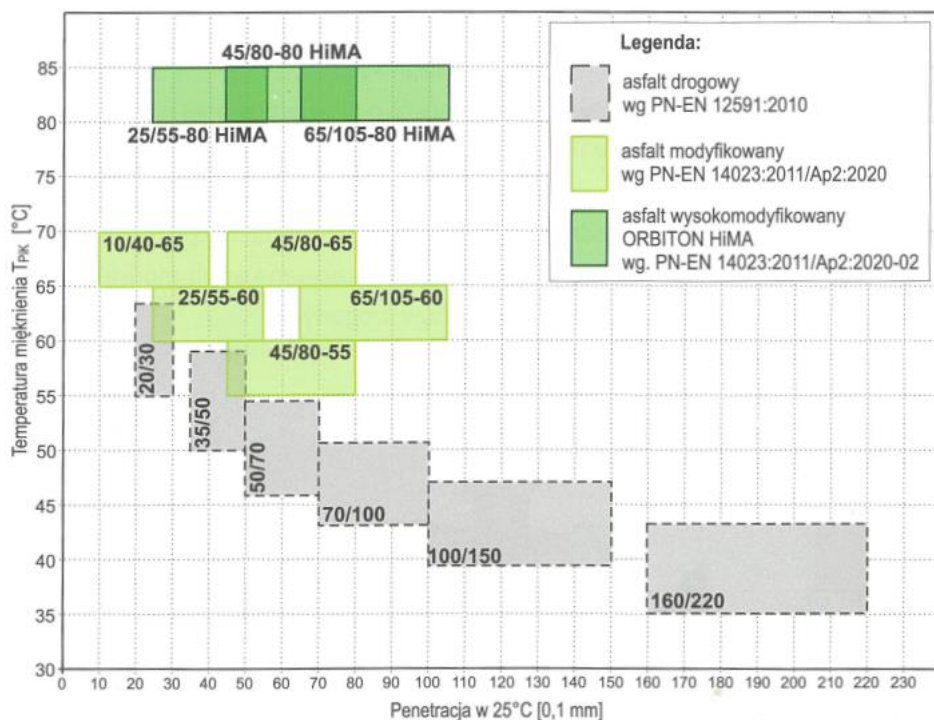
wytrzymałość na ściskanie betonu cementowego oraz kompozytu o niskiej zawartości żywicy epoksydowej. Spadek wytrzymałości to odpowiednio 38,7% i 40,1%. Roztwór alkaliczny miał prawie taki sam efekt jak roztwór kwaśny na próbkach betonu cementowego. Jednak należy zaznaczyć, że polimero-beton wykazał stosunkowo dobre parametry w warunkach alkalicznych, po roku ekspozycji. Beton polimerowy z wysoką zawartością żywicy epoksydowej wykazał najmniejszą redukcję wytrzymałości, spowodowaną oddziaływaniem wody morskiej. Kompozyt polimero-betonowy charakteryzuje się wyższą trwałością zmęczeniową, po kondycjonowaniu w różnym środowisku, w stosunku do tradycyjnych betonów cementowych.

Analizując powyższe, można twierdzić, że beton cementowy modyfikowany polimerem jest odpowiednim materiałem do konstrukcji poddawanych częstym obciążeniom, przy złożonych warunkach środowiskowych. W literaturze istnieją również próby modyfikacji kompozytów naturalnymi biopolimerami [39]. Alginian to naturalny hydrożel pozyskiwany ze ścian komórkowych brunatnic morskich. Poprawia wytrzymałość materiału oraz jest również stosowany w środkach utwardzających czy środkach zwiększających lepkość.

Tym samym można wskazać, jak skuteczna modyfikacja, może poprawić wiele cech powszechnie znanych kompozytów jakimi są betony cementowe. Wiązania hydrauliczne, wynikające z obecności cementu portlandzkiego, powstają również w mieszankach MCE. Istnieje szansa, na zaadaptowanie korzyści płynących z modyfikacji polimerami kompozytów cementowych, na rzecz mieszanki mineralno-cementowej z emulsją asfaltową. Skuteczna modyfikacja może przyczynić się do poprawy właściwości fizykomechanicznych mieszanki MCE.

3.2 Modyfikacja kompozytów mineralno-asfaltowych

Z uwagi na złożone wymagania, jakie powinny spełniać asfalty drogowe, podjęte zostały próby ich modyfikacji. Modyfikacja ma na celu zmianę podstawowych parametrów asfaltu oraz poprawę właściwości fizykomechanicznych mieszanki mineralno-asfaltowej. Omawiane parametry to m.in. łamliwość, temperatura mięknięcia czy penetracja. Znajduje to przełożenie w cechach użytkowych nawierzchni, oznacza zmianę odporności na koleinowanie, trwałości zmęczeniowej, oraz odporności na pękanie [40]. Na rysunku 3.3. przedstawiono asfalty, zestawione pod względem parametru jakim jest Penetracji oraz temperatura mięknięcia.

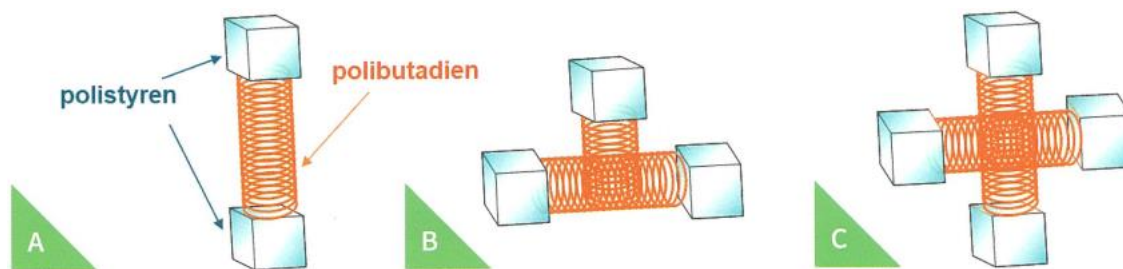


Rys. 3.3. Zestawienie asfaltów drogowych względem wskaźnika Penetracji oraz temperatury mięknięcia PiK [41]

Do modyfikacji asfaltów z powodzeniem wykorzystywane są głównie trzy grupy polimerów:

- elastomery,
- plastomery,
- kompozyty elastomerów i plastomerów.

Elastomery to tworzywa sztuczne, które mają właściwości elastyczne oraz sprężyste. Po zastosowaniu elastomerów w asfalcie, właściwości te są w pewnym stopniu przekazywane na lepiszcze. Są to niezwykle pożądane cechy, dlatego stale poszerza się zastosowanie elastomerów w budownictwie. Przykładem mogą być termoplastyczne elastomery SBS (Styren-Butadien-Styren) [40]. Elastomery występują w budownictwie pod postaciami proszków czy granulatu. Dzięki dostępnej technologii, możliwe jest produkowanie różnych wariantów SBS, między innymi liniowych lub wieloramiennych. Elastomery tego typu mają właściwości termoplastyczne. Najczęściej w modyfikacji asfaltu stosowany jest SBS typu liniowego. Liniowy typ SBS otrzymywany jest poprzez złączenie dwóch bloków polistyrenu łańcuchem polibutadienu. Typ radialny natomiast, otrzymywany jest przez połączenie np. czterech bloków polistyreny poprzez cztery łańcuchy polibutadienu. Graficznie przedstawiono to na rysunku 3.4.



Rys. 3.4. Formy budowy kopolimeru SBS: A) SBS o budowie liniowej, B) SBS o budowie rozgałęzionej, C) SBS o budowie gwiazdziej [41]

Modyfikacja asfaltu za pomocą SBS, polega na osiągnięciu takiego rozproszenia SBS w asfalcie, które pozwala na powstanie jednorodnej mieszaniny, a wewnątrz asfaltu powstaje fizyczna sieć SBS. Sam proces modyfikacji składa się z trzech faz. W I fazie następuje dozowanie odpowiedniej ilości elastomeru do asfaltu w temperaturze 180-190°C. Przy takiej temperaturze polimer zaczyna pęcznieć, ponieważ w głąb wnikają ciekłe fazy asfaltu. Tym samym modyfikator staje się coraz bardziej miękki. W II fazie zaczyna się rozpuszczanie SBS do pojedynczych molekuł. Podczas III fazy, po wyjścia z młyna ścinającego, otrzymana mieszanina przechowywana jest w podgrzewanych zbiornikach, gdzie następuje dojrzewanie produktu [42]. W gorącym asfalcie cząsteczki polimeru SBS pozostają niepołączone ze sobą. Dopiero spadek temperatury, powoduje stopniowe tworzenie się fizycznej, przestrzennej sieci SBS. Końcówki polistyrenowe łączą się ze sobą tworząc domeny polistyrenowe, które są węzłami wytwarzanej sieci, połączone łańcuchami polibutadienu. Opisany proces charakteryzuje się odwracalnym procesem sieciowania. Polibutadien nadaje sprężystość i ciągliwość. Polistyren poprawia i zwiększa odporność termiczną asfaltu. Mowa o lepkości czy zmianie temperatury mięknięcia [40] [43] [44].

Plastomery to kolejna grupa polimerów stosowanych w asfaltach. Ich zastosowania powoduje zwykle większą lepkość asfaltu. Należy zaznaczyć, że wraz ze zwiększeniem lepkości, nie uzyskuje się znacznego zwiększenia elastyczności w niskich temperaturach. Ich najważniejszą zaletą jest poprawa odporności nawierzchni na koleinowanie. Plastomery nie tworzą sieci wewnątrz struktury asfaltu, lecz rozpuszczają się w nim, co w efekcie tworzy układ rozproszony. Nie uzyskuje się tak silnych cech sprężystych, jak poprzez zastosowanie elastomerów [40].

Ostatnie grupa z wymienionych, to kompozyty elastomerów i plastomerów. Zachowują równocześnie część zalet elastomerów, czyli sprężystość, oraz zwiększenie lepkości, co wynika z cech plastomerów. Kompozyty tego typu są tańszymi rozwiązaniami, niż czyste elastomery.

W publikacji [45] dokonano przeglądu postępów i wyzwań w dziedzinie modyfikacji asfaltów polimerowych do budowy dróg, w ciągu ostatnich 40 lat. Popularne plastomery i elastomery termoplastyczne w modyfikacji asfaltu, zostały omówione pod kątem ich zalet i wad, m.in. polietylen (PE), polipropylen (PP), etylen-octan winylu (EVA), etylen-akrylan butylu (EBA), styren-butadien-styren (SBS), styren-izopren-styren (SIS) i styren-etylen/butylen-styren (SEBS). Należy zaznaczyć, że obecnym wyzwaniem jest perfekcyjne osiągnięcie wszystkich oczekiwanych właściwości jakie stawiane są asfaltom modyfikowanym,

w tym samym czasie. Omawiana praca przedstawia pewne kompromisowe zalecenia, między innymi znaczne ulepszenie właściwości przy akceptowalnym koszcie produkcji.

Radziszewski z zespołem w swojej pracy [46] dokonali oceny parametrów asfaltów, produkowanych przez dwóch największych polskich producentów. Ocena oparto na wynikach badań asfaltów modyfikowanych w zakresie standardowego testu temperatury mięknięcia oraz badań w reometrze dynamicznego ścinania (DSR) zgodnie z wymaganiami Strategic Highway Research Program (SHRP) oraz Multiple Stress Creep Recovery Test (MSCR). Wykazano, że w przypadku wysokich zakresów temperatury pracy nawierzchni drogowych w Polsce, produkowane lepiszcza bitumiczne z dużą rezerwą spełniają wymagania odporności na odkształcenia trwałe. Co jest niezwykle ważne z perspektywy użytkowników, wykonawców czy inwestorów. Z kolei autorzy pracy [47] przedstawiają wyniki badań asfaltów, w tym wg amerykańskich procedur MSCR, opisujących pełzanie asfaltu pod obciążeniem dynamicznym. Pozwala to prognozować możliwości wystąpienia uszkodzeń w warstwach bitumicznych, w wysokich temperaturach otoczenia oraz przy niskich i wysokich naprężeniach ścinających. Badania przeprowadzono dla asfaltu 35/50. Asfalt 35/50 modyfikowano woskiem syntetycznym pochodzącym z syntezy Fischera-Tropscha (F-T) w ilościach 1,5%, 2,5%, 3,0% i 4,0%. Ocenę wpływu wosku syntetycznego na podstawowe właściwości asfaltu, wzbogacono o ilościową analizę morfologii modyfikowanego asfaltu. Została ona wykonana za pomocą mikroskopu fluorescencyjnego.

Wyniki badań dostępne w pracy [48] pozwoliły na ocenę interakcji między kilkoma bazowymi lepiszczami asfaltowymi o penetracji (35/50, 50/70, 70/100, 160/220) oraz dwoma różnymi tworzywami sztucznymi z recyklingu (EVA i HDPE), które pełniły rolę modyfikatorów polimerowych. Po przeanalizowaniu wyników uzyskanych dla kilku asfaltów modyfikowanych, będących przedmiotem badań, w tym ogólnodostępnego asfaltu modyfikowanego, można śmiało twierdzić, że nowe PMB produkowane z asfaltem bazowym 70/100 i dodatkiem 5% każdego tworzywa sztucznego pochodzącego z recyklingu (HDPE lub EVA) pozwala uzyskać asfalt o bardzo dobrych parametrach, które są zbliżone do asfaltów modyfikowanych znanych na rynku. W rezultacie daje to nowe podejście do procesu produkcji asfaltów modyfikowanych. Jedną z interesujących prac [49], która ma na celu rozwój technologii, jest próba modyfikacji przy pomocy polimeru oraz okruchów gumy. W publikacji przedstawiono właściwości nowego rodzaju asfaltu modyfikowanego. Badania laboratoryjne koncentrowały się na charakterystyce właściwości lepiszcza 45/80-55 CR w porównaniu z bazowym lepiszczem 50/70 i konwencjonalnym asfaltem modyfikowanym polimerami 45/80-55. W oparciu o tradycyjne testy lepiszczy, takie jak penetracja, temperatura mięknięcia i temperatura łamliwości Fraassa, a także testy BBR (reometr belki zginanej) i DSR, zbadano właściwości reologiczne asfaltów. Na podstawie analizy wyników zaobserwowano poprawę właściwości lepkosprężystych asfaltów modyfikowanych polimerami i miałem gumowym. Badania właściwości i stabilności wykazały, że możliwe jest spełnienie standardowych wymagań dla asfaltu modyfikowanego polimerami, przez wytworzone lepiszcza z miałem gumowym.

Literatura wskazuje na modyfikację lepiszcza asfaltowego, oraz mieszanek mineralno-asfaltowych. Mazurek w publikacji [50] przedstawił wyniki badań modułu dynamicznego przeprowadzonych na betonie asfaltowym (AC16W). Obciążenie sinusoidalne przyłożono do próbek zgodnie z metodą DTC-CY. Czyste lepiszcza asfaltowe (o penetracji 35/50)

modyfikowano dwoma woskami syntetycznymi, pochodzącymi z reakcji Fischera-Tropscha, o różnych masach cząsteczkowych i temperaturach mięknięcia (twardy i bardziej miękki). Zjawisko relaksacji w zakresie zmian modułu zespolonego i kąta fazowego oceniano za pomocą zmodyfikowanego modelu Huet-Sayegh (2S2P1D). Oszacowane parametry modelu wskazały, że dodatek wosku syntetycznego o wysokiej (wosk twardy) i niskiej (wosk miękki) masie cząsteczkowej podniosły sztywność lepiszcza asfaltowego w stosunku do asfaltu referencyjnego 35/50. Sztywność lepiszcza przekłada się na zmianę parametrów mieszanki mineralno-asfaltowej. Istnieje zatem szansa, na wzrost odporności na deformacje trwałe podbudowy z mieszanki mineralno-cementowej z emulsją asfaltową, w której zastosowany zostanie modyfikator polimerowy.

Omawiając modyfikację betonu asfaltowego, należy oczywiście wskazać prace, które skupiają się na badaniu wpływu polimeru SBS, między innymi [51]. Publikacja wykazuje, że dodatek SBS pozytywnie wpływa na właściwości MMA, co przekłada się na wyższą trwałość zmęczeniową nawierzchni oraz całego układu konstrukcyjnego drogi. W rezultacie przekłada się to na oszczędności w długim okresie użytkowania. Możliwość modyfikacji, przez recykling materiałów z tworzywa PET została opisana w pracy naukowców z Kielc [52]. Istnieje szansa na utylizację materiałów z tworzyw sztucznych, które po granulacji, są ponownie wykorzystywane w modyfikacji asfaltów. Mieszanka mineralno-asfaltowa, wykonana z tak modyfikowanym lepiszczem, charakteryzuje się większą odpornością na koleinowanie, w porównaniu z tradycyjnymi asfaltami. Może być zatem stosowana na odcinkach dróg, które poddawane są dużym obciążeniom, co poprawi żywotność konstrukcji nawierzchni. Bardzo interesujące wydają się być alternatywne próby modyfikacji. Przykładem jest praca [53], która ma na celu ocenę potencjału wykorzystania oleju z nasion gumy (RSO) jako biologicznego środka odmładzającego do zimnego asfaltu pochodzącego w 100% z recyklingu RAP.

Analiza literatury wskazuje, jakie korzyści niesie modyfikacja polimerami, stosowana w asfaltach drogowych oraz mieszankach mineralno-asfaltowych. Mieszanka mineralno-cementowa z emulsją asfaltową, w której stosowane jest lepiszcze asfaltowe, również może wykazać poprawę właściwości na skutek dodatku modyfikatora polimerowego. Niezbędne wydaje się określenie oddziaływania polimeru, na właściwości fizykomechaniczne mieszanki mineralno-cementowej z emulsją asfaltową.

3.3 Próby „modyfikacji” mieszanek mineralno-cementowych z emulsją asfaltową

Analiza literatury krajowej i zagranicznej w zakresie mieszanek MCE wskazuje na modyfikacje właściwości MCE jedynie na poziomie składu mieszanek i jej podstawowych składników. Zmianie podlegają: ilości i rodzaj kruszywa, ilość i rodzaj destruktu asfaltowego lub betonowego, ilość i rodzaj spoiwa hydraulicznego oraz ilość emulsji asfaltowej.

Przykładem rozwoju technologii mieszanek MCE na przestrzeni lat jest publikacja [54], która przedstawia polskie doświadczenia z recyklingiem głębokim na zimno nawierzchni asfaltowych. Mieszanki wykonywano z zastosowaniem emulsji asfaltowej oraz cementu portlandzkiego. Początki stosowania technologii sięgają lat 90-tych XX-wieku. W tym okresie, liczne drogi w Polsce wymagały natychmiastowego wzmocnienia ze względu na ich znaczną degradację. Było to efektem wzrostu natężenia ruchu pojazdów ciężkich.

Wdrożenie technologii recyklingu na zimno miało stanowić szybkie rozwiązanie tego problemu. Pierwsze polskie wymagania i wytyczne, do produkcji oraz wbudowania materiału jakim jest mieszanka MCE, zostały opracowane w latach 90-tych XX wieku i opierały się na teście Marshalla [55] [56]. Po kilku latach stosowania wspomnianych wymagań, na powierzchniach eksploatowanych odcinków dróg, pojawiły się liczne spękania odbite. Spękania tego typu powstają z uwagi na przeszywnienie warstwy związanej spoiwem hydraulicznym i jej samoczynnego pęknięcia [57]. Przeprowadzone badania terenowe wykazały, że częstotliwość pęknięcia poprzecznego nie była równomierna na wszystkich ocenianych przekrojach. Należy zaznaczyć również, że tempo wzrostu liczby spękań miało tendencję spadkową. Jako główną przyczynę rozległych i często pojawiających się spękań, należy wskazać zbyt dużą ilość cementu portlandzkiego oraz niewystarczająca ilość emulsji asfaltowej w mieszance. Doprowadziło to do wykonywania bardzo sztywnych mieszanek, z przewagą wiązań hydraulicznych, które zachowywały się podobnie do mieszanek sztywnych – betonowych. Idea elastycznego podłoża z recyklingu na zimno, nie była wykorzystywana. Opisane doświadczenia zmotywowały polskich naukowców oraz zarządców dróg, do opracowania nowych wymagań. Przykładem tego jest dokument Katalog Typowych Konstrukcji Nawierzchni Podatnych i Półsztywnych (KTKNPIP 2014) [58], który został opublikowany w 2014 roku.

Nie tylko w Polsce, do przebudowy zdegradowanych konstrukcji nawierzchni, wykorzystuje się technologię recyklingu głębokiego na zimno. Jednym z przykładów jest Wielka Brytania oraz doświadczenia zebrane w publikacji [59]. W pracy poddano analizie przebudowę strategicznej drogi krajowej, przy wykorzystaniu recyklingu głębokiego na zimno. Włoskie doświadczenia, pozwoliły na wykonanie podbudowy z recyklingu, w trakcie przebudowy autostrady na południu kraju [60]. Do produkcji mieszanki wykorzystano 100% destruktu asfaltowego, emulsję asfaltową modyfikowaną polimerami oraz cement. Pokazuje to, jak szerokie możliwości w oszczędnościach czasowych oraz finansowych, daje technologia recyklingu głębokiego na zimno. W pracy [61] opisano opracowanie specyfikacji dla mieszanek pochodzących z recyklingu na zimno oraz stosowanie na terenie Irlandii. We współpracy z Irlandzkim Urzędem Dróg Krajowych wyznaczono odcinek o długości 2,5 km na drodze krajowej do przeprowadzenia próby recyklingu. Oceniono szereg opcji podbudowy z recyklingu i zaproponowano cztery, różne projekty mieszanek. Obejmowały one zróżnicowanie typu spoiwa (mieszanka z asfaltem spienionym lub emulsją asfaltową, z cementem lub bez), zmienną zawartość spoiwa i głębokość recyklingu, co odzwierciedla szeroki wachlarz opcji dostępnych dla inżynierów, którzy chcą promować recykling na zimno. Interesująca wydaje się również tematyka pracy [62]. W związku z rozwojem działalności handlowej w porcie Lengeh w południowym Iranie, konieczne było odnowienie i unowocześnienie istniejącego lotniska. Z uwagi na uszkodzenia, które wystąpiły na pasie startowym i w innych obszarach operacyjnych statków powietrznych, należało zwiększyć nośność istniejących nawierzchni. Ograniczone wymiary pasa startowego i innych obszarów operacyjnych na lotnisku (tj. pas startowy, droga kołowania) wymagały ich przedłużenia i poszerzenia. Zaplanowano pełny program recyklingu, w tym stabilizację podłoża oraz wzmocnienie podbudowy mieszanką z asfaltem spienionym. Aby uniknąć dodatkowego przeszywnienia warstwy, podbudowa powstała z optymalną zawartością cementu. Korzystanie

z wymienionych metod stabilizacji i recyklingu zaowocowały ochroną środowiska oraz oszczędność czasu budowy i zużycia nowych materiałów.

Badania wykonane w ramach pracy [63] przedstawiają praktyczne sugestie dotyczące poprawy właściwości mechanicznych mieszanki poddanej recyklingowi na zimno. Zawierają również uogólnienia dla bardziej efektywnego zastosowania, celem oszczędności energii i zasobów środowiska, czyli kluczowych założeń analizowanej technologii. Właściwości mechaniczne różnych typów mieszanek poddano analizie przez zastosowanie układu rozciągania pośredniego i testu modułu dynamicznego. Uzyskane wyniki wskazują, że zmienne kolejności mieszania składników, mają wpływ na właściwości mechaniczne mieszanek z recyklingu głębokiego na zimno. Lepsze parametry uzyskano w obecności destruktu asfaltowego, niż przy zwiększonym udziale kruszywa doziarniającego. Jest to jeden z dowód wykazujących słuszność stosowania materiałów pochodzących z rozbiórki zdegradowanych warstw nawierzchni. Innym podejściem do technologii recyklingu głębokiego na zimno są przedstawione w pracy [64] badania, które oceniają sposób projektowania mieszanek na zimno, uwzględniając przy tym różne metody zagęszczania podbudowy, oraz zmienną zawartość emulsji asfaltowej i cementu. Emulsję dozowano w ilości od 2% do 4%, z krokiem 1%, natomiast cement w ilości od 0% do 2% również przy zachowaniu kroku o wartości 1%. Przedstawioną w pracy analizę wykonano dla różnych temperatur kondycjonowania oraz czasu, aby zaproponować szybsze i bardziej praktyczne metody projektowania mieszanek w laboratorium. Przeprowadzone badania wykazały, że próbki zagęszczane przez ubijak Marshalla zapewniają podobne wyniki przy zmianie zawartości emulsji asfaltowej i cementu w ich składzie, podczas gdy zagęszczanie metodą Proctora było w stanie lepiej uchwycić wpływ tych materiałów na parametry mieszanki.

Jednym z problemów, z jakim mierzą się projektanci, czy wykonawcy podbudów drogowych wykonywanych z mieszanek MCE, jest zjawisko przeszywnienia nawierzchni. Rezultatem wykonania zbyt sztywnej podbudowy, jest pojawienie się spękań odbitych. Spękania te są zainicjowane w warstwie podbudowy, przechodząc przez wszystkie warstwy nawierzchni, aż do warstwy ścieralnej. Przyczyniają się do szybkiej degradacji konstrukcji nawierzchni. Równocześnie są bardzo skomplikowane w utrzymaniu czy naprawie. Istotne z punktu widzenia projektantów, jak i wykonawców, jest rozpoznanie przyczyn tego zjawiska oraz próba wykluczenia. W pracy [65] skoncentrowano się na standardowych mieszankach z recyklingu na zimno, a więc mieszankach, których szkielet kruszywowy jest w całości tworzony przez destruktu asfaltowy i które zawierają lepiszcze asfaltowe (emulsja asfaltowa lub asfalt spieniony), oraz kombinację jednego z tych lepiszczy i spoiwo hydrauliczne (cement). Moduł sztywności oraz wytrzymałość na pośrednie rozciąganie były badane z uwzględnieniem wielu kryteriów, m.in. wpływ różnej zawartości lepiszczy bitumicznych/hydraulicznych na wskazane parametry. Wszystko to, by jak najlepiej poznać charakterystykę mieszanki MCE i zminimalizować ryzyko wystąpienia spękań odbitych. Zawartość cementu bezpośrednio determinuje właściwości fizyko-mechaniczne mieszanki MCE. Obecność cementu w mieszance MCE, ma większe oddziaływanie na właściwości, niż emulsja asfaltowa. Autorzy prac [66] [67] podjęli się oceny wpływu udziału procentowego cementu na odporność na pękanie podbudowy z recyklingu zawierającej standardowo: 50% destruktu asfaltowego (RAP) i 50% kruszywa doziarniającego. Do mieszanek dodano pięć proporcji cementu, w ilości: 1%, 2%, 3%, 4%, oraz 5%. Testy zginania półkolistego (SCB)

zostały wykorzystane do oceny odporności na pękanie mieszanek, z równoczesnym wykorzystaniem szybkości uwalniania energii odkształcenia (J_c). Wartości wskaźnika FI w zakresie od 1,32 do 4,74, wykazały, że **wysoki procent dodanego cementu (4 i 5%) przyczynia się do tego, że próbki zachowują się jak mieszanki kruche**, co nie jest korzystnym rozwiązaniem w momencie wystąpienia odkształcenia maksymalnego, a w rezultacie pęknięcia. Dla porównania, w publikacji [68] przedstawiono wybrane zagadnienia związane z problemem pękania w mieszankach MCE. Skupiono się na ograniczeniu zjawiska pękania w podbudowie z recyklingu, przy użyciu innowacyjnego spoiwa cementowego z materiałami z recyklingu. Innowacyjne spoiwo cementowe zostało wykonane w oparciu o produkty uboczne z cementowni. W pracy przeprowadzono badania w zakresie sztywności, trwałości zmęczeniowej, pękania, analizy wytrzymałościowej i skurczowej mieszanek mineralno-cementowych. Ustalono, że możliwe jest zmniejszenie sztywności oraz redukcja wystąpienia pękania mieszanek MCE. Zastosowanie innowacyjnych spoiw hydraulicznych wpłynie pozytywnie również na trwałość nawierzchni drogowych. Mając na uwadze różnicowanie materiałów stosowanych w drogownictwie, Szydłowski w pracy [57] podjął próbę uszeregowania mieszanek MCE pod względem odporności na pękanie, w porównaniu z innymi materiałami do wykonywania podbudów drogowych. Dodatkowo sprawdzono, czy zmiana proporcji środków wiążących stosowanych do mieszanki MCE wpływa na odporność podbudowy na pękanie i propagację spękań. **Na podstawie przeprowadzonych badań i uzyskanych wyników udowodniono, że podbudowa z mieszanki MCE jest bardziej odporna na pękanie niż podbudowa z kruszywa stabilizowanego cementem** oraz mniej odporna na pękanie niż podbudowa z betonu asfaltowego czy betonu cementowego. Zastosowanie modyfikatora polimerowego, w mieszance MCE, może przyczynić się do zwiększenia odporności na pękanie, oraz zbliżyć jej właściwości do mieszanek MMA. Ocena procesu pękania warstw podbudowy z mieszanek MCE powinna przyczynić się do bardziej świadomego projektowania ich składu, co w konsekwencji pozwoli na budowanie trwalszych nawierzchni drogowych.

Istotnym parametrem, który charakteryzuje mieszanki wykonane w technologii recyklingu głębokiego na zimno jest ich moduł sztywności. Analiza właściwości podbudowy, bardzo często rozpoczynam się właśnie od tej wielkości opisującej mieszankę. Tematyka modułu sztywności jest poruszana przez naukowców w swoich rozważaniach. Przykładem może być praca Radziszewskiego wraz z zespołem [69], w której zbadano recyklowane mieszanki MCE z zawartością cementu równą 1%. Mieszanki zróżnicowane pod względem zawartości destruktu z nawierzchni asfaltowej (RAP) oraz ilości i rodzaju emulsji asfaltowych. Badania wykazała, że mieszanki z 1% cementu w składzie, są mniej kruche oraz stanowią trwałą warstwę podbudowy pomocniczej w konstrukcji nawierzchni. Dołżycki w ramach pracy [70] przedstawił ocenę wpływu ilości cementu portlandzkiego oraz emulsji asfaltowej na moduł sztywności mieszanki MCE. Zespół badaczy Politechniki Gdańskiej, poddał analizie szereg cech mieszanki MCE w publikacji [71]. Wskazano na wpływ emulsji oraz cementu na cechy mieszanki MCE. Wykazano istotny wpływ asfaltu pochodzącego z emulsji na trwałość zmęczeniową mieszanki oraz moduł sztywności. Udowodniono, że kluczowy jest odpowiedni dobór środków wiążących na charakter pracy recyklowanej mieszanki. Zasadne zatem wydaje się poszukiwanie optymalnej ilości środków wiążących w mieszance

MCE. Zastosowanie modyfikatora polimerowego, może pozwolić na redukcję ilości tradycyjnych spoiw w mieszance MCE.

Dołżycki w pracy [72] przedstawia ocenę długookresowego zachowania się mieszanek MCE. W artykule zbadano wpływ kombinacji dwóch środków wiążących i ich różnej ilości, na wzrost wytrzymałości i modułu sztywności mieszanek mineralno-cementowo-emulsyjnych wraz z czasem kondycjonowania. Dostępna literatura i badania laboratoryjne wykazały, że w odniesieniu do krótkoterminowych zmian modułu i kąta fazowego, mieszanki mineralno-cementowo-emulsyjne wykazują podobne zachowanie do innych materiałów związanych cementem, takich jak beton cementowy czy mieszanki związane cementem. W przypadku długookresowego zachowania stwierdzono również podobieństwa do materiałów związanych cementem: zaobserwowano wzrost modułów i spadek kątów fazowych dla dłuższych czasów kondycjonowania. Ten rodzaj zachowania pokazuje, że wiązania hydrauliczne wpływają zarówno na właściwości mechaniczne, jak i reologiczne mieszanek mineralno-cementowo-emulsyjnych. Warto sprawdzić, czy jest szansa na poprawę kohezji recyklowanych mieszanek, przy jednoczesnym zbliżeniu charakteru pacy do tego jakim charakteryzuje się beton asfaltowy.

Kolejnym istotnym parametrem, który charakteryzuje warstwy konstrukcyjne nawierzchni, jest trwałość zmęczeniowa układu. Niezaprzeczalnie wpływ mają na to użyte do budowy materiały oraz ich charakterystyka. Niejednokrotnie tematyka trwałości układów drogowych, zawierających w swoim składzie podbudowy wykonane w technologii recyklingu głębokiego na zimno, była poruszana przez badaczy. W pracy [73] podjęto analizę wpływu aktywnych wypełniaczy na właściwości reologiczne i wynikającą z nich trwałość zmęczeniową mieszanek MCE. Wyniki pokazują, że parametry reologiczne i odporność na uszkodzenia zmęczeniowe zależą nie tylko od ilości lepiszcza, ale także od rodzaju i składu chemicznego lepiszcza. W podobnym układzie obciążenia testowano mieszanki w publikacji [74]. Głównym celem tego badania było zbadanie charakterystyk zmęczeniowych mieszanek MCE. Określono i omówiono charakterystyki zniszczenia i trwałość zmęczeniową mieszanek MCE w trakcie eksploatacji. Szydłowski w swojej publikacji [75] przedstawił właściwości zmęczeniowe mieszanek recyklowanych na zimno dla ośmiu kombinacji spoiw (cement i emulsja asfaltowa). Mieszanki wykonane w technologii recyklingu głębokiego na zimno, poddano ocenie w teście pośredniego zmęczenia na rozciąganie (IT-FT) w temperaturze 20°C. Jako funkcja naprężenia poziomego na trwałość zmęczeniową silnie wpływa kombinacja środków wiążących. We wszystkich analizowanych przypadkach, wpływ środka wiążącego na właściwości podbudowy, jest bardziej istotny w przypadku kombinacji z niższymi całkowitymi ilościami dwóch środków (cement oraz lepiszcze).

Uwzględniając powyższe, czyli odporność na pękanie mieszanek pochodzących z recyklingu, trwałość zmęczeniową czy moduł sztywności, zasadnym jest poszukiwanie optymalizacja składu spoiwa hydraulicznego w mieszance. To właśnie spoiwo najistotniej wpływa na charakter pracy podbudowy drogowej, wykonanej w technologii recyklingu głębokiego na zimno. Przykładem takiego rozwiązania jest praca [76]. Analizie poddano wpływ różnych spoiw hydraulicznych na podstawowe właściwości mieszanki z recyklingu głębokiego na zimno z emulsją asfaltową. Zastosowano cement portlandzki oznaczony jako CEM I 32,5, wapno oraz mieszanki obu wspomnianych spoiw. W celu oceny wpływu środków wiążących, wykonano następujące testy: Ocena wytrzymałości na pośrednie rozciąganie

ITS_{DRY}, moduł sztywności S_m w określonych temperaturach 0 °C, 10 °C i 20 °C, oraz odporność na działanie wody i mrozoodporność mieszanek pochodzących z recyklingu. Zaobserwowano korzystny wpływ niewielkiej ilości wapna w mieszankach spoiw na odporność na działanie wody i mrozoodporność podbudowy z recyklingu. Autorzy pracy [77] dokonali oceny trwałych odkształceń mieszanek recyklowanych wykonanych z asfaltu spienionego (MCAS) oraz emulsji asfaltowej (MCE). W zasadniczej części badań i analiz skupiono się na określeniu składu procentowego trójskładnikowego spoiwa, które bezpośrednio wpływa na parametry reologiczne mieszanek z recyklingu oraz innych wybranych cech. W skład spoiwa hydraulicznego wchodziły cement, wapno hydratyzowane oraz pyły z instalacji odciążu pyłu cementowego. W pracy uwzględniono również efekt uziarnienia recyklowanej mieszanki. W efekcie wykazano, że wpływ spoiwa hydraulicznego w różny sposób oddziałuje na trwałe odkształcenie recyklowanej mieszanki, w zależności od sposobów implementacji lepiszcza bitumicznego. Przy pomocy klasyfikacji sieci neuronowej wykazano obecność 4 grup mieszanin o różnych właściwościach. Na podstawie tych informacji wybrano zestaw najbardziej rekomendowanych rozwiązań z punktu widzenia odporności na odkształcenia trwałe, małej wrażliwości na poziom obciążenia przy średniej sztywności. Najlepszym reprezentatywnym wśród nich był układ z 20% wapna hydratyzowanego, mniej niż 40% pyłów CBPD i 40 ÷ 60% cementu.

Oprócz modyfikacji składu samego spoiwa hydraulicznego, podejmowane są próby modyfikacji składu recyklowanych mieszanek na zimno. Próby mają na celu optymalizację składu recyklowanej podbudowy, przy zachowaniu należytych parametrów. Przykładami takiej modyfikacji jest wprowadzanie miazgi gumowej, do składu mieszanki [78] [79]. Pomysł wprowadzenia okruszków gumowych do mieszanek na zimno powstał w oparciu o koncepcję maksymalizacji waloryzacji materiałów pochodzących z recyklingu wraz z osiągnięciem wysokiej trwałości. W projekcie badawczym [80] dwie różne gradacje okruszków gumy, przetworzono tradycyjną metodą sortowania. Zostały one wykorzystane do produkcji mieszanki z recyklingu na zimno z emulsją asfaltową i cementem. Wyniki pokazują, że gradacja okruszków gumy korzystnie wpływa na zagęszczenie i właściwości mechaniczne mieszanki pochodzącej z recyklingu głębokiego na zimno. Praca [81] również miała na celu analizę wpływu okruszków gumy zawartych w mieszance MCE. Okruszki gumowe wraz z asfaltem, cementem i drobnymi frakcjami mieszanki tworzą sprężystą masę uszczelniającą zdolną do nadawania znacznej odporności na zmęczenie wykonanej podbudowy. Z kolei badania zawarte w pracy [82] obejmują zastosowanie miazgi gumowej w mieszance MCE zawierającej 100% destruktu asfaltowego, poddanej recyklingowi na zimno z emulsją asfaltową i cementem. Przyjęto dwa różne rodzaje miazgi gumowej: jeden pochodzący z produkcji w temperaturze otoczenia, a drugi wyprodukowany w procesie kriogenicznym. Cel tego projektu badawczego polegał na analizie i ocenie różnych właściwości fizycznych i mechanicznych wykonanych mieszanek.

Doświadczenia związane z modyfikacją kompozytów budowlanych, skłoniły badaczy do użycia polimerów w recyklowanych mieszankach na zimno. Korzyści płynące z zastosowania polimerów w kompozytach budowlanych są zasadne. W pracy [83] przedstawiono wyniki badań prowadzonych nad optymalizacją składu wodnej dyspersji żywicy epoksydowej do modyfikacji mieszanek z destruktu asfaltowego, wykonanych w technologii recyklingu głębokiego na zimno. Powstała wodna dyspersja łączy się z emulsją asfaltową

i może być łatwo aplikowana w czasie przygotowywania mieszanek na zimno. Taka modyfikacja znacznie poprawia niezawodność oraz trwałości układu drogowego.

Analiza literatury wykazała pojedyncze modyfikacje wykraczające poza modyfikacje składu mieszanki MCE. Przykładem może być rezultat wyników badań Bańkowskiego i Kukielki [84] [85]. W pracach przedstawiono eksperymentalne badania odkształcenia belek wykonanych z zaprawy cementowej i asfaltowo-cementowej z dodatkiem proszku gumowego 25÷40% w stosunku do masy spoiw. Testy zginania 4-punktowego (4-PB) przeprowadzono na serii próbek po 28 dniach kondycjonowania. Badania przeprowadzono w różnych temperaturach tj. 5°C, 23°C i 50°C. Otrzymane wyniki eksperymentalne prowadzą do ogólnego wniosku, że dodatek proszku gumowego do różnych zapraw powoduje zwiększenie odkształcalności od 2 do 3 razy w stosunku do zaprawy z czystego cementu. Ponadto można stwierdzić, że materiały kompozytowe takie jak beton asfaltowo-cementowy (ACC), mieszanki MCE z dodatkiem proszku gumowego są bardziej elastyczne w porównaniu z czystym betonem cementowym.

W dostępnej literaturze istnieją próby modyfikacji mieszanki związanej spoiwem CBGM, przy pomocy redyspergowalnego proszku polimerowego RPP. W pracy [86] przedstawiono wyniki badań właściwości fizykomechanicznych oraz odporności na pękanie mieszanek związanych hydraulicznie, modyfikowanych polimerami (CBGM). Zastosowanym w badaniach modyfikatorem był redyspergowalny proszek polimerowy (RPP) na bazie kopolimer octanu winylu i etylenu (EVA), otrzymany przez suszenie rozpyłowe. Wyniki badań pokazują, że proszek polimerowy pozytywnie wpływa na właściwości mechaniczne mieszanek CBGM poprawiając kohezję przy zachowaniu odpowiedniej sztywności. Korzyścią płynącą z zastosowania proszku polimerowego jest również wzrost odporność na pękanie. Jest to cechą pożądaną z punktu widzenia trwałości nawierzchni, a w szczególności warstwy podbudowy.

Buczyński w swojej publikacji [87] zbadał wpływ redyspergowalnego proszku polimerowego (RPP) na właściwości fizyczne oraz właściwości mechaniczne mieszanki poddanej recyklingowi na zimno z asfaltem spienionym (MCAS). Jest to bliźniacza technologia do mieszanki MCE, która różni się sposobem dozowania lepiszcza asfaltowego (asfalt spieniony). W badaniach zastosowano cztery rodzaje RPP o zróżnicowanej bazie chemicznej. W pracy ustalono, że RPP poprawiło urabialność mieszaniny MCAS. Powoduje to zmniejszoną liczbę cykli zagęszczania i niższą energię potrzebną do uzyskania zawartości porów powietrznych jak w mieszance referencyjnej. Ponadto RPP jako modyfikator wyraźnie zwiększył spójność i wytrzymałość na pośrednie rozciąganie ITS_{DRY} mieszanki MCAS o około 40–70%, w zależności od zastosowanego rodzaju RPP. Te ustalenia są szczególnie ważne w przypadku mieszanin MCAS przeznaczony do podbudów drogowych. Przedstawione badania potwierdziły poprawę parametrów mieszanek MCAS po modyfikacji z użyciem RPP, niezależnie od rodzaju zastosowanego proszku. Zasadne zatem wydaje się rozpoznanie mieszanek MCE z modyfikatorem polimerowym. W literaturze brak jest przykładów mieszanek mineralno-cementowych z emulsją asfaltową, modyfikowanych przy pomocy redyspergowalnych proszków polimerowych. Poprzez wykazanie pożądaných właściwości, technologia ta może zostać z powodzeniem wdrożona przy przebudowie zdegradowanych nawierzchni drogowych w Polsce, jak i na świecie. Istotne jest rozpoznanie

właściwości fizykomechanicznych wspomnianych mieszanek. Jak połączenie cementu, polimeru oraz emulsji asfaltowej, wpłynie na właściwości podbudowy drogowej z mieszanki MCE.

3.4 Podsumowanie

Analiza dostępnych publikacji związanych z tematyką mieszanek MCE, wskazuje na dużą ilość prób dotychczas podjętych, dla poprawy parametrów recyklowanych mieszanek. Z uwagi na złożoność charakteru pracy podbudowy drogowej, analizowana jest proporcja materiałów wiążących w mieszance. Badania wskazują, że konieczne jest poszukiwanie optymalnej ilości cementu oraz emulsji asfaltowej w mieszance MCE. Z uwagi występowanie naprężeń rozciągających w warstwie podbudowy, niezbędne jest ograniczenie sztywności mieszanki MCE, na rzecz większej elastyczności, możliwość wystąpienia większego odkształcenia do momentu pęknięcia. Poruszając się po polskich drogach, można spotkać odcinki dróg, o regularnych, poprzecznych pęknięciach. Przykładem jest odcinek drogi przedstawiony na rysunku 3.5.



Rys. 3.5. Spękanie odbite, zainicjowane w warstwie podbudowy drogowej – powiat tomaszowski, województwo łódzkie

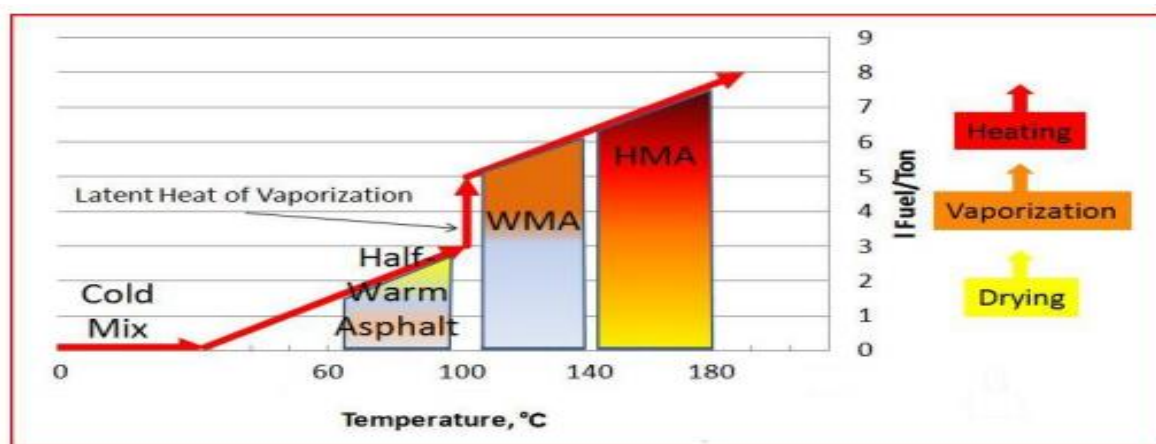
Przedstawiony na zdjęciu odcinek drogi, jest jednym z wielu, gdzie wykonawcy wbrew sztuce budowlanej, zastosowali zbyt dużą ilość spoiwa hydraulicznego, co doprowadziło do zjawiska przesztynienia podbudowy. W takim przypadku, nie da się uniknąć wystąpienia spękań odbitych, które inicjują w warstwie podbudowy i propagują aż do warstwy ścieralnej. Dokładnie zjawisko pokazano na odwiercie z odcinka drogi, rysunek 3.6.



Rys. 3.6. Spękania odbite w podbudowie z mieszanki MCE

Analiza procesu modyfikacji polimerami, daje możliwość rozwoju oraz poprawy parametrów materiałów budowlanych. Literatura wskazuje na szereg korzyści, jakie daje modyfikacja składu kompozytów. Poprawa wytrzymałości na zginanie, obserwowana w betonach cementowych, czy odporność na działanie czynników środowiskowych zapraw i betonów, jest niezwykle pożądanym zjawiskiem. W tym miejscu należy wspomnieć, że w podbudowie drogowej, z każdym przejazdem pojazdu, dochodzi do zjawiska rozciągania warstwy. Wykonana warstwa związana, z użyciem spoiwa powinna mieć należytą trwałość. Często, zbyt duża zawartość tradycyjnego spoiwa hydraulicznego, w postaci czystego cementu portlandzkiego, nie daje efektu odpowiedniej podatności warstwy. Dochodzi wtedy do wystąpienia spękań. W dotychczasowych badaniach brak jest publikacji, która poddaje analizie wpływ modyfikatora polimerowego na właściwości recyklowanej mieszanki na zimno z emulsją asfaltową.

Obecnie należy dążyć do minimalizacji lub wykluczenia tradycyjnych spoiw, czy lepiszczy, produkowanych z nieodnawialnych źródeł surowców. Oprócz omawianych działań optymalizacji składu mieszanek, znaczenia mają aspekty ekologiczne oraz ekonomiczne w momencie budowy oraz przebudowy odcinków drogowych [88]. Wykonywanie podbudowy w technologii recyklingu głębokiego na zimno, wyklucza konieczność podgrzewania składników. Proces odbywa się w temperaturze otoczenia. Powszechnie produkowane mieszanki mineralno-asfaltowe wymagają zużycia dużej ilości paliw, które są potrzebne do wysuszenia i podgrzania składników. Wraz z zużyciem paliw, emitowane są szkodliwe gazy do środowiska. Graficzny udział zasobów paliwowych, potrzebnych do wytworzenia jednej tony mieszanki, przedstawiono na rysunku 3.7.



Rys. 3.7. Klasyfikacja mieszanek z uwagi na temperaturę produkcji [89]

W ostatnich latach producenci maszyn drogowych, które przeznaczone są do wykonywania podbudowy w technologii recyklingu głębokiego na zimno, wyposażają swe urządzenia w dozatory do modyfikatorów. Przykładem takiego urządzenia może być samojezdny recykler, przedstawiony na rysunku 3.8. Recykler wyposażony w zbiornik na modyfikator tzw. „S-Pack”, pozwala na bezpośrednie dozowanie modyfikatora, wprost do komory mieszającej. Działania producentów maszyn również potwierdzają znacznie oraz konieczność wdrożenia modyfikacji do sieci drogowej. Należy podjąć działania, które określą wpływ modyfikatora polimerowego na właściwości fizyczne i mechaniczne recyklowanych mieszanek MCE.



Rys. 3.8. Recykler z wbudowanym zbiornikiem na modyfikator

Mając na uwadze korzystne wyniki badań kompozytów z modyfikatorami polimerowymi, oraz sygnały płynące od producentów maszyn, istnieje konieczność poszukiwania nowych rozwiązań, związanych z modyfikacją stosowaną w mieszankach MCE. Mowa tutaj o środku wiążącym, który zapewni trwałość i szczepność warstwy. Z drugiej zaś strony

pozwole zwiększyć wytrzymałość na rozciąganie, czy przyczyni się do poprawy odporności na pękanie mieszanki MCE. Alternatywą może być modyfikacja składu spoiwa modyfikatorami polimerowymi. Doskonale spisują się w zaprawach czy betonach cementowych. Literatura potwierdza również słuszność modyfikacji kompozytów asfaltowych. Należy sprawdzić, czy istnieje szansa przeniesienia pożądaných właściwości kompozytów mineralno-asfaltowych do mieszanek wykonywanych w technologii recyklingu głębokiego na zimno z emulsją asfaltową. Przy odpowiednim doborze składników, można wykluczyć, lub zminimalizować niekorzystne zjawisko spękań odbitych, powstających w warstwie przesywnionej podbudowy drogowej.

4. Plan eksperymentu oraz plan badań

Planowanie eksperymentu to zadanie, które wymaga poświęcenia wiele uwagi. Badanie metodą „po jednej zmiennej” potrafi znacząco wykorzystać dostępny czas oraz finanse [90] [91]. Najważniejszym celem planowania eksperymentu jest jednak efektywne uzyskanie odpowiedzi na zadane pytanie. Zatem niezwykle istotne w planowaniu badań jest odpowiednio dobrany plan eksperymentu. Świadome podejście do planowania, jeszcze przed rozpoczęciem badań pozwala na oszczędności czasu oraz finansów.

4.1 Plan eksperymentu

Analizę wpływu modyfikatora, w postaci redyspergowalnego proszku polimerowego, na właściwości fizykomechaniczne mieszanki MCE, wykonano z wykorzystaniem planu frakcyjnego trójwartościowego Boxa-Behnkena. Przyjęty plan należy do grupy planów eksperymentu, gdzie zmienne niezależne występują na trzech poziomach: -1,0; 0,0; +1,0 [92]. Oznacza to, że środki wiążące do mieszanki MCE dozowane były w trzech wartościach: minimum (-1,0), maksimum (+1,0) oraz średniej (0,0).

Plan eksperymentu zakładał sterowanie następującymi wielkościami wejściowymi:

- zawartością cementu portlandzkiego (CEM),
- zawartością emulsji asfaltowej (EMU),
- zawartością modyfikatora w postaci redyspergowalnego proszku polimerowego (RPP).

Zgodnie z założeniami przyjętego planu, wszystkie czynniki posiadały trzy wartości procentowe. Cement oraz redyspergowalny proszek polimerowy dozowane były w ilości od 0,50% do 3,50% z krokiem 1,5%. Emulsja asfaltowa dozowana była w ilości od 0,0% do 5,0% z krokiem 2,5%. Co przekłada się na obecność w mieszance MCE czystego asfaltu od 1,5% do 3,0%. Wykonanie mieszanki MCE z brakiem emulsji asfaltowej (krok 0,0%), wynika z konieczności zbadania, czy istnieje szansa na zastąpienie lub wykluczenie z mieszanki MCE lepiszcza asfaltowego. W tabelicy 4.1 przedstawiono przyjętą dziedzinę eksperymentu.

Tablica 4.1. Dziedzina eksperymentu dla oceny wpływu redyspergowalnego proszku polimerowego na właściwości mieszanki MCE

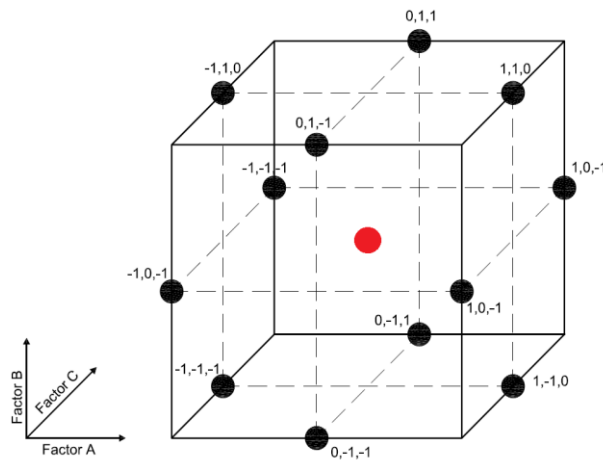
	MIN [%]	MAX [%]	ŚRED. [%]
Cement (CEM)	0,50	3,50	2,00
Modyfikator polimerowy (RPP)	0,50	3,50	2,00
Emulsja Asfaltowa (EMU)	0,00	5,00	2,50

Wartości zaprezentowane w tabelicy 4.1, zostały przyjęte po uwzględnieniu Polskich wytycznych [93], które zawierają zalecaną zawartość środków wiążących w mieszance MCE. Przyjęta dziedzina eksperymentu pozwoliła na opisanie wyników przy pomocy wielomianu stopnia drugiego. Zastosowany wielomian stopnia drugiego w planie eksperymentu opisany jest za pomocą wzoru (4.1):

$$y = b_0 + \sum_{i=1}^k b_i \cdot x_i + \sum_{i=1}^{k-1} \sum_{j=i+1}^k b_{ij} \cdot x_i \cdot x_j + \sum_{i=1}^k b_{ii} \cdot x_i^2 \quad (4.1)$$

gdzie: k - liczba zmiennych niezależnych, b_{ij} - współczynniki eksperymentalne, y - zmienna zależna (mierzona)

Warto zaznaczyć, że zaletą tego typu planu eksperymentu jest wykluczenie występowania jednocześnie wszystkich wartości ekstremalnych, co jest istotne w sytuacji wystąpienia skrajnych wartości stężeń składników. Wszystkie zmienne wchodzące w plan eksperymentu, leżą na powierzchni kuli o promieniu $\sqrt{2}$. Oznacza to, że wartość wariancji zależy tylko od odległości od punktu centralnego, a nie jego lokalizacji w planie. Plan Boxa-Behnkena umożliwia redukcję zmiennych w stosunku do pełnego planu czynnیکowego jakim jest plan typu 3^3 , nie rezygnując przy tym z członów interakcji. Dzięki temu istnieje szansa na redukcję pełnego planu czynnیکowego z 27 do jedynie niezbędnych 15 kombinacji. Szczegółowy plan eksperymentu, jaki został przyjęty do realizacji przyjętego planu badań, przedstawiono w tabelicy 4.2, natomiast graficzny rozkład punktów, w ramach dziedziny, przedstawia rysunek 4.1.



Rys. 4.1. Dziedzina eksperymentu wg planu eksperymentu Box-Behnken [94]

Tablica 4.2. Plan eksperymentu dla oceny wpływu redyspersyjnego proszku polimerowego na właściwości mieszanki MCE

Kod Mieszanki MCEP	CEM[%]	RPP[%]	EMU [%]
0,5C-2P-0E	0,50	2,00	0,00
3,5C-2P-0E	3,50	2,00	0,00
0,5C-2P-5E	0,50	2,00	5,00
3,5C-2P-2,5E	3,50	2,00	2,50
0,5C-0,5P-2,5E	0,50	0,50	2,50
3,5C-0,5P-2,5E	3,50	0,50	2,50
0,5C-3,5P-2,5E	0,50	3,50	2,50
3,5C-3,5P-2,5E	3,50	3,50	2,50
2,0C-0,5P-0E	2,00	0,50	0,00
2,0C-0,5P-5E	2,00	0,50	5,00
2,0C-3,5P-0E	2,00	3,50	0,00
2,0C-3,5P-5E	2,00	3,50	5,00
2,0C-2P-2,5E	2,00	2,00	2,50
2,0C-2P-2,5E	2,00	2,00	2,50
2,0C-2P-2,5E	2,00	2,00	2,50

Dobór planu eksperymentu wykluczył analizowanie mieszanek MCE, w których mogły wystąpić równocześnie maksymalne zawartości emulsji asfaltowej, cementu czy modyfikatora polimerowego. Z drugiej strony zakres zmiennych na trzech poziomach pozwolił na zbudowanie matematycznych modeli materiałowych, które charakteryzują i opisują właściwości mieszanek MCE z modyfikatorem polimerowym. Jest to niezbędne w dalszej analizie oraz procesie optymalizacji.

Dla ułatwienia opisu oraz analizy, poszczególne mieszanki MCE opisano przy pomocy kodu (4.2). I tak cyfra poprzedzająca dużą literę alfabetu, oznacza udział procentowy. Natomiast duża litera C, P lub E, to skrót od nazwy środka wiążącego, czyli cement, polimer lub emulsja asfaltowa. Przykład stosowanego kodu:

$$0,5C-2P-0E \quad (4.2)$$

gdzie:

- 0,5C – zawartość cementu portlandzkiego, w składzie mieszanki MCE, w ilości 0,5% (m/m)
- 2P – zawartość modyfikatora polimerowego, w składzie mieszanki MCE, w ilości 2,0% (m/m)
- 0E – zawartość emulsji asfaltowej, w składzie mieszanki MCE, w ilości 0,0% (m/m)

4.2 Plan badań

Przyjęty plan eksperymentu oraz udziału procentowy poszczególnych środków wiążących w mieszance MCE, pozwolą określić wpływ modyfikatora polimerowego na właściwości fizykomechaniczne mieszanki MCE. Dobrano znane metody badawcze, które

powszechnie stosowane są w badaniach laboratoryjnych mieszanek mineralno-cementowo-emulsyjnych. Dokładne rozpoznanie właściwości wskazanych w tabelicy 4.3, pozwoli na optymalizację składu mieszanki MCE z modyfikatorem polimerowym.

Tablica 4.3. Plan badań i metody badawcze

Właściwość	Norma badawcza
Zawartość wolnych przestrzeni (V_m)	PN-EN 12697-8 [95]
Nasiąkliwość (n_w)	PN-S-04001/12 [96]
Wytrzymałość na pośrednie rozciąganie (ITS_{DRY})	PN-EN 12697-23 [97]
Odporność na działanie wody (TSR)	Wirtgen [98]
Odporność na działanie wody i mrozu (ITSR)	PN-EN 12697-12 [99] + załącznik nr 1 do WT-2:2014 [100]
Moduł sztywności S_m w temp. $-10^{\circ}C$, $5^{\circ}C$, $13^{\circ}C$, $25^{\circ}C$, $50^{\circ}C$	PN-EN 12697-26 [101]
Odporność na pękanie w temp. $0^{\circ}C$, $20^{\circ}C$	PN-EN 12697-31 [102]
Moduł zespolony (DTC-CY) w temp. $-10^{\circ}C$, $5^{\circ}C$, $13^{\circ}C$, $25^{\circ}C$, $50^{\circ}C$; 20Hz, 10Hz, 3Hz, 1Hz, 0,3Hz, 0,1Hz	PN-EN 12697-26 [101]
Trwałość zmęczeniowa w schemacie 4PB-PR w temp. $10^{\circ}C$; 10Hz	PN-EN 12697-24 [103]

Dla poprawnej analizy właściwości, oraz uzyskania rzetelnych wyników, wykonano po sześć replikacji pomiaru, dla każdego badania właściwości mieszanki MCE. Wyniki eksperymentów poddano ocenie w zakresie przedziału ufności z założonym prawdopodobieństwem ($P=95\%$). Pozwoliło to wskazać pomiary obarczone błędem i odrzucić je z dalszych rozważań. Przedział ufności obliczono zgodnie z równaniem 4.3.

$$\bar{x} \pm 1,96 \left(\frac{\sigma}{\sqrt{n}} \right) \quad (4.3)$$

gdzie: x – wartość oczekiwana, 1,96 – statystyka dla poziomu istotności $\alpha=0,05$, σ – odchylenie standardowe, n – liczebność próby.

5. Projekt składu mieszanki MCE

Kontrolowanie procesu badawczego poprzez zastosowany plan eksperymentu oraz przyjęty plan badań, gwarantuje ograniczenie wpływu błędów losowych. Kolejnym krokiem w realizowanej rozprawie doktorskiej było opracowanie składu mieszanek MCE. Poprzedzone zostało szczegółową analizą wszystkich składników mineralnych oraz stosowanego spoiwa, lepiszcza i modyfikatora polimerowego. Przegląd dostępnej literatury, zaprezentowany w rozdziale 3.3 wykazał, że brak jest publikacji, które przedstawiają wpływ modyfikatora polimerowego na właściwości mieszanki MCE.

5.1 Materiały

5.1.1 Kruszywa naturalne i z recyklingu

Destrukt asfaltowy pozyskano z rozbiórki drogi wojewódzkiej. Na podstawie przeprowadzonych badań ekstrakcji destruktu stwierdzono, że zawierał w swoim składzie 4,9% lepiszcza asfaltowego. Materiał został przesiany na sicie o oczku 31,5 mm, dla odrzucenia nadziarna. Kruszywo naturalne, doziarniające zostało pozyskane z kopalni zlokalizowanych na terenie województwa świętokrzyskiego. Mieszanka kruszywa niezwiązanego o ciągłym uziarnieniu 0/31,5mm to kruszywo wapienne, z zakładu Nordkalk Miedzianka. Dolomitowe kruszywo 0/4mm, pochodzi z zakładu Józefka w miejscowości Górnó. Materiały zestawiono na rysunku 5.1. Dobór proporcji składników, pozwala uzyskać właściwe uziarnienie mieszanki mineralnej, zgodnie z wytycznymi [93] [98]. Parametry mieszanki 0/4 zawarto w tablicy 5.1, natomiast parametry mieszanki 0/31,5 w tablicy 5.2.



Rys. 5.1. Materiał mineralny wykorzystany w mieszance

Tablica 5.1. Właściwości kruszywa doziarniającego 0/4 mm

Właściwość	Norma	J.M.	Wartość	Symbol
Wymiar kruszywa	PN-EN 933-1 [104]	-	-	0/4
Uziarnienie	PN-EN 933-1 [104]	-	-	G _F 85
Gęstość	PN-EN 1097-6 [105]	Mg/m ³	2,83	2,83

Tablica 5.2. Właściwości kruszywa doziarniającego 0/31,5 mm

Właściwość	Norma	J.M.	Wartość	Symbol
Wymiar kruszywa	PN-EN 933-1 [104]	-	-	0/31,5
Uziarnienie	PN-EN 933-1 [104]	-	-	GA ₉₀
Gęstość	PN-EN 1097-6 [105]	Mg/m ³	2,71	2,71
Wskaźnik kształtu	PN-EN 933-4 [106]	%	16,0	SI ₂₅
Wskaźnik płaskości	PN-EN 933-3 [107]	%	14,0	FI ₂₅
Procentowa zawartość ziarn przekruszonych lub łamanych	PN-EN 933-5 [108]	%	98/2	C _{90/3}
Mrozoodporność	PN-EN 1367-1 [109]	%	3,4	F ₁
Odporność na rozdrabnianie	PN-EN 1097-2 [110]	%	23,0	LA ₃₀
Odporność na ścieranie	PN-EN 1097-1 [111]	%	17,5	M _{DE} 25

5.1.2 Cement portlandzki

Do wykonania mieszank MCE wykorzystano cement portlandzki klasy I o wytrzymałości 42,5 MPa, z wysoką wytrzymałością wczesną „R”. Parametry cementu określono zgodnie z normą PN-EN 197-1 [112]. Spoiwo zostało wytypowane z uwagi na brak dodatków w swoim składzie, które mogłyby ewentualnie mieć wpływ na uzyskane wyniki w trakcie badań mieszanki MCE. Właściwości cementu, przedstawiono poniżej w tablicy 5.3.

Tablica 5.3. Właściwości cementu portlandzkiego CEM I 42,5R [113]

Właściwość	Norma	J.M.	Wartość
Początek czasu wiązania	PN-EN 196-3 [114]	min	243
Koniec czasu wiązania	PN-EN 196-3 [114]	min	312
Wytrzymałość na ściskanie po 2 dniach	PN-EN 196-1 [115]	MPa	25,92
Wytrzymałość na ściskanie po 28 dniach	PN-EN 196-1 [115]	MPa	55,2
Powierzchnia właściwa	PN-EN 196-6 [116]	cm ² /g	3 265
Gęstość właściwa	PN-EN 196-6 [116]	g/ cm ³	3,12

5.1.3 Emulsja asfaltowa

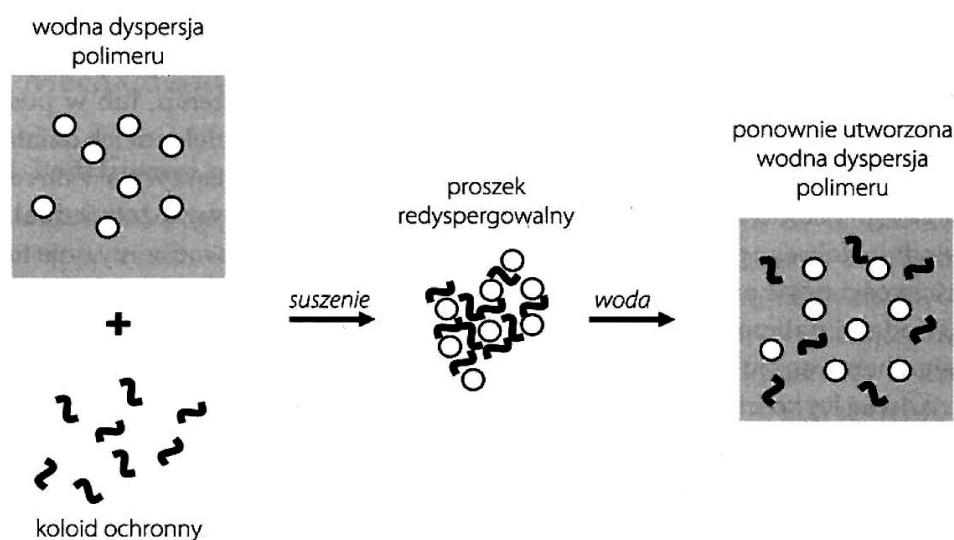
Mieszanki MCE będące przedmiotem badań zawierały w swoim składzie wolnorozpadową kationową emulsję asfaltową o oznaczeniu C60B10 R. Lepiszczce zostało wyprodukowane na bazie asfaltu drogowego 70/100. Emulsja asfaltowa spełniała wymagania krajowego załącznika normy dedykowanej kationowym emulsjom asfaltowym PN-EN 13808 [117]. Parametry opisujące wykorzystaną emulsję asfaltową, przedstawiono w tablicy 5.4.

Tablica 5.4. Właściwości emulsji asfaltowej C60B10 R [118]

Właściwość	Norma	J.M.	Wartość
Zawartość lepiszcza	PN-EN 13808 [117]	% (m/m)	60,0
Stabilność mieszania z cementem		g	0,3
Pozostałość na sicie 0,5 mm		% (m/m)	0,06
Czas wypływu Ø 2 mm w 40°C		s	27
Przyczepność do kruszywa		%	75
Penetracja asfaltu odzyskanego		0,1 mm	53
Temperatura mięknięcia asfaltu odzyskanego		°C	55,2

5.1.4 Redyspergowalny proszek polimerowy

Mieszanki MCE, zaprojektowane w ramach eksperymentu, posiadały w swoim składzie redyspergowalny proszek polimerowy, wywodzący się z grupy plastomerów [12,119]. Wykorzystany polimer to termoplastyczny kopolimer wytworzony na bazie kopolimeru octan winylowo-etylenowy EVA. Występuje pod postacią proszku, który powstaje w wyniku odparowania wody z dyspersji polimerowej. Po wymieszaniu go z wodą, ponownie uzyskiwana jest dyspersja [14] [120]. Proszek uzyskiwany jest w procesie suszenia rozpyłowego. Redyspergowalne proszki polimerowe są emulsjami polimerowymi, które zostały przekształcone w proszek, na skutek procesów technologicznych. [121] Może to być obróbka termiczna, suszenie rozpyłowe czy ciśnienie. Po wymieszaniu z wodą, proszki ponownie tworzą dyspersję. Istotną i pożądaną właściwością, jest możliwość wymieszania proszku z cementem, co pozwala na uzyskanie jednokomponentowego spoiwa polimero-cementowego. Do wytworzenia proszku polimerowego, mającego zdolność do ponownego utworzenia dyspersji wodnej, wymagane jest zastosowanie specjalnego koloidu ochronnego. Jego zadaniem jest zapobieganie koalescencji cząstek polimeru, w czasie suszenia rozpyłowego dyspersji. Przykładem koloidu ochronnego są polimery rozpuszczalne w wodzie, np. polialkohol winylowy. Schemat procesu wytwarzania redyspergowalnego proszku polimerowego przedstawiono na rysunku 5.2.



Rys. 5.2. Ideowy schemat wytwarzania proszku redyspergowalnego i wodnej dyspersji polimeru [4]

Polimer wprowadzony do mieszanki betonowej, wytwarza dyspersję z fazą ciekłą zacinu cementowego. Polimer stanowi w tym układzie fazę rozproszoną. Wraz z ubytkiem wody w mieszance, na skutek hydratacji oraz odparowania, cząstki polimeru zbliżają się do siebie, tworząc strukturę ściśle upakowaną, a następnie ciągłą warstwę. Najważniejszym etapem powstawania ciągłej fazy polimerowej, jest koalescencja. To zjawisko, w trakcie którego łączą się cząstki fazy rozproszonej. Prowadzi to do korzystnie energetycznie zmniejszenia sumarycznej powierzchni międzyfazowej. [4]

W tablicy 5.5 przedstawiono składniki z jakich otrzymywane jest proszek polimerowy EVA, natomiast w tablicy 5.6 przedstawiony został jego skład chemiczny. Rysunek 5.3 prezentuje zastosowany w pracy modyfikator polimerowy w postaci redyspergowalnego proszku.

Tablica 5.5. Składniki zastosowane do wytworzenia polimeru EVA [122]

Składnik	Udział [%]
Octan winylu (PVAc)	70,0-100,0
koponenty (akrylan butylu, etylen, ester winylowy kwasu wersenowego)	0,0-30,0
częściowo zhydrolizowany poli(alkohol winylowy)	6,0
wodorowęglan sodu	0,3
nadtlenek wodoru (35%)	0,7
hydroksymetylosulfonian sodu	0,5

Tablica 5.6. Skład chemiczny polimeru EVA [122]

Składnik	Udział [%]
Węgiel(C)	67,67
Tlen (O)	29,13
Magnez (Mg)	0,52
Krzem(Si)	1,65
Wapń (Ca)	0,75
Aluminium (Al)	0,29



Rys. 5.3. Redyspergowalny proszek polimerowy EVA

5.2 Projekt składu mieszanki MCE z modyfikatorem polimerowym RPP

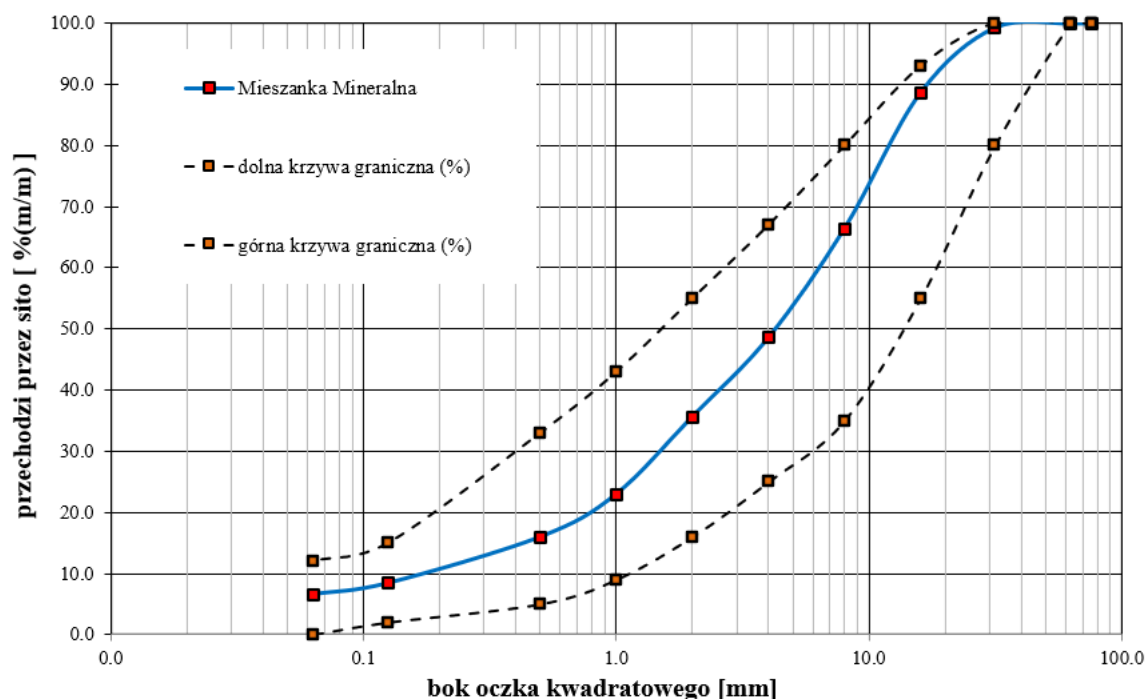
Korzystając z własnych doświadczeń związanych z mieszankami MCE, przyjęto, że projektowana mieszanka mineralna zawierała 50% destruktu asfaltowego (RAP), 20% kruszywa doziarniającego (VA) o uziarnieniu 0/4 mm, oraz 30% kruszywa doziarniającego 0/31,5 mm. Tak dobrana proporcja mieszanki mineralnej, pozwala odwzorować warunki panujące w momencie przebudowy zdegradowanego odcinka drogi. Wykorzystane kruszywa spełniają wymagania aktualnych wytycznych [93]. Zastosowano materiały ze świętokrzyskich zakładów produkcyjnych. Wykorzystane w trakcie badań materiały przedstawiono na rysunku 5.4, natomiast przebieg zaprojektowanej krzywej uziarnienia mieszanki MM na rysunku 5.5. Skład recyklowanej mieszanki zestawiono natomiast w tabelicy 5.7.



Rys. 5.4. Materiały wykorzystane w ramach pracy doktorskiej

Tablica 5.7. Udział procentowy składników mieszanki MM i mieszanki MCE

Składnik	Pochodzenie	Gęstość [g/cm ³]	MM [% m/m]	MCE [% m/m]
Destrukt asfaltowy RAP	DW 762	2,50	50,0	37,6
Kruszywo o ciągłym uziarnieniu 0/31,5 mm, wapień	Nordkalk Miedzianka	2,71	30,0	47,0
Kruszywo drobne 0/4 mm, dolomit	Laskowa	2,69	20,0	9,4
Cement CEM I 42,5R	Lafarge	2,99	-	0,5 ÷ 3,50
Emulsja Asfaltowa	TRAKT	1,00	-	0,0 ÷ 5,00
Proszek polimerowy EVA	Elotex	0,50	-	0,5 ÷ 3,50



Rys. 5.5. Uziarnienie zaprojektowanej mieszanki-mineralnej

5.3 Przygotowanie i wykonanie prób do badań w warunkach laboratoryjnych

Wszystkie wymienione składniki, posłużyły do wykonania mieszanki MCE z modyfikatorem polimerowym. W celu uzyskania jednorodnej mieszanki, składniki zostały wymieszane w laboratorium przy pomocy mieszalnika WLM30, przedstawionym na rysunku 5.6. Jednorazowy zarób wynosił 30 kg. Materiały mieszano w ustalonej w tabeli 5.7 proporcji, z uwzględnieniem ilości wody, dla uzyskania wilgotności optymalnej. Z uwagi, że każda analizowana mieszanka, różniła się procentowym udziałem składników, należało dla wszystkich określić wilgotność optymalną, w badaniu Proctora. [123] Wilgotność optymalną mieszanek MCE zestawiono w tabeli 5.8.



Rys. 5.6. Mieszalnik laboratoryjny Wirtgen WLM 30

Tablica 5.8. Wilgotność optymalna mieszanek MCE z modyfikatorem polimerowym

Kod Mieszanki MCEP	W _{opt} [%]	W _{dod} [%]
0,5C-2P-0E	4,00	3,70
3,5C-2P-0E	4,00	3,70
0,5C-2P-5E	4,00	0,20
3,5C-2P-2,5E	4,00	0,20
0,5C-0,5P-2,5E	4,00	2,00
3,5C-0,5P-2,5E	4,00	2,00
0,5C-3,5P-2,5E	4,00	2,00
3,5C-3,5P-2,5E	4,00	2,00
2,0C-0,5P-0E	4,00	3,70
2,0C-0,5P-5E	4,00	0,20
2,0C-3,5P-0E	4,00	3,70
2,0C-3,5P-5E	4,00	0,20
2,0C-2P-2,5E	4,00	3,70
2,0C-2P-2,5E	4,00	0,20
2,0C-2P-2,5E	4,00	2,00

Z wykonanych zarobów, uformowane zostały próbki. Pierwsza grupa to wykonane w ubijaka Marshalla zgodnie z normą PN-EN 12697-30 [124]. Zastosowano 75 uderzeń ubijaka na każdą stronę wykonywanej próbki. Próbki do badań posiadała średnicę równą 101,6 mm oraz wysokość 62,5 mm. Druga grupa to mieszanki zagęszczone w prasie żyrotorowej [57] [125]. Zadana liczba obrotów prasy, miała zapewnić maksymalną gęstość objętościową, przy założeniu ilości wolnych przestrzeni $V_m = 10\%$, kąt rotacji wynosił 30,00 mrad, natomiast ciśnienie w prasie 600 kPa. Wykonano w ten sposób próbki o wysokości 180 mm oraz średnicy równej 150 mm. W pierwszej dobie przechowywane były w temperaturze 20°C. Kolejno od 1 do 7 dnia przechowywane były w warunkach suchych, przy wilgotności od 40% do 70%, również w temperaturze 20°C ± 2°C. Następnie próbki przebywały w warunkach suchych. Badania wykonywane zostały po 28 dniach kondycjonowania.

5.4 Podsumowanie

Przyjęcie odpowiedniego planu eksperymentu oraz planu badań, stanowi ważny element w weryfikacji właściwości mieszanki MCE z modyfikatorem polimerowym. Kolejnym ważnym krokiem jest rozpoznanie składników oraz dobór składu mieszanki MCE. Znajomość uziarnienia mieszanki, czy charakterystyka środków wiążących, daje szansę na wykonanie prób laboratoryjnych, które odzwierciedlą rzeczywiste parametry mieszanki MCE. Tym samym możliwe jest wykonanie serii badań właściwości fizykomechanicznych, dla określenia wpływu modyfikatora polimerowego RPP na właściwości mieszanki mineralno-cementowej z emulsją asfaltową.

6. Wyniki badań laboratoryjnych wpływu modyfikatora polimerowego na właściwości fizykomechaniczne mieszanki MCE

Analiza dostępnej literatury wyraźnie wskazuje na korzyści płynące z modyfikacji materiałów budowlanych polimerami. Brak jest jednak badań, które przedstawiają oddziaływanie modyfikatorów polimerowych na mieszanki mineralno-cementowe z emulsją asfaltową. Tym samym w pracy dobrano odpowiedni plan eksperymentu, oraz plan badań, które pozwolą na ocenę wpływu modyfikatora polimerowego na właściwości fizykomechaniczne recyklowanej mieszanki MCE z modyfikatorem polimerowym RPP. Analiza wyników pozwoli na przyjęcie optymalnego składu omawianej mieszanki MCE.

Rozwój technologii recyklingu głębokiego na zimno oraz technik pomiarowych umożliwia zaimplementowanie w ocenie jakości mieszanki MCE bardziej zaawansowanych metod badawczych. Analiza aktualnych pozycji literatury [93] [126] [127] [128] pozwala ustalić, że ocenę właściwości mieszanek MCE wykonuje się wykorzystując nowoczesne metody badawcze w zakresie właściwości empirycznych oraz funkcjonalnych. Wymagania empiryczne dotyczą zawartości poszczególnych składników oraz cech fizyczno-wytrzymałościowych [129], które zestawiono w tabelicy 6.1.

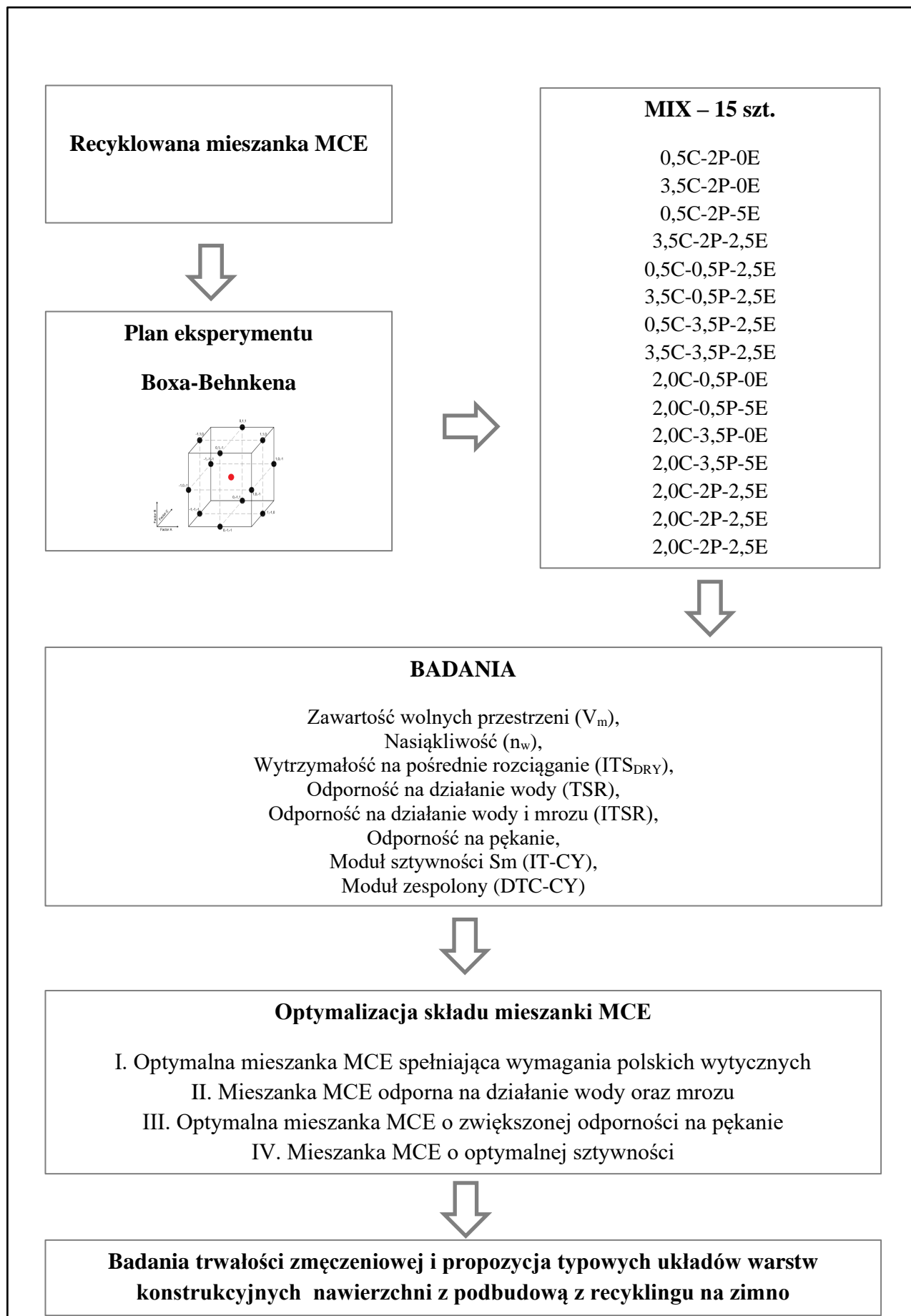
Tablica 6.1. Badania cech fizyczno-wytrzymałościowych mieszanki MCE

Właściwość	Norma badawcza
Zawartość wolnych przestrzeni (V_m)	PN-EN 12697-8 [95]
Nasiąkliwość (n_w)	PN-S-04001/12 [96]
Wytrzymałość na pośrednie rozciąganie (ITS_{DRY})	PN-EN 12697-23 [97]
Odporność na działanie wody (TSR)	Wirtgen [98]
Odporność na działanie wody i mrozu (ITSR)	PN-EN 12697-12 [99] + załącznik nr 1 do WT-2:2014 [100]
Odporność na pękanie	PN-EN 12697-31 [102]

W przypadku właściwości funkcjonalnych określanych dla mieszanek mineralno-cementowych z emulsją asfaltową (MCE) wykonano badania, które zestawiono w tabelicy 6.2. Schemat analizy właściwości fizykomechanicznych mieszankami MCE z modyfikatorem polimerowym zestawiono na rysunku 6.1.

Tablica 6.2. Badania właściwości funkcjonalnych mieszanki MCE

Właściwość	Norma badawcza
Moduł sztywności S_m (IT-CY) w temp. -10°C , 5°C , 13°C , 25°C , 50°C	PN-EN 12697-26 [101]
Moduł zespolony (DTC-CY) w temp. -10°C , 5°C , 13°C , 25°C , 50°C , częstotliwość: 20Hz, 10Hz, 3Hz, 1Hz, 0,3Hz, 0,1Hz	PN-EN 12697-26 [101]
Trwałość zmęczeniowa w schemacie 4PB-PR w temp. 10°C ; 10Hz	PN-EN 12697-24 [103]



Rys. 6.1. Schemat analizy właściwości fizykomechanicznych mieszanki MCE z modyfikatorem polimerowym RPP

6.1 Wyniki badań właściwości fizycznych

Dla mieszanek MCE wykonanych wg omówionego planu eksperymentu, przeprowadzono badania, służące określeniu ich parametrów fizycznych oraz mechanicznych. Dzięki результатам badań laboratoryjnych, możliwe jest porównanie mieszanek MCE, oraz określenie jak modyfikator RPP wpływa na właściwości mieszanki mineralno-cementowej z emulcją asfaltową oraz modyfikatorem polimerowym.

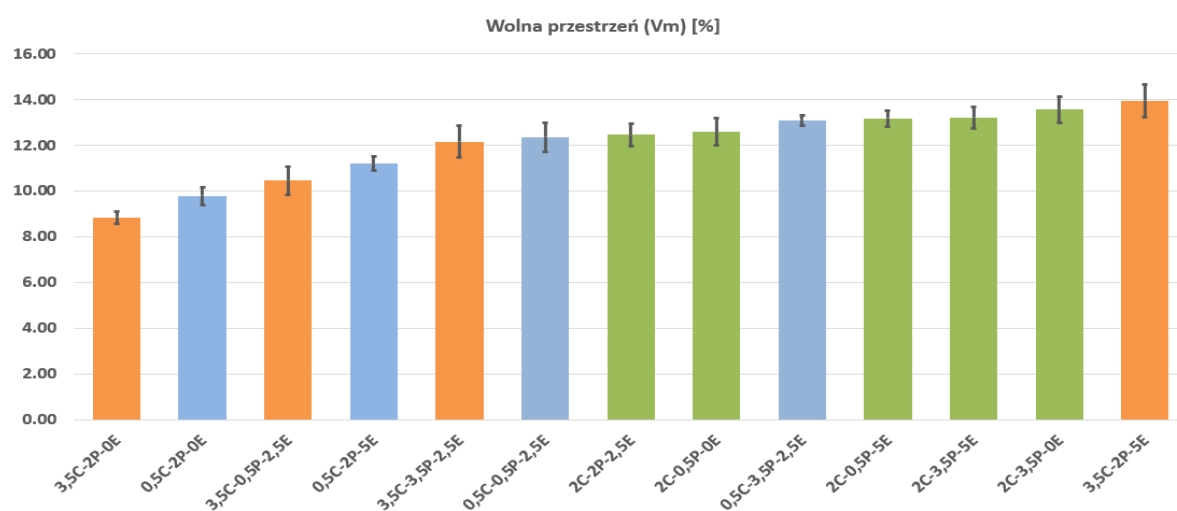
6.1.1 Zawartość wolnych przestrzeni (V_m)

Pierwszą z ocenianych właściwości fizycznych mieszanek MCE jest **zawartość wolnych przestrzeni (V_m)**, która wg PN-EN 12697-8 [130] definiowana jest jako objętość pustek powietrznych w próbce, wyrażona jako procent całkowitej objętości próbki opisana za pomocą równania 6.1.

$$V_m = \frac{\rho_m - \rho_b}{\rho_m} * 100\% \quad (6.1)$$

gdzie: V_m – zawartość wolnej przestrzeni [0,1%], ρ_m – gęstość mieszanki mineralno-asfaltowej [Mg/m^3], ρ_b – gęstość objętościowa mieszanki mineralno-asfaltowej [Mg/m^3] [131]

Zawartość wolnych przestrzeni (V_m), jakie uzyskano dla mieszanek MCE będących przedmiotem eksperymentu, uszeregowano w kolejności od najniższej do najwyższej. Wyniki zostały zestawione na rysunku 6.2. Polskie wytyczne [93] dopuszczają zawartość wolnej przestrzeni w mieszance MCE w przedziale wartości od 8,0% do 15,0%. Kolorem niebieskim oznaczono mieszanki o minimalnej zawartości cementu równej 0,5%, zielonym 2,0% cementu, a pomarańczowym mieszanki o zawartości cementu równej 3,5%.



Rys. 6.2. Zawartość wolnych przestrzeni V_m dla mieszanek MCE (słupek błędu stanowi przedział ufności 95%)

Uzyskane wyniki zawierają się we wskazanym przez wytyczne [93] przedziale. Należy zaznaczyć, że zawartość wolnej przestrzeni poniżej 10% w mieszance MCE, odnotowano dla mieszanek, które w swoim składzie zawierają 2% modyfikatora RPP oraz zerowy udział

emulsji asfaltowej. Mieszanka MCE 3,5C-2P-5EMU z wysoką zawartością emulsji asfaltowej oraz modyfikatora polimerowego w składzie wykazała najwyższe zawartości wolnej przestrzeni, wartość ta wynosi 13,9%. Najniższą wartość otrzymano dla mieszanki 3,5C-2P-0EMU i jest ona równa 8,8%. Wpływ istotności analizowanych składników, na wolną przestrzeń mieszanki MCE przedstawiono w tabelicy 6.3.

Tablica 6.3 Wpływ czynników na cechę: zawartość wolnych przestrzeni V_m

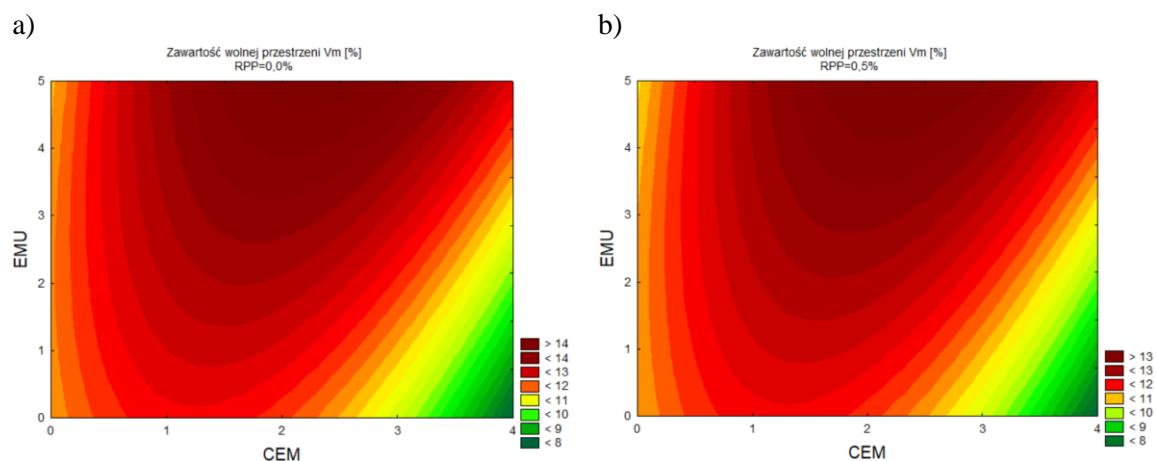
	V_m [%]; $R^2= 0,67$; Czysty błąd MS=0,22		
	t	Współczynnik	$p \leq 0,05$
Średnia/Stała	25,94	11,55	0,000
(1)CEM[%](L)	5,25	1,43	0,000
CEM[%](Q)	-10,04	-0,59	0,000
(2)EMU[%](L)	0,93	0,13	0,358
EMU[%](Q)	-1,54	-0,03	0,129
(3)RPP[%](L)	-4,85	-1,32	0,000
RPP[%](Q)	6,66	0,39	0,000
1L wz.2L	7,85	0,25	0,000
1L wz.3L	2,02	0,11	0,049
2L wz.3L	-1,96	-0,06	0,057

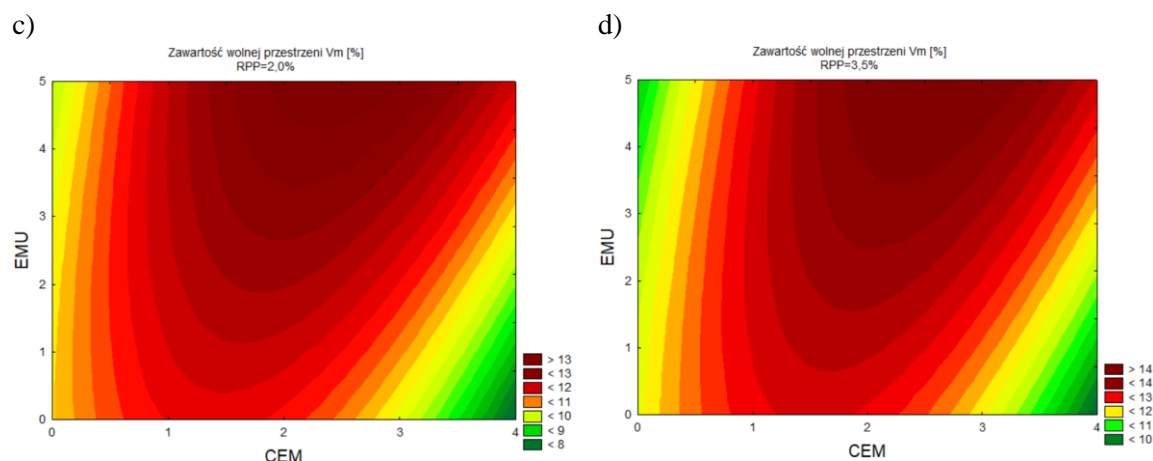
czerwonym kolorem zaznaczony czynniki o istotnym wpływie na rozpatrywaną cechę

Otrzymane wartości obarczone są błędem estymacji MS równym $\sqrt{0,22}$. Średnia zawartość wolnej przestrzeni dla mieszanki MCE niezależnie od ilości cementu, emulsji asfaltowej oraz ilości proszku polimerowego jest równa 11,55%. Natomiast współczynnik determinacji R^2 równy jest 0,67. Model matematyczny opisujący zawartość wolnej przestrzeni, za pomocą wielomianu stopnia drugiego, przedstawiono przy pomocy równania (6.2).

$$V_m = 11,55 + 1,43 * CEM - 0,59 * CEM^2 + 0,13 * EMU - 0,03 * EMU^2 - 1,32 * RPP + 0,39 * RPP^2 + 0,25 * CEM * EMU + 0,11 * CEM * RPP - 0,06EMU * RPP \quad (6.2)$$

Korzystając z modelu matematycznego w postaci wielomianu stopnia drugiego, opracowane zostały powierzchnie odpowiedzi przedstawiające wpływ analizowanych składników na zawartość wolnej przestrzeni (V_m). Wyniki zestawiono na rysunku 6.3.





Rys. 6.3. Powierzchnia odpowiedzi dla parametru: zawartość wolnych przestrzeni V_m w aspekcie zawartości cementu portlandzkiego i zawartości emulsji asfaltowej przy: a) 0,0% RPP; b) 0,5% RPP; c) 2,0% RPP; d) 3,5% RPP

Dodatek modyfikatora polimerowego RPP do mieszanki MCE, w ilości 0,5% nie wpływa na zmianę zawartości wolnej przestrzeni. Uzyskane wyniki są bardzo zbliżone do tych, bez modyfikatora RPP, zaprezentowanych na rysunku 6.3a. Dla mieszanek MCE bez modyfikatora, zawartość wolnych przestrzeni determinuje głównie ilości cementu w ich składzie. Najmniejsze wartości V_m odnotowane są przy wysokiej zawartości cementu, powyżej 3,0%. Najwyższe zawartości V_m przy minimalnym udziale cementu. Wzrost zawartości proszku polimerowego w mieszance MCE, powoduje jej uszczelnienie w przypadku dwóch kombinacji składników. Mieszanki o minimalnej zawartości cementu, 0,5%, oraz maksimum emulsji asfaltowej, tj. powyżej 4,0%, lub dla mieszanki MCE z zerową zawartością emulsji asfaltowej i cementem powyżej 3,0%. Dla uzyskania optymalnych rezultatów wystarczy dozowanie redyspergowalnego proszku polimerowego w ilości 2,0%. Jednak spadek zawartości wolnej przestrzeni postępuje wraz ze wzrostem polimeru do 3,5%. Mniejsza zawartość wolnych przestrzeni, to uszczelnienie mieszanki MCE. Z uwagi na charakter warstwy konstrukcyjnej, do jakiej wykorzystywana jest mieszanka MCE, czyli warstwa podbudowy zasadniczej, woda z otoczenia może okazać się destrukcyjna. **Dodatek modyfikatora polimerowego, w postaci redyspergowalnego proszku polimerowego korzystnie wpływa na zawartość wolnej przestrzeni. Wzrost zawartości modyfikatora RPP w składzie mieszanki MCE powoduje spadek wolnej przestrzeni i uszczelnienie mieszanki MCE.**

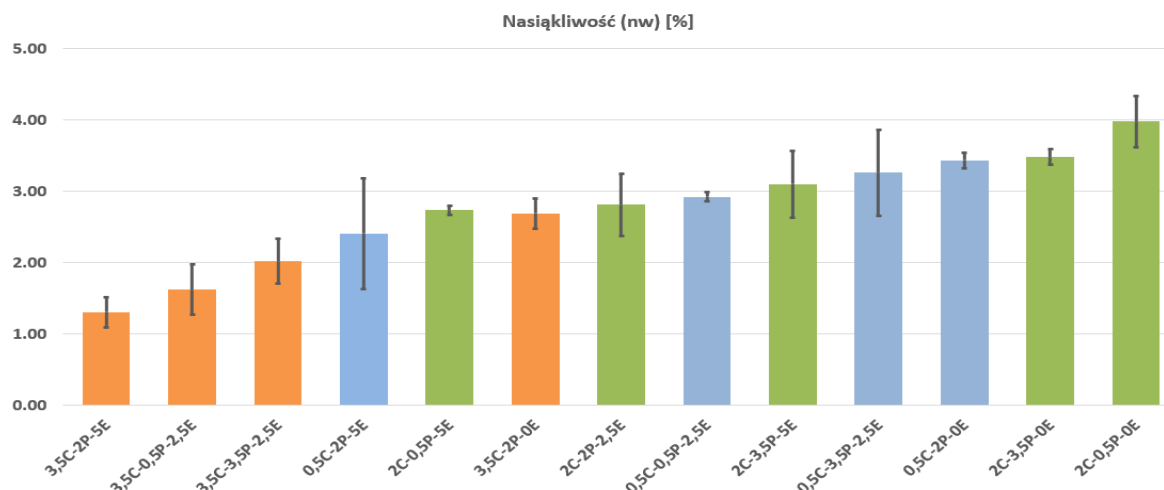
6.1.2 Nasiąkliwość (n_w)

Kolejnym ocenianym parametrem analizowanych mieszanek MCE, jest ich nasiąkliwość. Nasiąkliwość (n_w) to masa i objętość wody pochłoniętej przez próbkę zanurzoną w wodzie na 24 godziny w temperaturze $+25 \pm 5$ °C, a następnie wysuszoną do stałej masy. Nasiąkliwość (n_w) oblicza się jako procent (m/m) z dokładnością do 0,1% za pomocą wzoru (6.3) [96]:

$$n_w = \frac{m_1 - m}{m} * 100\% \quad (6.3)$$

gdzie: n_w – nasiąkliwość wagowa [0,1%], m_1 – masa próbki nasyconej wodą [g], m – masa próbki suchej [g],

Wartość nasiąkliwości (n_w), uzyskana dla mieszanek MCE, które analizowano wg planu eksperymentu, uszeregowano w kolejności od najniższej do najwyższej. Wyniki zostały zaprezentowane na rysunku 6.4. Uzyskane wartości nasiąkliwości mieszanki MCE kształtują się w zakresie od 1,3% do 3,9%.



Rys. 6.4. Nasiąkliwość n_w analizowanych mieszanek MCE (słupki błędów stanowią przedział ufności 95%)

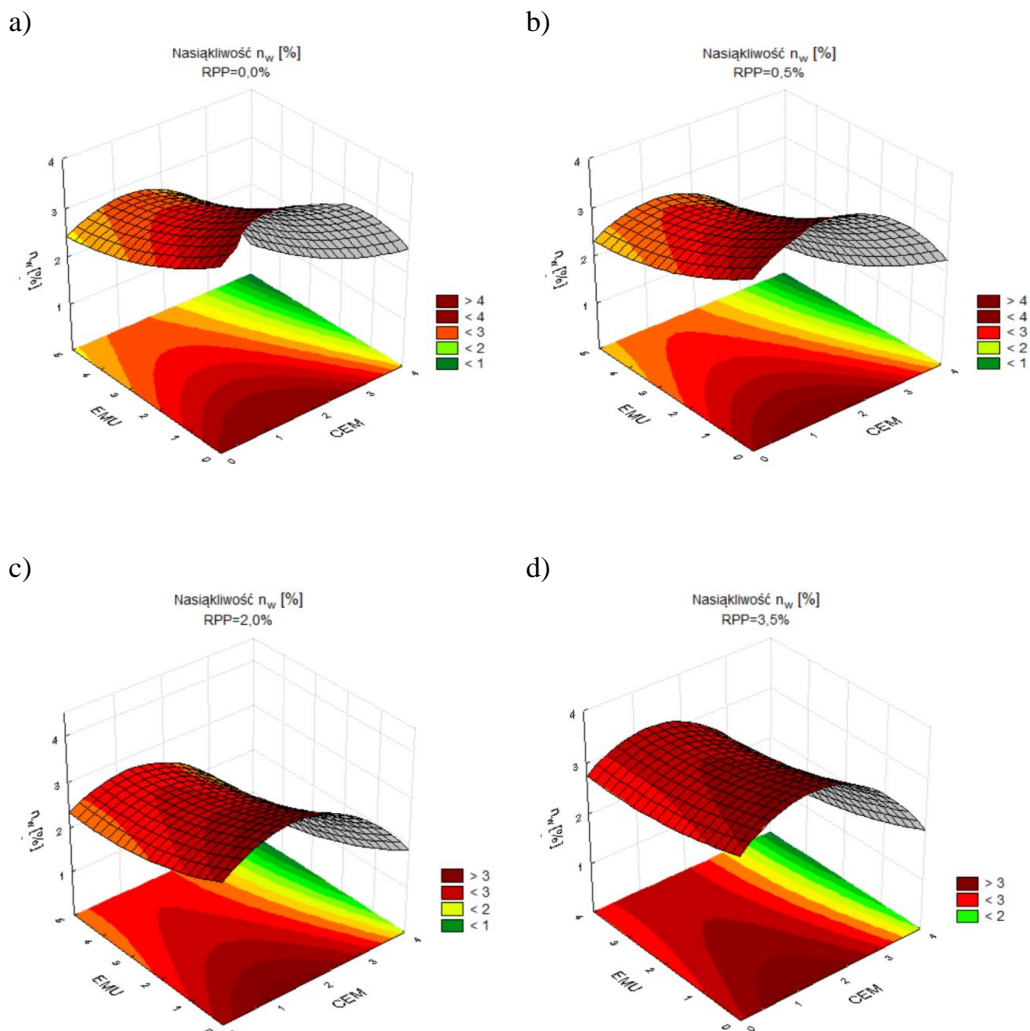
Najniższą wartością nasiąkliwości, uzyskały mieszanki MCE z wysoką zawartością cementu w składzie, tj. 3,5% CEM, których wartość nasiąkliwości nie przekracza 2,0%. Badania wykazały, że emulsja asfaltowa w mieszance MCE, tak jak cement powoduje obniżenie omawianego parametru, uszczelniając mieszankę, ograniczając możliwość chłonięcia przez nią wody. Zmiana ilości modyfikatora polimerowego w mieszance MCE, powoduje istotne różnice. Przykładem są mieszanki 2C-3,5P-0EMU oraz 2C-0,5P-0EMU. Zmniejszenie zawartości polimeru, spowodowało wzrost nasiąkliwości mieszanki o około 0,5%, tj. z 3,5% do 4,0%. Wpływ analizowanych składników, na rozpatrywaną cechę mieszanki MCE przedstawiono w tabelicy 6.4.

Tabela 6.4 Wpływ czynników na cechę: nasiąkliwość n_w

	n_w [%]; $R^2= 0,88$; Czysty błąd MS=0,06		
	t	Współczynnik	$p \leq 0,05$
Średnia/Stała	15,87	3,77	0,000
(1)CEM[%](L)	5,26	0,77	0,000
CEM[%](Q)	-8,72	-0,27	0,000
(2)EMU[%](L)	-6,30	-0,47	0,000
EMU[%](Q)	3,67	0,04	0,001
(3)RPP[%](L)	-3,85	-0,56	0,000
RPP[%](Q)	3,64	0,11	0,001
1L wz.2L	-1,43	-0,02	0,160
1L wz.3L	0,25	0,01	0,804
2L wz.3L	3,45	0,06	0,001

czerwonym kolorem zaznaczony czynniki o istotnym wpływie na rozpatrywaną cechę

Analiza wykazuje, że otrzymane wartości obarczone są błędem estymacji MS równym $\sqrt{0,06}$. Współczynnik determinacji R^2 , dla uzyskanych wyników jest równy 0,88. Średnia wartość nasiąkliwości jaką uzyskano dla mieszanek MCE to 3,8%. Maksymalną wartość równą 4,0% otrzymano dla mieszanki o składzie 2C-0,5P-0E, natomiast minimalną wartość, która wynosi 1,3% i jest trzykrotnie mniejsza, odnotowano w przypadku mieszanki MCE o symbolu 3,5C-2P-5E. Obecność proszku polimerowego w mieszance MCE, prowadzi do redukcji nasiąkliwości. Czynnikiem, który najsilniej wpływa na wartość nasiąkliwości mieszanki MCE, jest zawartość cementu portlandzkiego. Wraz ze wzrostem zawartości cementu, maleje nasiąkliwość mieszanki MCE. Podobnie wzrost zawartości EMU, prowadzi do zmniejszenia wartości nasiąkliwości. Korzystając z modelu matematycznego w postaci wielomianu stopnia drugiego, opracowane zostały powierzchnie odpowiedzi. Zaprezentowane wykresy pozwalają zaobserwować, jak zmiana udziału poszczególnych środków wiążących w mieszance MCE, wpływa na nasiąkliwość (n_w). Wykresy przedstawiono na rysunku 6.5.



Rys. 6.5. Powierzchnia odpowiedzi dla parametru: nasiąkliwość n_w w aspekcie zawartości cementu portlandzkiego i zawartości emulsji asfaltowej przy: a) 0,0% RPP; b) 0,5% RPP; c) 2,0% RPP; d) 3,5% RPP

Na podstawie analizy wyników badań zaprezentowanych na rysunku 6.5, należy wskazać istotną **zależność spadku nasiąkliwości mieszanki MCE, wraz ze wzrostem ilości cementu**. Przy 3% cementu w mieszance i 2% emulsji asfaltowej, nasiąkliwość mieszanek MCE spada poniżej 2%. Najmniejszą nasiąkliwość, uzyskać można przy maksymalnej zawartości emulsji asfaltowej w mieszance MCE. **Emulsja asfaltowa uszczelnia mieszankę, co nie pozwala na absorbcję wody z otoczenia**. Jest to istotna cecha, z uwagi na zastosowanie mieszanki w warstwie podbudowy. Absorbcja wody przez podbudowę prowadzi do jej degradacji, wskutek przewilgocenia i utraty trwałości. Obecność RPP w mieszance MCE prowadzi do obniżenia wartości nasiąkliwości. Najkorzystniejsze rezultaty, a tym samym najniższe wartości wolnych przestrzeni odnotowano przy ilości RPP w mieszance MCE równej 3,5%.

6.2 Wyniki badań właściwości mechanicznych

Znajomość właściwości mechanicznych mieszanki MCE, pozwala zrozumieć, jak wykonana podbudowa zachowa się pod wpływem obciążenia od kół poruszających się pojazdów. Charakterystykę właściwości mechanicznych zrealizowano poprzez ocenę następujących parametrów:

- wytrzymałości na pośrednie rozciąganie w temp. 25°C (ITS_{DRY}) wg PN-EN 12697-23 [97],
- modułu sztywności (S_m) wg PN-EN 12697-23 [101].

6.2.1 Wytrzymałość na pośrednie rozciąganie (ITS_{DRY})

Badanie wytrzymałości na pośrednie rozciąganie (ITS_{DRY}) mieszanki MCE wykonano na próbkach Marshalla o średnicy $101,6 \pm 0,3$ mm i wysokości $62,5 \pm 2,5$ mm. Próbki po wykonaniu, pielęgnowano przez 28 dni przy wilgotności względnej od 40% do 70%. Próbki do badania zagęszczono w ubijaku Marshalla z częstotliwością 2x75 uderzeń zgodnie z normą PN-EN 12697-30 [132]. Badanie wykonano w temperaturze $25^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$. Sam proces badania odbywa się poprzez umieszczenie próbek pomiędzy dwiema płytkami i poddaniu ich ścisłaniu ze stałą prędkością przemieszczenia 50 ± 2 mm/min. Wytrzymałość na rozciąganie pośrednie ITS_{DRY} oblicza się według wzoru 6.4. Schemat badania przedstawiono na rysunku 6.6.

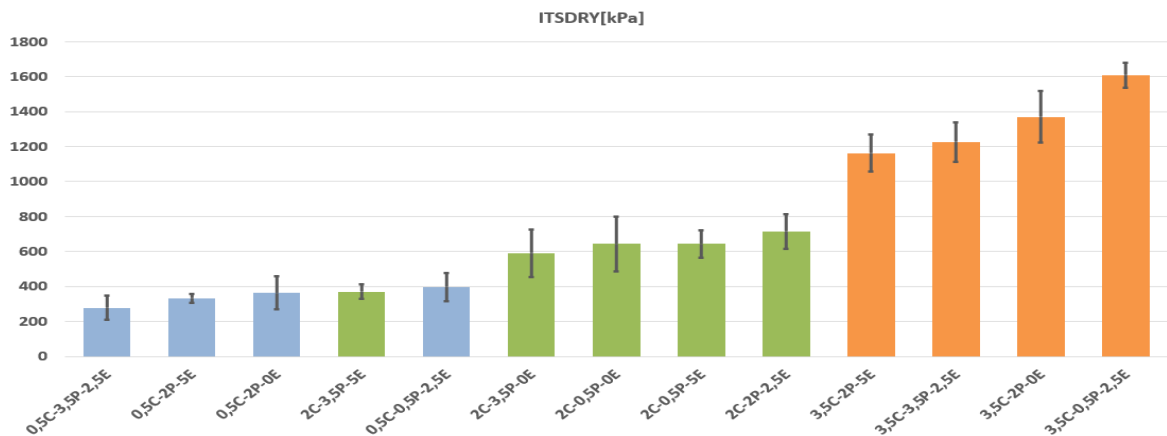
$$ITS_{DRY} = \frac{2 \cdot P}{\pi \cdot h \cdot D} \quad (6.4)$$

gdzie: P – maksymalna siła niszcząca próbkę [N], h – wysokość próbki [mm], D – średnica próbki [mm].



Rys. 6.6. Badanie wytrzymałości na pośrednie rozciąganie ITS_{DRY}

Do oceny wpływu modyfikatora polimerowego wykorzystano wytrzymałość na pośrednie rozciąganie (ITS_{DRY}). Na rysunku 6.7. zaprezentowano uzyskane wyniki.



Rys. 6.7. Wyniki badań wytrzymałości na pośrednie rozciąganie ITS_{DRY} (słupki błędów stanowią przedział ufności 95%)

Wyniki przedstawione zostały w usystematyzowanej kolejności, od najmniejszej uzyskanej średniej wartości ITS_{DRY} , do największej. Mieszanki MCE, które zawierały 3,5% cementu, charakteryzują się wartością wytrzymałości na pośrednie rozciąganie powyżej 1100 kPa. Na wykresie oznaczono je kolorem pomarańczowym. Mieszanki usytuowane są po prawej stronie wykresu (rysunek 6.7). Mieszanki MCE zawierające 0,5% cementu portlandzkiego w składzie, charakteryzują się najniższymi wartościami parametru ITS_{DRY} . Wytrzymałość na pośrednie rozciąganie wynosi poniżej 700 kPa. Wzrost zawartości emulsji asfaltowej w mieszankach, prowadzi to do zmniejszenia wytrzymałości na pośrednie rozciąganie. Przykładem są mieszanki, gdzie zwiększono zawartość emulsji asfaltowej z 0% do 5%, przy

jednakowej zawartości CEM oraz RPP, odnotowano spadek ITS_{DRY} o 40%. Interesujące zależności wynikają z obecności RPP w recyklowanej mieszance MCE. Korzystne dla podbudowy wartości parametru ITS_{DRY} , uzyskiwane są w sytuacji kiedy RPP zawiera się w ilości do 2% w składzie mieszanki MCE. Przykładem może być mieszanka z zawartością 2% CEM oraz 2% RPP. Wartość wytrzymałości na pośrednie rozciąganie wynosi w tym przypadku około 720 kPa, gdy przy zawartości 3,5% RPP kształtuje się na poziomie 600 kPa. Wpływ analizowanych składników, na rozpatrywaną cechę ITS_{DRY} mieszanki MCE przedstawiono w tablicy 6.5.

Tablica 6.5 Wpływ czynników na cechę: odporność na pośrednie rozciąganie ITS_{DRY}

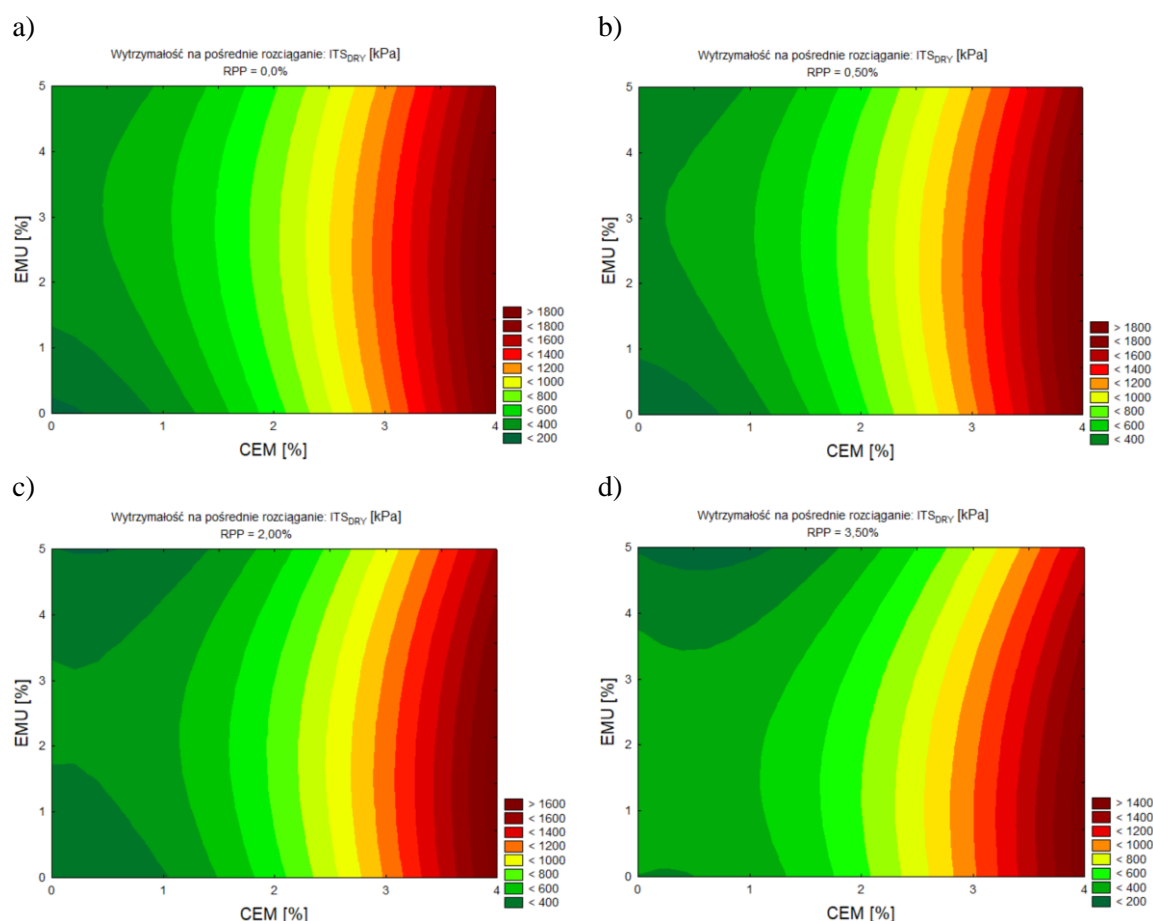
	ITS_{DRY} ; $R^2=0,99$; Czysty błąd MS=1185		
	t	Współczynnik	$p \leq 0,05$
Średnia/Stała	5,28	172,23	0,000
(1)CEM[%](L)	2,92	58,56	0,005
CEM[%](Q)	21,19	90,63	0,000
(2)EMU[%](L)	11,49	118,98	0,000
EMU[%](Q)	-11,54	-17,77	0,000
(3)RPP[%](L)	4,99	99,86	0,000
RPP[%](Q)	-4,28	-18,29	0,000
1L wz.2L	-5,13	-11,77	0,000
1L wz.3L	-7,67	-29,34	0,000
2L wz.3L	-6,43	-14,75	0,000

czerwonym kolorem zaznaczony czynniki o istotnym wpływie na rozpatrywaną cechę

Otrzymane w trakcie badań wartości parametru ITS_{DRY} są obarczone błędem estymacji MS na poziomie $\sqrt{1185}$. Współczynnik determinacji R^2 równy jest 0,99. Składnikiem recyklowanej mieszanki MCE, który istotnie wpływa na wartość wytrzymałość na pośrednie rozciąganie, jest cement (CEM). Dodatek cementu do recyklowanej mieszanki MCE powoduje wzrost wartości parametru ITS_{DRY} . Kolejnym silnie oddziałującym składnikiem jest redispersyjny proszek polimerowy (RPP). Wzrost udziału procentowego modyfikatora RPP w składzie mieszanki MCE powoduje obniżenie wytrzymałości na pośrednie rozciąganie. Uzyskanie takiej zależności potwierdzają wyniki badań zaprezentowane w publikacjach [133] [134] [135] [136] [137]. Emulsja asfaltowa będąca składnikiem mieszanki MCE, podobnie jak RPP powoduje wzrost podatności podbudowy. Jej zawartość w mieszance MCE prowadzi do spadku wartości parametru ITS_{DRY} . Możliwe jest wykorzystywanie RPP w mieszance MCE, przy minimalizacji ilości EMU w składzie. Wskazuje na to również istotny względem siebie udział cementu oraz polimeru. Uzyskane wyniki, opisane zostały modelem matematycznym pod postacią wielomianu stopnia drugiego (6.5).

$$\begin{aligned}
 ITS_{DRY} = & 172,23 + 58,56 * CEM + 90,63 * CEM^2 + 118,98 * EMU - 17,77 * \\
 & EMU^2 + 99,86 * RPP - 18,29 * RPP^2 - 11,77 * CEM * EMU - 29,34 * CEM * RPP - \\
 & 14,75 * EMU * RPP
 \end{aligned} \quad (6.5)$$

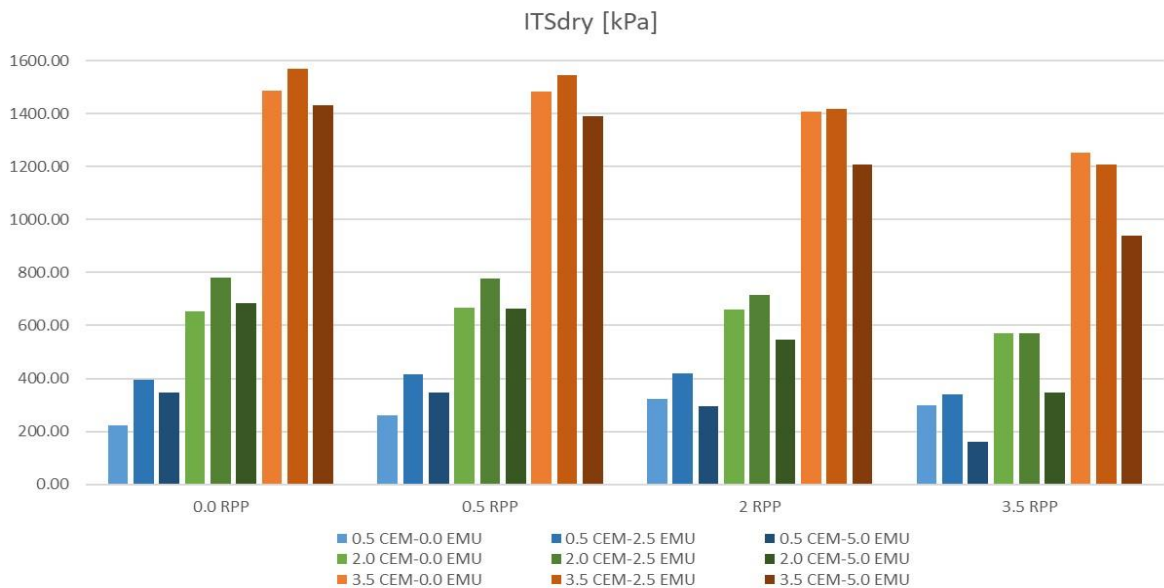
Otrzymane wyniki, pozwoliły na określenie zależności pomiędzy środkami wiążącymi w mieszance MCE. Powierzchnie odpowiedzi, które przedstawiają zmiany odporności na pośrednie rozciąganie, w zależności od zawartości ilości poszczególnych składników w mieszance MCE. Wykresy zostały przedstawione na rysunku 6.8.



Rys.6.8. Powierzchnia odpowiedzi dla parametru: wytrzymałość na pośrednie rozciąganie ITS_{DRY} w aspekcie zawartości cementu portlandzkiego i zawartości emulsji asfaltowej przy: a) 0,0% RPP; b) 0,5% RPP; c) 2,0% RPP; d) 3,5% RPP

Na podstawie wyników badań zaprezentowanych na rysunku 6.8 należy wskazać, że wzrost ilości cementu w recyklowanej mieszance, najistotniej wpływa na parametr, jakim jest wytrzymałość na pośrednie rozciąganie. Przy zawartości cementu w mieszance MCE powyżej 2,5%, wytrzymałość na pośrednie rozciąganie ITS_{DRY} , osiąga wartości powyżej 1000 kPa. Wytrzymałość na pośrednie rozciąganie powyżej 800 kPa, można uzyskać już przy zawartości cementu równej około 1,5%. Co ciekawe, minimalny wzrost zawartości RPP, z 0,0% do 0,5% pozwala uzyskać korzystniejsze wyniki, przy minimalnej ilości cementu oraz emulsji asfaltowej. Dalszy, stopniowy wzrost ilości RPP, do wartości 2,0% oraz 3,5% w mieszance, prowadzi do obniżenia wytrzymałości ITS_{DRY} . Dla zawartości RPP równej 2,0% i CEM w ilości powyżej 3,5%, wytrzymałość na pośrednie rozciąganie wynosi około 1600 kPa, dla polimeru w ilości 3,5% to już 1400 kPa.

Opisanie danych za pomocą modelu matematycznego, pozwoliło wygenerować rezultaty dla każdego procentowego udziału środków wiążących w recyklowanej mieszance MCE. Wyniki przedstawiono na rysunku 6.9, gdzie rozróznilo trzy kroki dozowania cementu, emulsji asfaltowej, natomiast RPP dozowano zgodnie z krokiem przyjętym w planie eksperymentu. Dodatkowo wyniki zestawiono z tradycyjną mieszanką MCE, przy zerowej zawartości polimeru w mieszance.



Rys. 6.9. Wartości parametru ITS_{DRY} dla tradycyjnych mieszanek MCE oraz z modyfikatorem polimerowym

Analiza powyższych wykresów, pozwala na wyciągnięcie kilku zasadniczych wniosków. **Wraz ze wzrostem ilości cementu, rośnie wytrzymałość na pośrednie rozciąganie.** Zmiana zawartości cementu z 0,5% na 2,0% to wzrost wytrzymałości na pośrednie rozciąganie niemal o 100%. Przykładem może być mieszanka MCE o symbolach 0,5C-0,5P-5E oraz 2C-0,5P-5E, w której zaobserwowano wzrost wytrzymałości z 320 kPa do 680 kPa. Podobna zależność obserwowana jest przy zwiększeniu ilości cementu z 2,0% do 3,5% w mieszance MCE. Również następuje zwiększenia parametru ITS_{DRY} o 100%. Mowa o wzroście wartości z 700 kPa na 1400 kPa, dla mieszanki 2C-0,5P-5E, oraz 3,5C-0,5P-5E. Wskazuje to w jaki sposób można oddziaływać na uzyskiwane parametry wytrzymałości na pośrednie rozciąganie, ustalając ilość cementu w receptce. Obrazuje to również, jak łatwo może dojść do przeszywnienia wykonywanej podbudowy. Tego typu błędy prowadzą do powstania między innymi spękań odbitych. Kolejnym rozpatrywanym składnikiem w mieszance jest zawartość emulsji asfaltowej. Dla minimalnej ilości cementu (0,5%) wzrost procentowej ilości emulsji asfaltowej oraz proszku polimerowego, powoduje poprawę wytrzymałości na pośrednie rozciąganie. Wyższe wyniki uzyskiwane są przy ilości modyfikatora RPP do 2,0% oraz 2,5% emulsji asfaltowej. Co ciekawe bez względu na zawartość cementu oraz polimeru w mieszance MCE, najkorzystniejsze rezultaty uzyskano dla mieszanek z 2,5% emulsji asfaltowej w składzie mieszanki. Wraz ze wzrostem ilości cementu i proszku polimerowego w mieszance MCE, zmiana ilości emulsji prowadzi do zmniejszenia wytrzymałości na pośrednie rozciąganie. Wynika to ze zmniejszenia sztywności podbudowy oraz bardziej podatnego charakteru pracy. **Polimer powoduje spadek wytrzymałości na pośrednie rozciąganie mieszanki MCE, w przypadku zawartości RPP powyżej 2,0% w mieszance MCE. Istnieje również możliwość redukcji zawartości tradycyjnych spoiw w mieszance MCE, na rzecz modyfikatora polimerowego.** Znaczenie ma silniejsze oddziaływanie RPP na mieszankę MCE, niż emulsji asfaltowej. Daje to realną szansę na zastąpienie emulsji asfaltowej, mniejszą ilości modyfikatora RPP.

6.2.2 Moduł sztywności mieszanki MCE w teście pośredniego rozciągania (S_m)

Kolejnym istotnym parametrem, który opisuje materiały wykorzystywane w konstrukcjach nawierzchni drogowych, jest **moduł sztywności (S_m)**. Do wyznaczenia modułu sztywności mieszanek MCE, wykonano badanie w schemacie pośredniego rozciągania IT-CY. Moduł sztywności wyznaczono zgodnie z wymaganiami normy PN-EN 12697-26 [101], załącznik C. Przemieszczenie poziome wynosiło $5 \pm 2 \mu\text{m}$, przyrost obciążenia wynosił $124 \pm 4 \text{ ms}$.

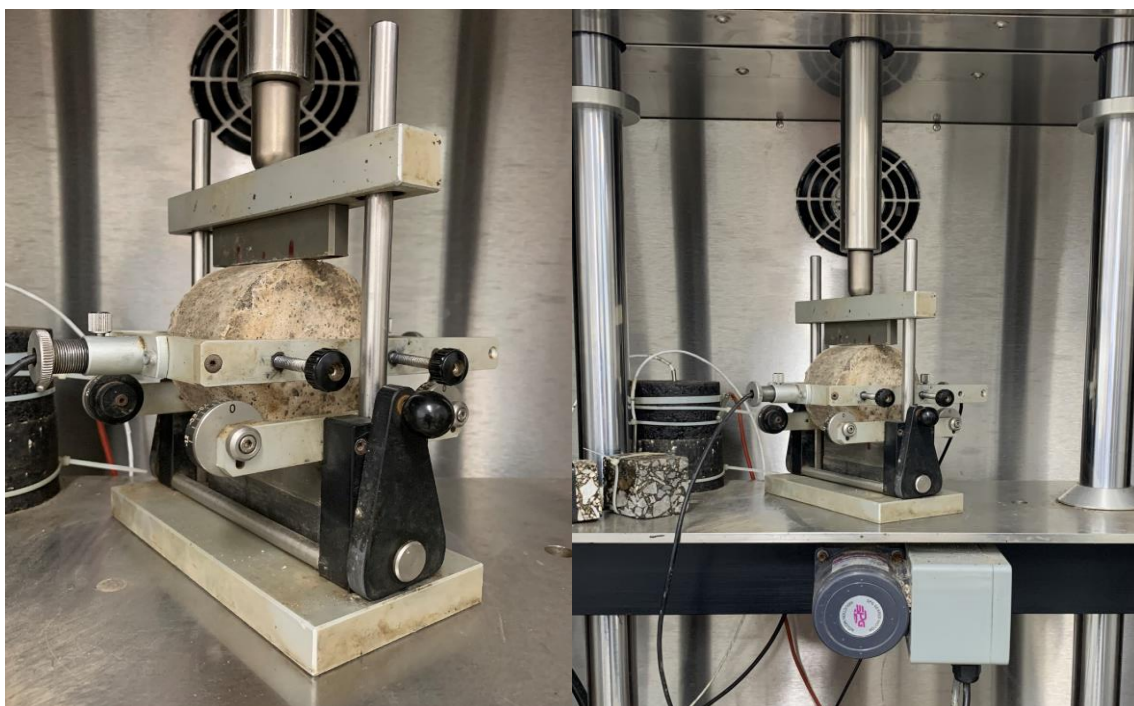
Moduł sztywności wyznaczany jest ze wzoru (6.6), a współczynnik Poissona z równania (6.7):

$$S_m = \frac{F \cdot (\nu + 0.27)}{z \cdot h} \quad (6.6)$$

$$\nu = 3.59 \cdot \frac{z}{\Delta V} - 0.27 \quad (6.7)$$

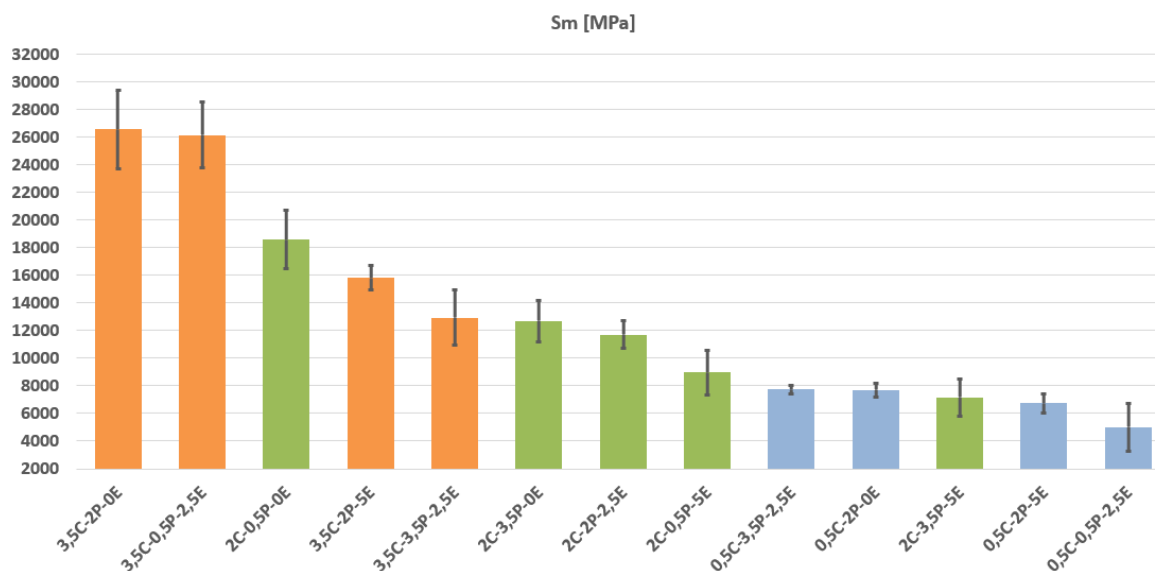
gdzie: S_m – moduł sztywności próbki [MPa]; F - maksymalna siła przyłożona do próbki [N]; ν – zależny od temperatury współczynnikiem Poissona; z - amplituda przemieszczenia poziomego próbki pod obciążeniem [mm]; h - grubość próbki [mm]; ΔV to maksymalne pionowe przemieszczenie próbki (odpowiadające maksymalnemu przemieszczeniu poziomemu) [mm].

Analiza wzoru (6.6) wskazuje, że wzrost odkształcenia poprzecznego i grubości próbki zmniejsza naprężenia wewnętrzne, a tym samym moduł sztywności S_m . Poniżej, na rysunku 6.10 przedstawiono badanie modułu sztywności, w schemacie pośredniego rozciągania (IT-CY) wykonane dla mieszanek MCE z modyfikatorem polimerowym RPP.



Rys. 6.10. Próbką w badaniu modułu sztywności, schemat pośredniego rozciągania IT-CY [Krasowski J.]

Zgodnie z obowiązującymi w Polsce wytycznymi [93], moduł sztywności w schemacie obciążenia IT-CY, należy sprawdzać w temperaturze +5°C. Z uwagi na zakres temperatury jakie może wystąpić w podbudowie drogowej [138] badania wykonano w temperaturze -10°C, 5°C, 13°C, 25°C oraz 50°C. Poniżej na rysunku 6.11 zestawiono średnie pomiary, wykonane w temperaturze 5°C.



Rys. 6.11. Wartości modułu sztywności w temperaturze 5°C (słupek błędu stanowi przedział ufności 95%)

Mieszanki MCE, które charakteryzują się najwyższymi wartościami modułu sztywności S_m , zawierają w swoim składzie cement w ilości 3,5%. Zarówno dodatek emulsji asfaltowej jak i RPP prowadzi do obniżenia modułu sztywności. Dla wykluczenia zjawiska przeszywnienia nawierzchni, zasadne wydaje się poszukiwania rozwiązań, które redukują sztywność mieszanki, bez negatywnego wpływu na inne właściwości. Wpływ poszczególnych składników zastosowanych w składzie mieszanki MCE, na analizowaną cechę przedstawiono w tabelicy 6.6. Wyniki przedstawiono z uwzględnieniem temperatury badania.

Tablica 6.6 Wpływ czynników na cechę: moduł sztywności IT-CY (-10°C, 5°C, 13°C, 25°C, 50°C)

	IT-CY -10°C; $R^2=0,96$		IT-CY 5°C; $R^2=0,97$		IT-CY 13°C; $R^2=0,96$	
	Wsp.	$p \leq 0,05$	Wsp.	$p \leq 0,05$	Wsp.	$p \leq 0,05$
Średnia/Stała	6733,6	0,000	2986,8	0,012	2683,2	0,008
(1)CEM[%](L)	6483,2	0,000	6487,4	0,000	6671,8	0,000
CEM[%](Q)	474,1	0,000	801,6	0,000	449,3	0,001
(2)EMU[%](L)	-858,8	0,005	-1140,8	0,003	-1909,0	0,000
EMU[%](Q)	42,1	0,335	111,8	0,044	156,1	0,001
(3)RPP[%](L)	2011,6	0,001	2305,1	0,002	1054,9	0,079
RPP[%](Q)	-377,5	0,003	-239,3	0,117	-228,6	0,075
1L wz.2L	-711,6	0,000	-652,0	0,000	-612,4	0,000
1L wz.3L	-1346,3	0,000	-1770,7	0,000	-1374,9	0,000
2L wz.3L	373,6	0,000	272,3	0,001	462,9	0,000

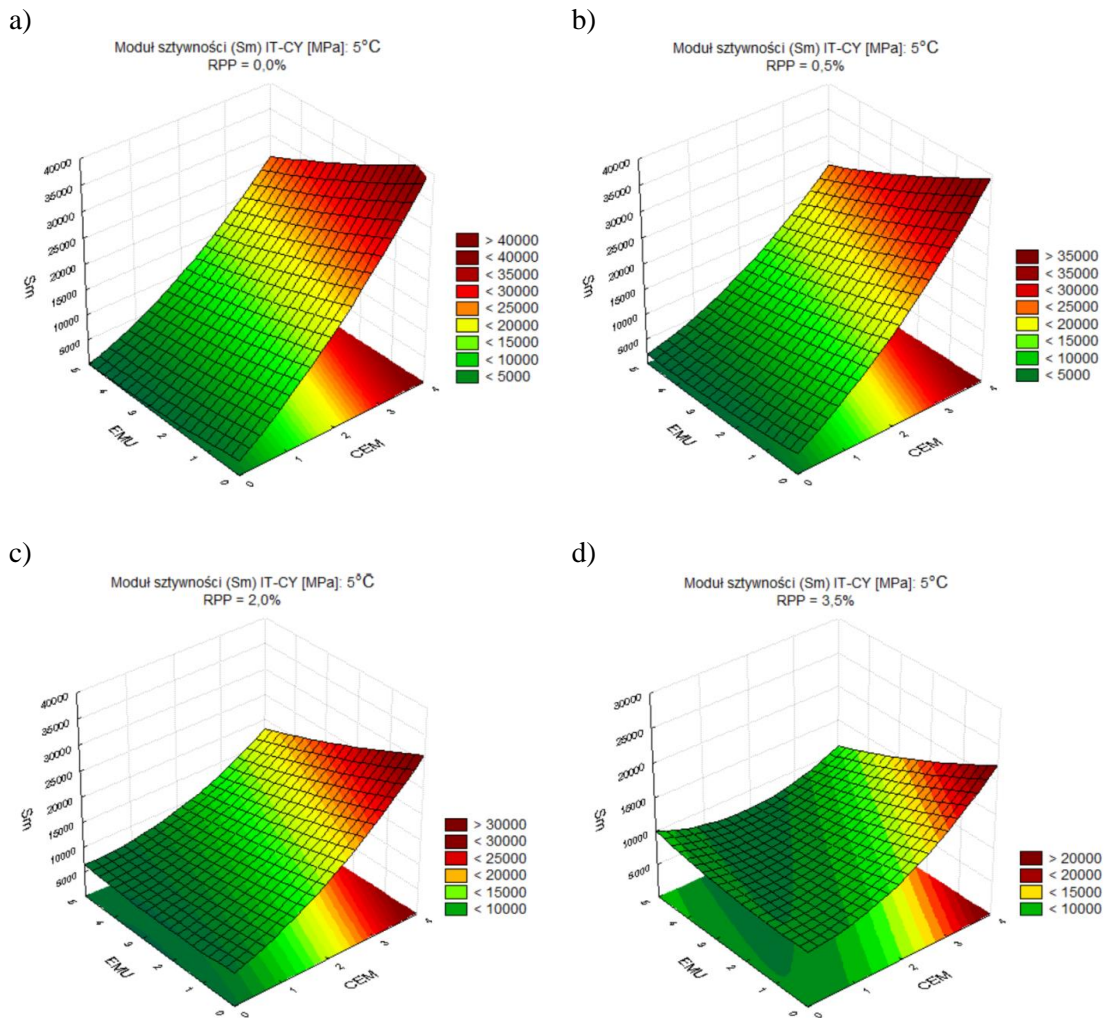
C.D. Tablica 6.6 Wpływ czynników na cechę: moduł sztywności IT-CY (-10°C, 5°C, 13°C, 25°C, 50°C)

	IT-CY 25°C; R ² = 0,96		IT-CY 50°C; R ² = 0,93	
	Wsp.	p≤0,05	Wsp.	p≤0,05
Średnia/Stała	2382,6	0,002	-2128,6	0,000
(1)CEM[%](L)	4285,6	0,000	4299,8	0,000
CEM[%](Q)	564,8	0,000	395,4	0,000
(2)EMU[%](L)	-1450,9	0,000	379,6	0,013
EMU[%](Q)	73,7	0,037	-60,7	0,008
(3)RPP[%](L)	-1242,0	0,007	-51,4	0,857
RPP[%](Q)	305,7	0,002	206,1	0,002
1L wz.2L	-291,9	0,000	-520,8	0,000
1L wz.3L	-1255,3	0,000	-1179,2	0,000
2L wz.3L	424,3	0,000	185,6	0,001

czerwonym kolorem zaznaczony czynniki o istotnym wpływie na rozpatrywaną cechę

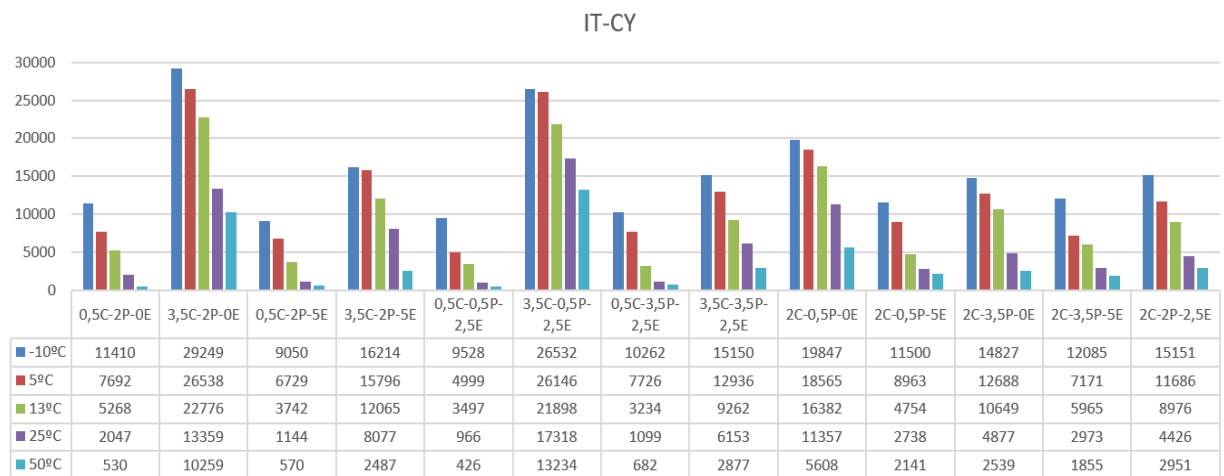
Współczynnik determinacji jaki uzyskano dla wyników badań w temp. 5°C jest równy R²=0,97. Oznacza to, że model matematyczne dobrze opisuje uzyskane wyniki. Uzyskane wartości modułu sztywności w temperaturze 5°C są obarczone błędem estymacji równym $\sqrt{1204,4}$. Cement jest czynnikiem silnie wpływającym na wzrost modułu sztywności. Znajduje to również odzwierciedlenie w publikacjach [139] [75]. Istotnym składnikiem w mieszance MCE jest zawartość RPP. Wpływ modyfikatora polimerowego prowadzi do obniżenia modułu sztywności, jednak siła oddziaływania jest trzykrotnie mniejsza od dominującego wiązania cementu. Warto zaznaczyć, jak istotna w mieszance jest zawartość cementu, polimeru oraz interakcja tych dwóch spoiw. **To ważne zjawisko, które z jednej strony pokazuje, że emulsja asfaltowa w mieszance MCE, może być zastąpiona mniejszą ilością redyspergowalnego proszku polimerowego przy tym samym efekcie końcowym, czyli redukcji modułu sztywności mieszanki.** Wyniki uzyskane w trakcie badań, pozwoliły na wykonanie wykresów, które przedstawiające zmiany modułu sztywności mieszanki, w zależności od ilości składników mieszanki MCE. Zestawiono je na rys. 6.12. Uzyskane wyniki zostały opisane przy pomocy wielomianu stopnia drugiego (6.8).

$$S_m = 2986,76 + 6487,44 * CEM + 801,57 * CEM^2 - 1140,81 * EMU + 111,79 * EMU^2 + 2305,07 * RPP - 239,29 * RPP^2 - 651,95 * CEM * EMU - 1770,72 * CEM * RPP - 272,30 * EMU * RPP \quad (6.8)$$



Rys. 6.12. Powierzchnia odpowiedzi dla parametru: moduł sztywności IT-CY w temp. (5°C), w aspekcie zawartości cementu portlandzkiego i zawartości emulsji asfaltowej przy: a) 0,0% RPP; b) 0,5% RPP; c) 2,0% RPP; d) 3,5% RPP

Wyniki pomiaru modułu sztywności zestawiono również w formie wykresu słupkowego na rysunku 6.13.

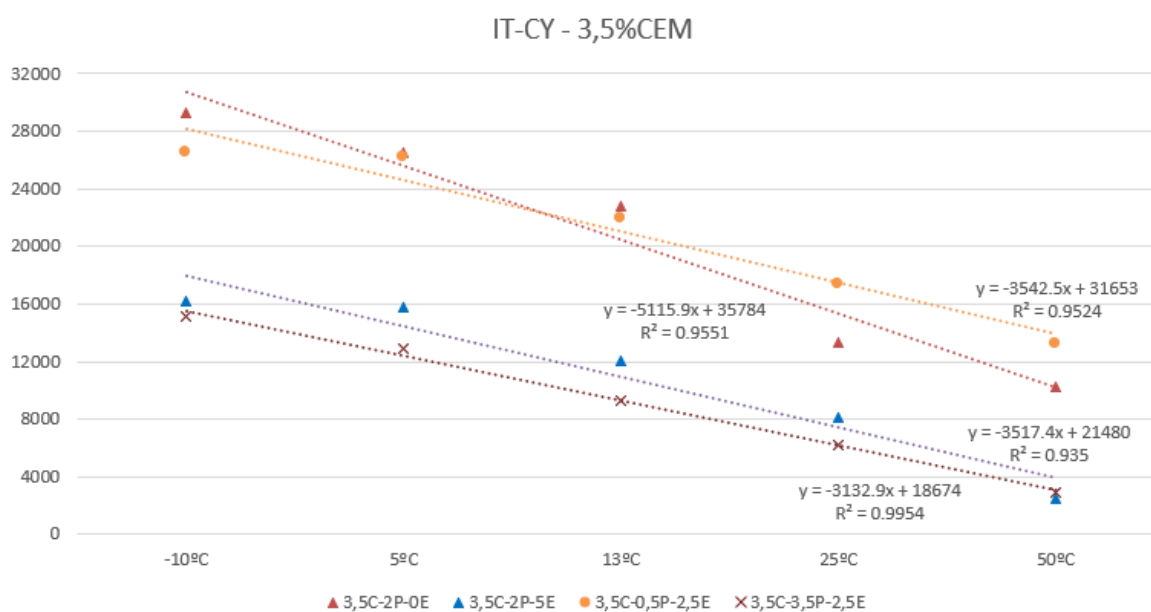


Rys. 6.13. Zmiana modułu sztywności w zależności od temperatury pomiaru

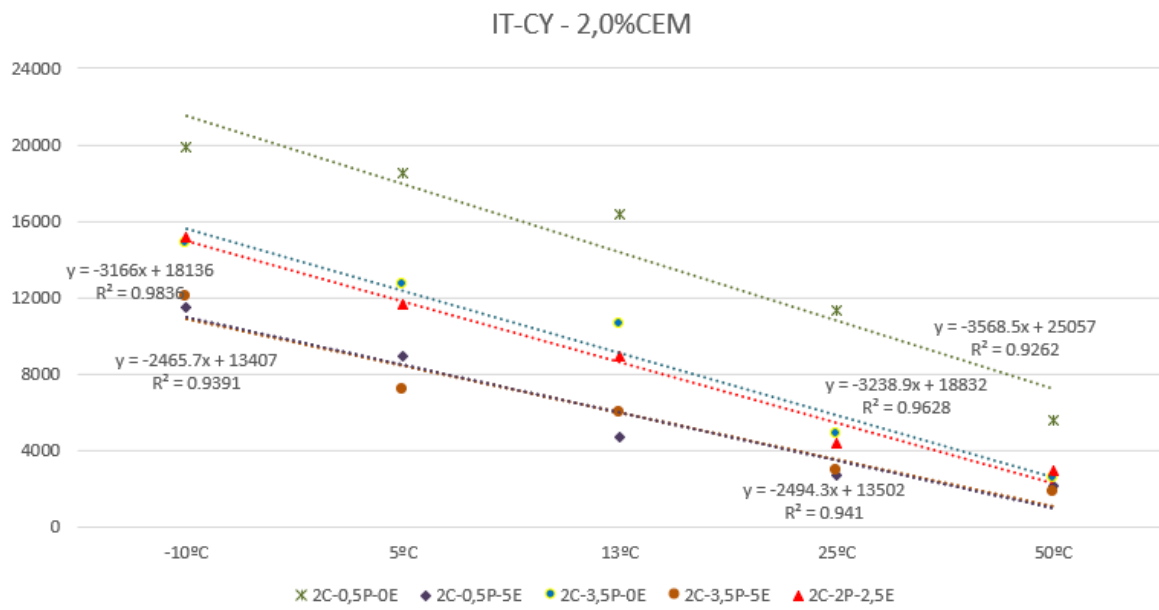
Najwyższy moduł sztywności, powyżej 30000 MPa, zaobserwowano dla mieszanek MCE, w której składzie zastosowano cement w ilości powyżej 2,5% oraz minimalną ilością emulsji asfaltowej. Mieszanki MCE z zawartością cementu w ilości do 0,5% charakteryzują się wartością modułu poniżej 5000 MPa. Wzrost zawartości modyfikatora polimerowego w mieszance MCE z 0,5% do 2,0%, powoduje wzrost modułu sztywności przy minimalnej zawartości cementu. Emulsja asfaltowa w ilości powyżej 2,0% w mieszance MCE wpływa na zmniejszenie jej modułu sztywności. Zwiększenie ilości polimeru w składzie mieszanki MCE do 3,5%, powoduje najsilniejszą redukcję modułu sztywności mieszanki. **Należy zaznaczyć, że wraz ze wzrostem temperatury pomiaru, obserwowany jest wzrost siły oddziaływania RPP na moduł sztywności mieszanki MCE.** Warto zaznaczyć, że poniżej ilości cementu 2,5%, sztywność mieszanki MCE nie zmienia się gwałtownie i pozostaje w przedziale 10000 – 15000 MPa. **Obecność modyfikatora RPP w mieszance MCE, powoduje redukcję modułu sztywności. Daje to możliwość zminimalizowania stosowanej emulsji asfaltowej.**

Moduł sztywności mieszanki MCE z modyfikatorem polimerowym RPP przedstawiono na rysunku 6.14 w formie funkcji liniowej, zmiany wartości od temperatury pomiaru. W tabelicy 6.7 zestawiono funkcje opisujące zmiany modułu sztywności mieszanki.

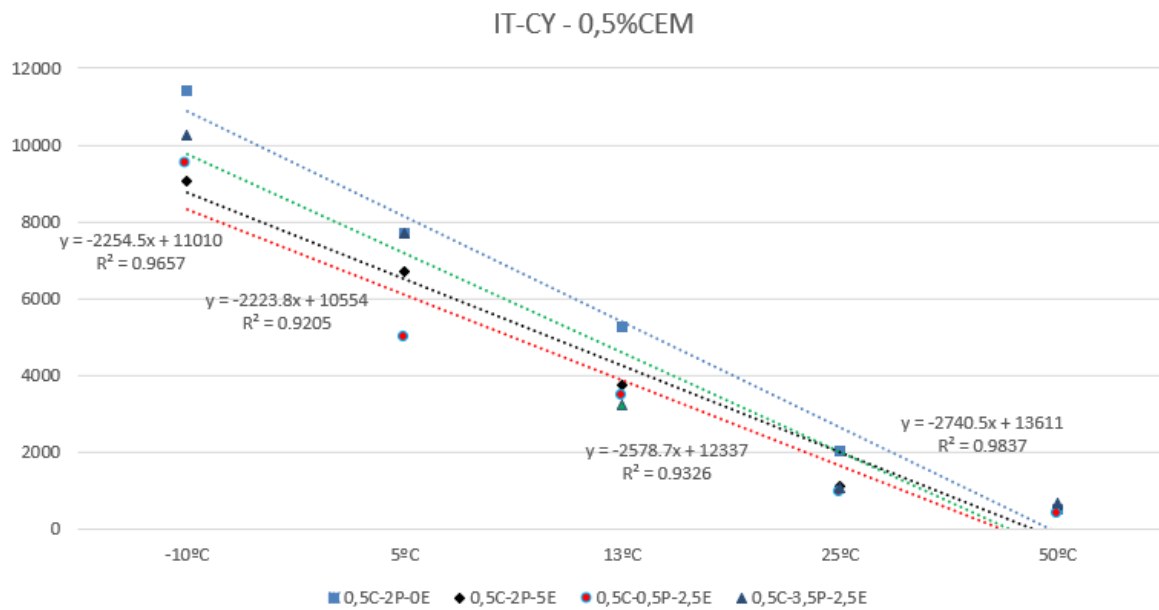
a)



b)



c)



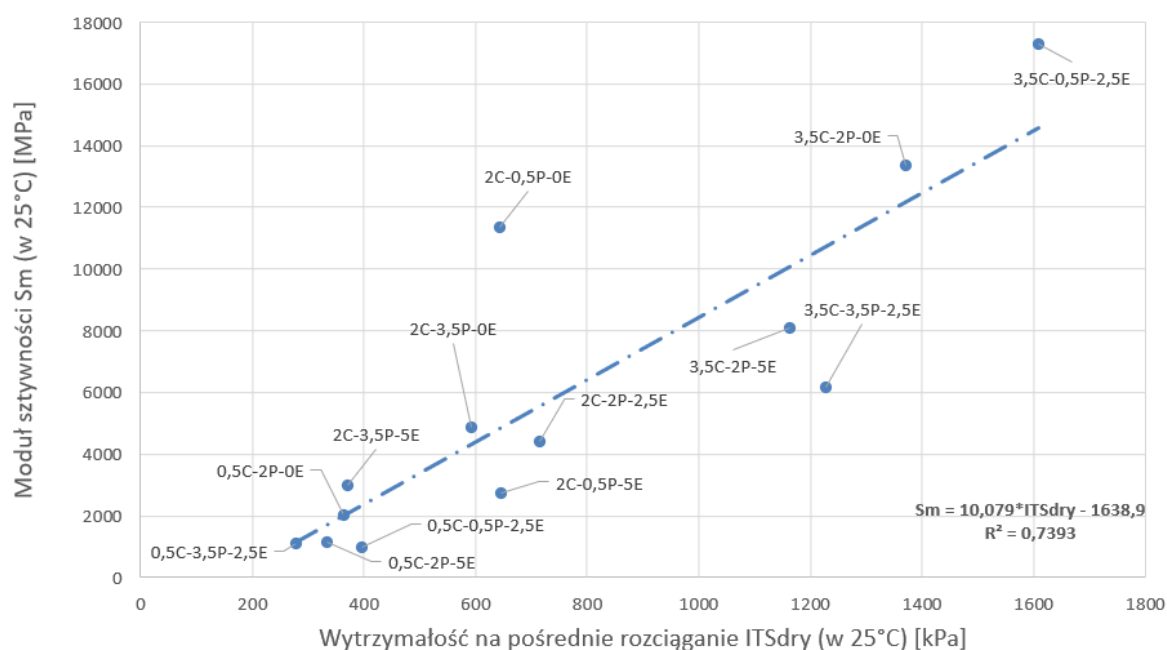
Rys. 6.14. Funkcja zmiany modułu sztywności dla mieszanek MCE: a) z CEM 3,5%, b) z CEM 2,0%, c) z CEM 0,5%

Tablica 6.7 Funkcja zmiany modułu sztywności mieszanki MCE w zależności od temperatury

Kod Mieszanki MCEP	R ²	a	b
0,5C-2P-0E	0,9837	-2740,5	13611
3,5C-2P-0E	0,9551	-5115,9	35784
0,5C-2P-5E	0,9657	-2254,5	11010
3,5C-2P-2,5E	0,9350	-3517,4	21480
0,5C-0,5P-2,5E	0,9205	-2223,8	10554
3,5C-0,5P-2,5E	0,9524	-3542,5	31653
0,5C-3,5P-2,5E	0,9326	-2578,7	12337
3,5C-3,5P-2,5E	0,9954	-3132,9	18674
2,0C-0,5P-0E	0,9262	-3568,4	25057
2,0C-0,5P-5E	0,9410	-2494,3	13502
2,0C-3,5P-0E	0,9628	-3238,9	18832
2,0C-3,5P-5E	0,9391	-2465,7	13407
2,0C-2P-2,5E	0,9836	-3166,0	18136

Z uzyskanych rezultatów przedstawionych w tablicy 6.7 oraz na rysunku 6.14 wynika, że funkcja liniowa dobrze opisuje zależność zmiany temperatury we wszystkich analizowanych mieszankach MCE. Najszybszy spadek modułu sztywności, przy wzroście temperatury, uzyskiwany jest przez mieszanki MCE o wysokiej zawartości cementu w składzie. Zwiększenie zawartości RPP w mieszance powoduje łagodniejsze zmiany modułu sztywności przy wzroście temperatury pomiaru. Podobnie dzieje się ze zmianą zawartości EMU w składzie podbudowy. Potwierdza się zatem, możliwość oddziaływania i redukcji modułu sztywności mieszanki MCE przez zastosowanie modyfikator RPP w składzie.

W celu określenia możliwości prognozy moduły sztywności za pomocą wytrzymałości na pośrednie rozciąganie, dokonano korelacji wyników S_m do ITS_{DRY} . Przedstawiono ją na rysunku 6.15.



Rys. 6.15. Zależność modułu sztywności S_m , od wytrzymałości na pośrednie rozciąganie ITS_{DRY}

Funkcja liniowa w zadowalający sposób opisuje zależności pomiędzy wytrzymałością na pośrednie rozciąganie, a modułem sztywności, dla mieszanek MCE z redyspergowalnym proszkiem polimerowym. Obydwie cechy mieszanki MCE wyznaczono w temp. 25°C. **Funkcja liniowa uzyskana z korelacji wytrzymałości na pośrednie rozciąganie i modułu sztywności, może pomóc w sprawnym prognozowaniu modułu sztywności mieszanki MCE. Wykonanie badanie wytrzymałości na pośrednie rozciąganie ITS_{DRY}, jest znacznie szybsze. Uzyskana korelacja wskazuje, że istnieje szansa, aby w prosty sposób poznać moduł sztywności analizowanej mieszanki MCE.**

6.3 Odporność na działanie czynników klimatycznych

Ocenę odporności na działanie czynników klimatycznych wykonano w zakresie dwóch wskaźników, tj. TSR, oraz ITS_R. Pierwszy parametr pozwala dokonać oceny wpływu wody (TSR) i jest standardowym wskaźnikiem wykorzystywanym do opisu zmiany właściwości mieszanki MCE [93] [140] [141]. Drugi wskaźnik stosowany jest w ocenie odporności na działanie wody i mrozu (ITS_R) w mieszankach mineralno-asfaltowych, został zapożyczony do oceny mieszanki MCE.

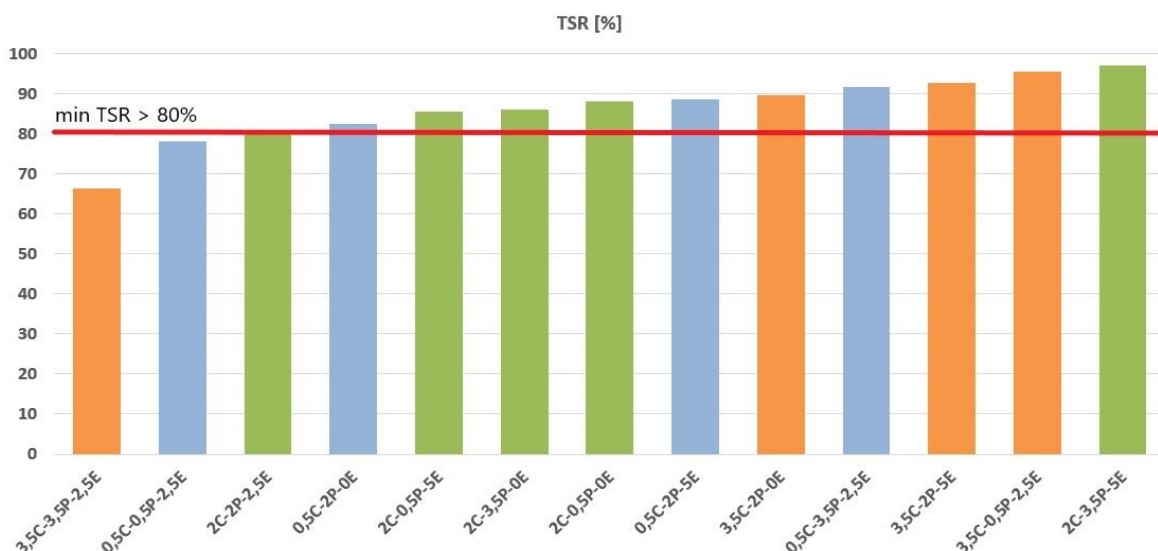
6.3.1 Odporność na działanie wody – TSR

Wskaźnik odporności na działanie wody (TSR) wyznaczono na podstawie oceny spadku wytrzymałości na pośrednie rozciąganie próbek poddanych 24 godzinnemu kondycjonowaniu w wodzie w temperaturze 25°C ±2°C w stosunku do próbek przechowywanych w warunkach powietrzno-suchych w 25°C. Próbki do badania zagęszczono w ubijaku Marshalla z częstotliwością 2x75 uderzeń zgodnie z normą PN-EN 12697-30 [132]. Wskaźnik oznaczono po 28 dniach od zagęszczenia, badania wytrzymałościowe wykonano w temperaturze 25°C ±2°C, wynik obliczono zgodnie ze wzorem 6.9.

$$TSR = \frac{ITS_{WET}}{ITS_{DRY}} \quad (6.9)$$

gdzie: TSR – odporność na działanie wody[%], ITS_{WET} – wytrzymałość na pośrednie rozciąganie w temperaturze 25°C próbek poddanych kondycjonowaniu [kPa], ITS_{DRY} – wytrzymałość na pośrednie rozciąganie w temperaturze 25°C próbek nie poddanych kondycjonowaniu [kPa].

Odporność na warunki klimatyczne, charakteryzuje mieszanki MCE, w zakresie oddziaływania wody. Średnie wartości odporności na działanie wody (TSR) zaprezentowano na rysunku 6.16.



Rys. 6.16. Wyniki badań parametru TSR dla mieszanek MCE

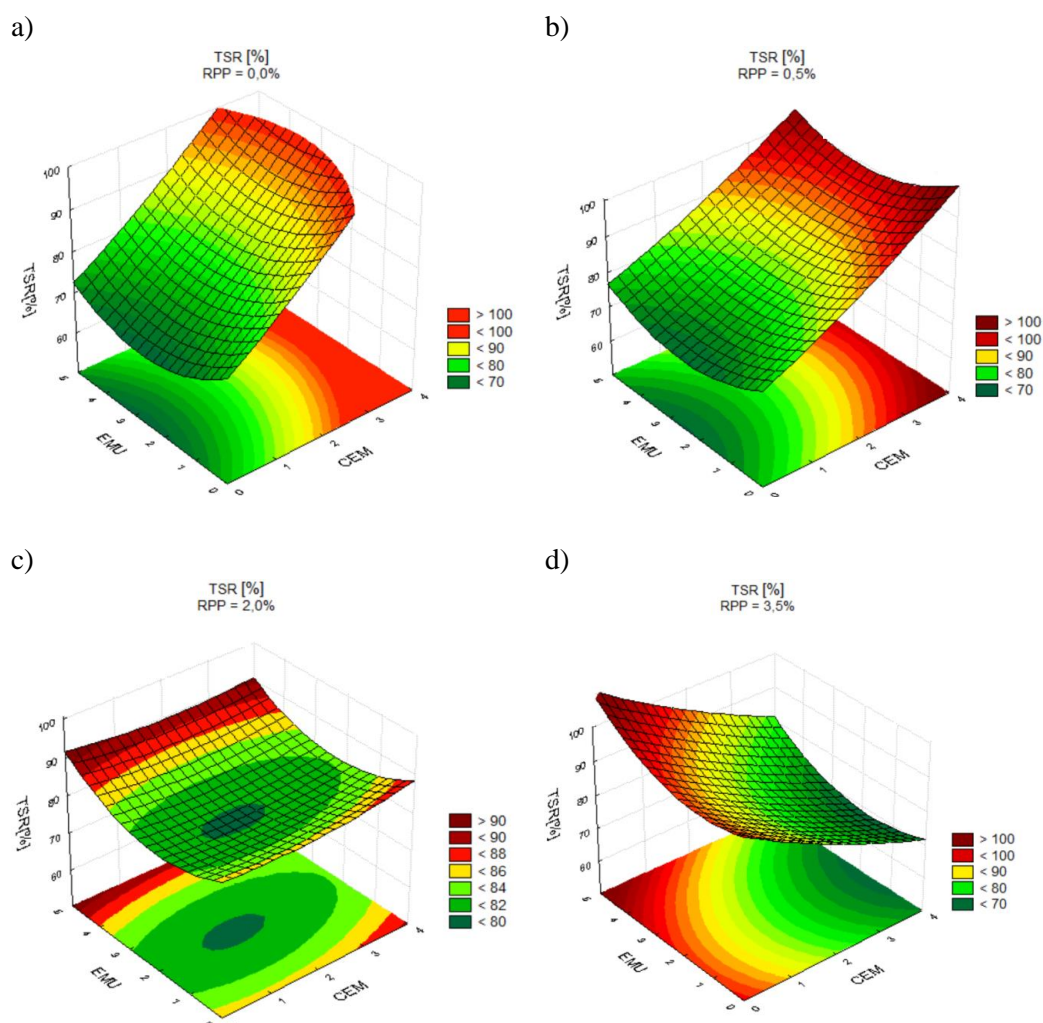
Tylko dla dwóch mieszanek MCE nie uzyskano wartości TSR $\geq 80\%$ określoną przez polskie wytyczne [93]. Większość analizowanych mieszanek MCE spełnia kryterium odporności na działanie wody (TSR). Jedynie mieszanki o kodzie 3,5C-3,5P-2,5E oraz 0,5C-0,5P-2,5E nie uzyskały wymaganej odporności na działanie wody powyżej 80%. Wpływ poszczególnych składników mieszanki na analizowaną cechę przedstawiono w tabelicy 6.8.

Tabela 6.8 Wpływ czynników na cechę: odporność na działanie wody TSR

	TSR: $R^2= 0,85$; Czysty błąd MS=41,92		
	t	Współczynnik	$p \leq 0,05$
Średnia/Stała	5,53	75,24	0,011
(1)CEM[%](L)	0,99	8,46	0,395
CEM[%](Q)	0,24	0,44	0,829
(2)EMU[%](L)	-1,48	-6,39	0,234
EMU[%](Q)	1,70	1,17	0,187
(3)RPP[%](L)	0,41	3,47	0,712
RPP[%](Q)	0,43	0,82	0,700
1L wz.2L	-0,23	-0,20	0,836
1L wz.3L	-3,31	-4,75	0,045
2L wz.3L	1,05	0,90	0,372

czerwonym kolorem zaznaczony czynniki o istotnym wpływie na rozpatrywaną cechę

Zgodnie z danymi, które przedstawiono w tabelicy 6.8, czynnikiem który istotnie wpływa na parametr TSR jest interakcja ilości cementu oraz proszku polimerowego. Zmiana ich udziału w składzie mieszanki MCE wpływa na zmianę wartości omawianego parametru TSR. Interakcja cementu z modyfikatorem polimerowym obniża wartość odporności na działanie wody TSR. Przygotowane zostały wykresy, które wskazują, jak zmiana ilości poszczególnych składników w mieszance MCE, wpływa na parametr TSR. Dane zestawiono na rysunku 6.17.



Rys. 6.17. Powierzchnia odpowiedzi dla parametru: odporność na działanie wody TSR w aspekcie zawartości cementu portlandzkiego i zawartości emulsji asfaltowej przy: a) 0,0% RPP; b) 0,5% RPP; c) 2,0% RPP; d) 3,5% RPP

Analiza wyników badań, zaprezentowanych na rysunku 6.17 w zakresie odporności na działanie wody TSR, pozwala na stwierdzenie, że zmiana ilości modyfikatora RPP w składzie mieszanki MCE, silnie wpływa na trwałość mieszanki MCE. Zastosowanie modyfikatora RPP w ilości od 0,0% do 0,5%, przy jednoczesnym zastosowaniu cementu w ilości 1,5%, gwarantuje uzyskanie wartości TSR powyżej 80%. Obecność emulsji asfaltowej w mieszance MCE, nie wywiera istotnego wpływu na zmianę odporności na działanie wody (TSR). Interesujące wyniki przedstawiona na rysunku 6.17c, który uwzględnia 2% proszku polimerowego w mieszance. **Wynika z niego, że przy obecności 2% modyfikatora w mieszance MCE, bez względu na zawartość cementu oraz emulsji asfaltowej, można uzyskać wynik TSR > 80%. Pozwala to spełnić polskie wymagania [93] dla dróg kategorii KR 1 – KR 4.** Zmiana ilości polimeru w mieszance do 3,5%, prowadzi do całkowitej zmiany kształtu wykresu, który wskazuje na znaczną zmianę analizowanej odporności na działanie wody (TSR). Dla 3,5% RPP w mieszance MCE, wartości TSR większe od 80%, uzyskiwane są dla mieszanek zawierających do 2% cementu w swoim składzie. **Z uzyskanych wyników i ich analizy wynika, że najkorzystniejszym wariantem jest dozowanie**

do 2% modyfikatora polimerowego w mieszance MCE, dla uzyskania optymalnych wartości odporności na działanie wody TSR.

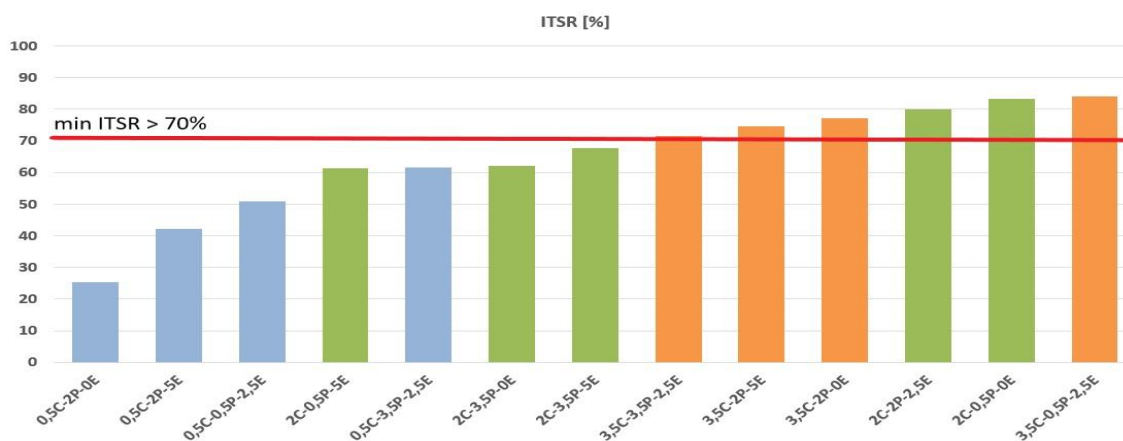
6.3.2 Odporność na działanie wody i mrozu – ITSR

Badanie odporności na działanie wody i mrozu wykonano zgodnie z wymaganiami normy wg PN-EN 12697-12 [99] oraz z zapisami wytycznych [100]. Próbki do badania zagęszczono w ubijaku Marshalla PN-EN 12697-30 [132], z energią 2x35 uderzeń. W celu oznaczenia wskaźnika ITSR próbki poddano kondycjonowaniu w wodzie oraz 1 cyklowi zamrażania. Jako wartość oczekiwaną parametru ITSR przyjęto poziom powyżej 70%. Z uwagi na zalecany poziom 80% odporności na działanie wody, dla wody i mrozu (kondycjonowanie w ujemnych temperaturach) przyjęto 70%. Wskaźnik oznaczono na próbkach po 28 dniach pielęgnacji od momentu zagęszczenia próbek w laboratorium. Badanie wytrzymałości na pośrednie rozciąganie wykonano w temperaturze $25^{\circ}\text{C}\pm 1^{\circ}\text{C}$, a wynik wskaźnika ITSR, obliczono zgodnie ze wzorem 6.10.

$$ITSR = \frac{ITSR_{WET}}{ITS_{DRY}} \quad (6.10)$$

gdzie: $ITSR$ – odporność na działanie wody i mrozu [%], $ITSR_{WET}$ – wytrzymałość na pośrednie rozciąganie w temperaturze 25°C próbek poddanych kondycjonowaniu [kPa], ITS_{DRY} – wytrzymałość na pośrednie rozciąganie w temperaturze 25°C próbek nie poddanych kondycjonowaniu [kPa].

Uzyskane wyniki badań odporności na działanie wody i mrozu (ITSR) przedstawione na rysunku 6.18. Najwyższą wartością odporności na działanie wody oraz mrozu charakteryzują się mieszanki o wysokiej sztywności, czyli mieszanki MCE zawierające 3,5% cementu portlandzkiego. Rezultaty powyżej 70% uzyskały również dwie mieszanki zawierające 2% cementu oraz sumaryczną ilość emulsji asfaltowej oraz modyfikatora polimerowego nie większą niż 3,5%. Należy zauważyć, że mieszanka 3,5C-0,5P-2,5EMU posiada wyższą odporność na działanie wody i mrozu, o około 11%, od mieszanki 3,5C-3,5P-2,5EMU. Istotny jest odpowiedni dobór proporcji środków wiążących do mieszanki MCE.



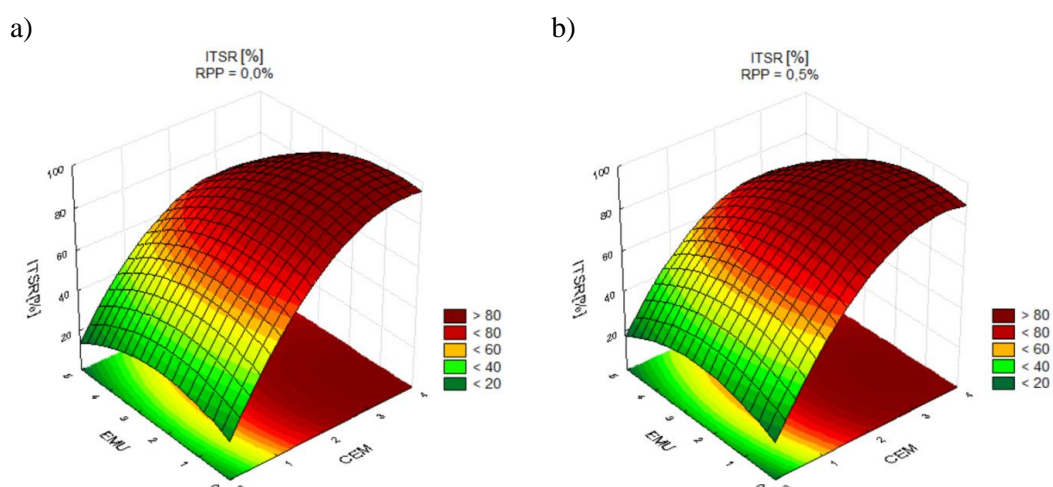
Rys. 6.18. Wyniki badań parametru ITSR wg planu eksperymentu

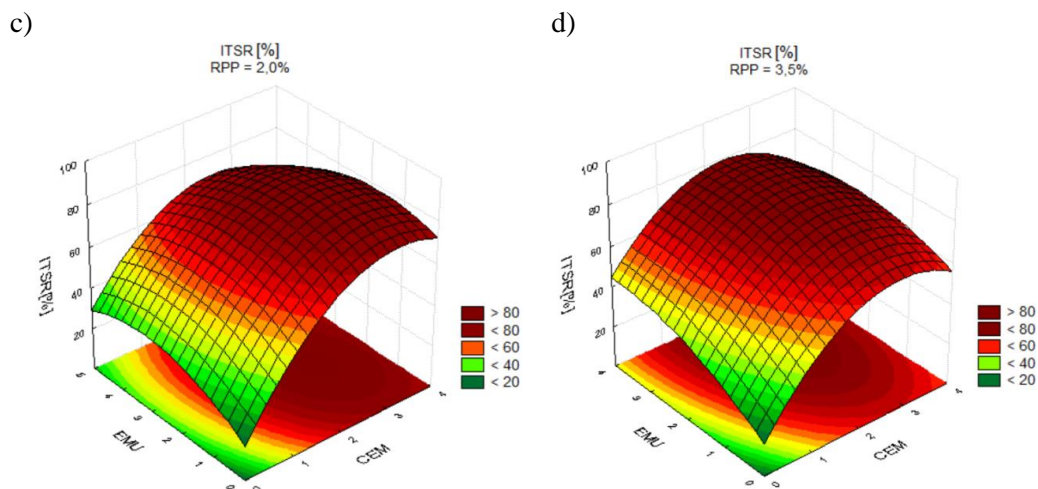
Mieszanki o najniższych wartościach parametru ITSR to te, które zawierają minimalną ilość cementu portlandzkiego, tj. 0,5%. Z badań wynika, że dla uzyskania odpowiednich rezultatów konieczna jest odpowiednio wysoka zawartość cementu w mieszance, jak i udział procentowy modyfikatora polimerowego RPP. Wpływ składników mieszanki MCE na analizowany parametr ITSR zestawiono w tabelicy 6.9. Współczynnik determinacji jaki został uzyskany dla analizowanych wyników opisanych przez wielomian stopnia drugiego jest równy $R^2=0,90$.

Tablica 6.9 Wpływ czynników na cechę: odporność na działanie wody i mrozu ITSR

	ITSR; $R^2= 0,90$; Czysty błąd MS=116,47		
	t	Współczynnik	$p \leq 0,05$
Średnia/Stała	0,85	19,26	0,458
(1)CEM[%](L)	3,00	42,84	0,058
CEM[%](Q)	-1,87	-5,95	0,157
(2)EMU[%](L)	1,15	8,24	0,334
EMU[%](Q)	-1,64	-1,88	0,199
(3)RPP[%](L)	-0,11	-1,59	0,918
RPP[%](Q)	0,06	0,19	0,955
1L wz.2L	-0,90	-1,31	0,430
1L wz.3L	-1,08	-2,59	0,359
2L wz.3L	1,28	1,84	0,291

Siła oddziaływania redyspergowalnego proszku polimerowego na mieszankę MCE maleje, w wyniku wymywania cząstek polimeru. Nie bez znaczenia jest również temperatura badania, oraz kondycjonowanie próbek. Oddziaływanie proszku polimerowego ujawnia się w wyższych temperaturach otoczenia, stąd mniejsza aktywność przy temperaturze poniżej zera stopni Celsjusza. Wskazuje to m.in. analiza modułu sztywności mieszanki MCE z modyfikatorem polimerowym. Również dla parametru ITSR wykonane zostały wykresy, które obrazują, jak zmiana poszczególnych spoiw w mieszance MCE, zmienia omawiany parametr. Dane zestawiono na rysunku 6.19.





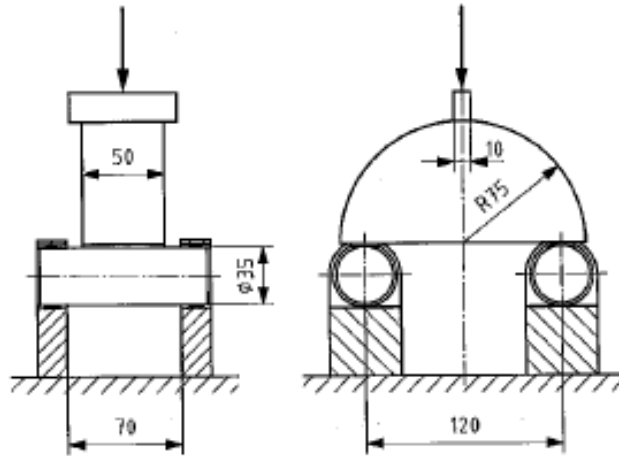
Rys. 6.19. Powierzchnia odpowiedzi dla parametru: odporność na działanie wody i mrozu ITSR, w aspekcie zawartości cementu portlandzkiego i zawartości emulsji asfaltowej przy: a) 0,0% RPP; b) 0,5% RPP; c) 2,0% RPP; d) 3,5% RPP

Wykresy powierzchni odpowiedzi dla mieszanki MCE, przedstawiające wyniki odporności na działanie wody i mrozu (ITSR), obejmują szeroki przedział wartości. Udział procentowy składników znacząco wpływa na trwałość podbudowy wykonanej z mieszanki MCE. **Mieszanki MCE o najwyższej odporności na działanie wody i mrozu to takie, w których zawartość cementu jest powyżej 2%. Dla takiej wartości parametr ISTR osiąga wartości powyżej 70%.** Wzrost zawartości emulsji asfaltowej oraz modyfikatora polimerowego w mieszance nieznacznie wpływa na parametr ITSR.

6.4 Ocena wpływu modyfikatora polimerowego na odporność na pękanie mieszanki MCE

Dla prawidłowej pracy konstrukcji nawierzchni, istotne jest, aby mieszanka zastosowana w warstwie wykazywała odpowiednią odporność na pękanie. Mając na uwadze obecne doświadczenia mieszanki związanych spoiwem hydraulicznym, narażone są na występowanie spękań, które propagują aż do warstwy ścieralnej. Istotnym elementem prowadzonych badań, jest ocena wpływu modyfikatora polimerowego na odporność na pękanie mieszanki MCE.

W badaniu wykorzystano klasyczną metodę badania SCB (Semi Circular Beam), wykorzystywaną do oceny odporności na pękanie mieszanek minealno-asfaltowych. Badanie przeprowadzono na próbkach półwałcowych, z wykonanym karbem o głębokości 10 mm i szerokości 1 mm. Próbkę zagęszczono w prasie żyratorowej zgodnie z wymaganiami normy PN-EN 12697-31 [102], do gęstości gwarantującej uzyskanie wskaźnika zagęszczenia 98-100%. Parametry karbu zastosowano zgodnie z propozycją autorów [57]. Próbkę poddawano trzypunktowemu badaniu odporności na zginanie w taki sposób, aby środkowa część podstawy próbki do badania została poddana działaniu naprężenia rozciągającego. Podczas badania odkształcenie zwiększa się w stałym tempie 5 mm/min. Odpowiadający mu nacisk zwiększa się do wartości maksymalnej F_{max} , która jest bezpośrednio powiązana z odpornością na pękanie próbki. Na rysunku 6.20 pokazano schemat ramy do badania.



Rys. 6.20. Rama do badania SCB - schemat normowy [142]

Pośrodku próbki wycięto ryse (karb) N o nominalnej szerokości równej $1,0 \pm 0,10$ mm i głębokości równej $10,0 \pm 1,0$ mm. Próbkę poddawano badaniu w temperaturze 0°C oraz 20°C . Przed badaniem próbki umieszczono w komorze klimatycznej w temperaturze jak w badaniu na co najmniej 4 h. W ramach badania wyznaczono wielkości, które obliczono zgodnie z wymaganiami normy PN-EN 12697-44 [142] oraz analizą literatury [143]. Próbkę z naciętym karbem przedstawiono na rysunku 6.21.



Rys. 6.21. Półkolista próbka z karbem [Krasowski J.]

Z wyników badań obliczono odkształcenie przy maksymalnej sile, ϵ_{\max} , w oparciu o wzór 6.11.

$$\epsilon_{\max,i} = \frac{\Delta W_i}{W_i} \times 100\% \quad (6.11)$$

gdzie: W_i – to wysokość próbki [mm], ΔW_i – to pionowe odkształcenie przy maksymalnej sile w [mm].

Obliczono maksymalne naprężenie w momencie uszkodzenia, $\sigma_{\max,i}$, w oparciu o wzór 6.12.

$$\sigma_{max,i} = \frac{F_{max,i}}{D_i \cdot t_i} \left[\frac{N}{mm^2} \right] \quad (6.12)$$

gdzie: D_i – średnica próbki [mm], t_i – grubość próbki [mm], $F_{max,i}$ – maksymalna siła próbki [N].

Obliczono odporność na pękanie, K_{Ic} , próbki i ($i = 1, 2, 3, 4$), w oparciu o wzór 6.13.

$$K_{Ic,i} = \sigma_{max,i} \cdot Y \cdot \sqrt{\pi \cdot a_1} \quad [N/mm^{3/2}] \quad (6.13)$$

gdzie: a_1 – to głębokość rysy próbki [mm], $\sigma_{max,i}$ – naprężenie niszczące próbkę [$N/mm^{3/2}$], Y – znormalizowany współczynnik naprężenia zgodny ze wzorem 6.14.

$$Y = 4,782 - 1,219 \cdot \left(\frac{a_i}{r_i} \right) + 0,063 \exp \left(7,045 \cdot \left(\frac{a_i}{r_i} \right) \right) \quad (6.14)$$

Należy podkreślić, że ocena odporności na pękanie mieszanek mineralno-cementowych z emulsją asfaltową jest istotna z punktu widzenia trwałości konstrukcji nawierzchni drogowej. Mieszanki MCE narażone są na pękanie wynikające z uszkodzeń w postaci pęknięć odbitych, które mogą przenieść się na górne warstwy z mieszanek mineralno-asfaltowych. Dlatego też celowym działaniem będzie poszukiwanie rozwiązań, które spowodują zwiększenie odporności mieszanek MCE na pękanie. Na rysunku 6.22 przedstawiono moment badania próbki.



Rys. 6.22. Badanie SCB (Semi Circular Beam)

W pracy ocenie poddano następujące cechy mieszanki MCE z modyfikatorem polimerowym:

- Odkształcenie przy maksymalnej sile ε_{\max} ,
- Odporność na pękanie K_{Ic} ,
- Wskaźnik pęknięć P.

6.4.1 Odkształcenia przy maksymalnej sile ε_{\max}

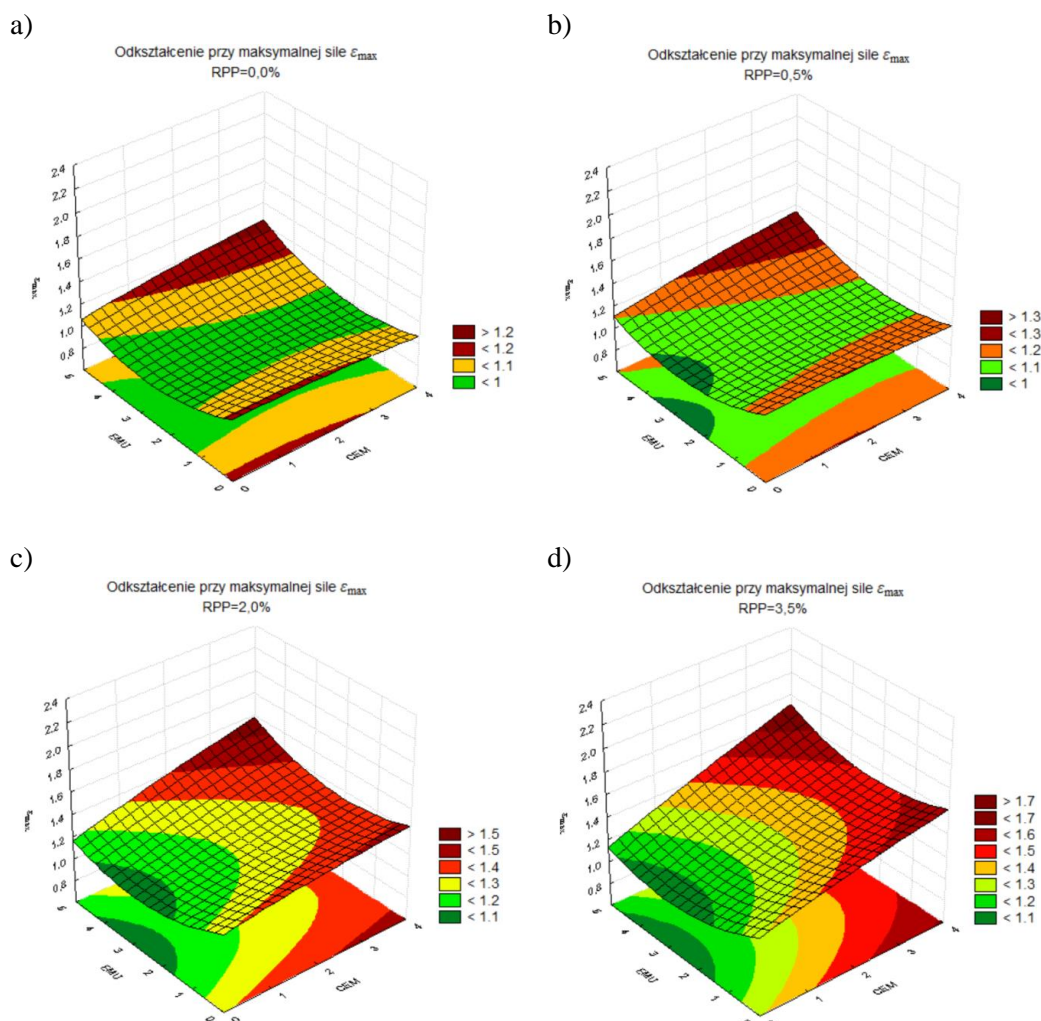
Badanie wykonano dla dwóch temperatur pomiarowych, tj. 0°C oraz 20°C. Dla uzyskanych wyników w niższej temperaturze, współczynnik determinacji, opisujący dopasowanie modelu do uzyskanych wyników z badań, wynosi $R^2=0,30$, natomiast dla temperatury pomiaru 20°C, R^2 równy jest 0,44. Niski poziom dopasowania wynika z małego rozstępu wyników badań. W Tabelicy 6.10 przedstawiono wpływ poszczególnych składników spoiwa na analizowany parametr recyklowanej mieszanki MCE.

Tabelica 6.10 Wpływ czynników na cechę: Odkształcenie przy maksymalnej sile ε_{\max}

	ε_{\max} 0°C; $R^2= 0,30$; Czysty błąd MS=0,26		ε_{\max} 20°C; $R^2= 0,44$; Czysty błąd MS=0,39	
	Współczynnik	p≤0,05	Współczynnik	p≤0,05
Średnia/Stała	1,14	0,000	1,41	0,000
(1)CEM[%](L)	0,00	0,981	0,25	0,180
CEM[%](Q)	0,00	0,843	0,03	0,521
(2)EMU[%](L)	-0,15	0,020	-0,10	0,315
EMU[%](Q)	0,03	0,005	0,02	0,263
(3)RPP[%](L)	0,12	0,352	-0,89	0,000
RPP[%](Q)	-0,02	0,425	0,23	0,000
1L wz.2L	0,01	0,379	-0,02	0,247
1L wz.3L	0,03	0,231	-0,07	0,042
2L wz.3L	-0,01	0,742	0,07	0,001

czerwonym kolorem zaznaczony czynniki o istotnym wpływie na rozpatrywaną cechę

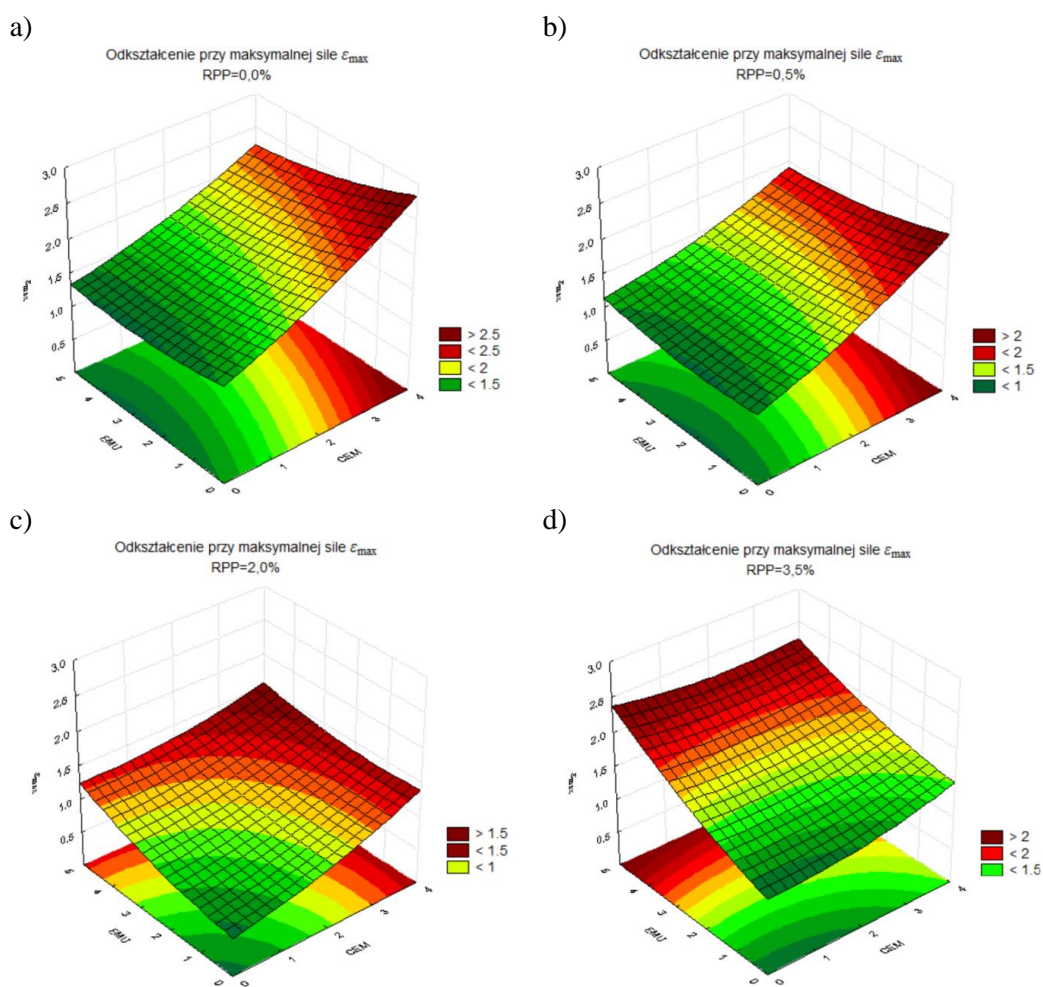
Rozpatrywany parametr jest istotny z punktu widzenia pracy podbudowy drogowej. Informuje, jak duże odkształcenie może wystąpić w podbudowie, do momentu wystąpienia pęknięcia. Badania wskazały, że czynnikiem, który w największym stopniu wpływa na odkształcenie przy maksymalnej sile, jest zawartość modyfikatora RPP w mieszance MCE, dla pomiaru w temperaturze 20°C. **Wzrost ilości modyfikatora, powoduje możliwość większego odkształcenia. Jest to niezwykle pożądana cecha w podbudowach drogowych.** Dla bezpiecznej pracy konstrukcji nawierzchni drogowej, zwłaszcza w przypadku niskich temperatur, korzystne jest ograniczenie cementu na rzecz polimeru. Pozwoli to zminimalizować ryzyko wystąpienia spękań odbitych. Wyniki uzyskane w trakcie przeprowadzonych badań, posłużyły do wygenerowania powierzchni odpowiedzi, które przedstawiają zmiany odkształcenie przy maksymalnej sile ε_{\max} mieszanki MCE. Wyniki dla temperatury pomiaru 0° przedstawiono na rysunku 6.23.



Rys. 6.23. Powierzchnia odpowiedzi dla parametru: odkształcenie przy maksymalnej sile ϵ_{\max} w temp. 0°C w aspekcie zawartości cementu portlandzkiego i zawartości emulsji asfaltowej przy: a) 0,0% RPP; b) 0,5% RPP; c) 2,0% RPP; d) 3,5% RPP

Wartość odkształcenia do momentu zniszczenia w mieszance MCE zależy od zawartości środków wiążących. Wyniki odkształcenia przy pękaniu dla temperatury pomiaru 0°C , kształtują się w przedziale od około 1,0 % do 1,7 %. Największe wartości odkształcenia uzyskiwane są dla mieszanek z maksymalną ilości modyfikatora polimerowego w składzie, tj. 3,5%. **Zmiana zawartości modyfikatora z 0,5% do 2,0% prowadzi do wzrostu możliwości odkształcenia o około 15%. Wzrost ilości modyfikatora RPP z 0,0% do 3,5% pozwala uzyskać odkształcenie wyższe o około 30%.** Kluczowy zatem wydaje się dobór ilości modyfikatora polimerowego oraz cementu w mieszance MCE, dla uzyskania korzystnych wartości odkształcenia do momentu zniszczenia, oraz minimalizacji ryzyka wystąpienia spękań odbitych. Zasadne wydaje się dozowanie modyfikatora RPP w ilości powyżej 2,0%. Podobne zależności w zakresie modyfikacji składu mieszanek związanych cementem (CBGM) za pomocą redyspersywalnego proszku polimerowego EVA zaprezentowano w pracy [86].

Korzystając z wielomianu stopnia drugiego, wygenerowane zostały dane, które posłużyły do przedstawienia zmiany odkształcenie przy maksymalnej sile ϵ_{\max} mieszanki MCE, w zależności od ilości analizowanych środków wiążących w mieszance dla temperatury 20°C . Przedstawiono je na rysunku 6.24.



Rys. 6.24. Powierzchnia odpowiedzi dla parametru: Odształcenie przy maksymalnej sile ϵ_{\max} w temp. 20°C w aspekcie zawartości cementu portlandzkiego i zawartości emulsji asfaltowej przy: a) 0,0% RPP; b) 0,5% RPP; c) 2,0% RPP; d) 3,5% RPP

Analizując odkształcenie przy pęknięciu ϵ_{\max} w temperaturze 20°C należy zaznaczyć, że wyniki kształtują się w przedziale od około 1,0 % do ponad 2,5 %. Najwyższe wartości uzyskiwane są dla mieszanek z maksymalną ilości cementu. **Zwiększanie ilości modyfikatora RPP z 2,0% do 3,5% powoduje wzrost możliwości odkształcenia w podbudowie do wartości ponad 2,0%**. Dla mieszanek MCE, które zawierają 3,5% redyspergowalnego proszku polimerowego, najwyższe wartości uzyskiwane są przy maksymalnej ilości cementu oraz emulsji asfaltowej. Istotne zatem wydaje się zoptymalizowanie składu i ilości spoiw w podbudowie wykonywanej z mieszanki MCE, dla uzyskania jak najlepszych parametrów materiału.

6.4.2 Odporność na pękanie K_{Ic}

Parametrem, który również opisuje odporność na pękanie mieszanki MCE, jest **wskaźnik K_{Ic}** . Ocenę odporności na pękanie wykonano dla mieszanek MCE będących przedmiotem eksperymentu w dwóch temperaturach 0°C oraz 20°C. Współczynnik determinacji jaki uzyskano dla modelu matematycznego w postaci wielomianu stopnia drugiego opisującego uzyskane wyniki badań w temperaturze 0°C wynosi $R^2=0,67$ natomiast dla 20°C, $R^2=0,55$.

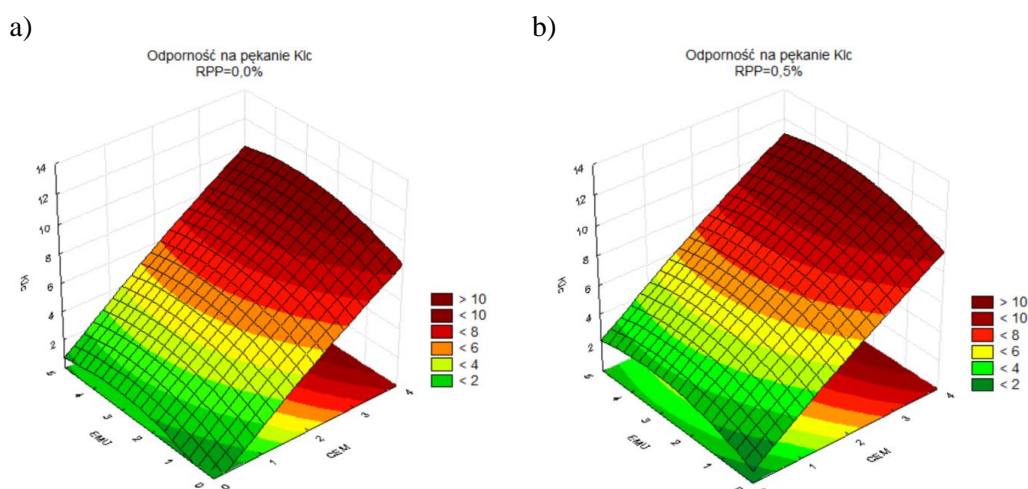
Dane przedstawione w tabelicy 6.11, która to prezentuje wpływ poszczególnych składników mieszanki MCE z modyfikatorem polimerowym RPP na analizowany parametr.

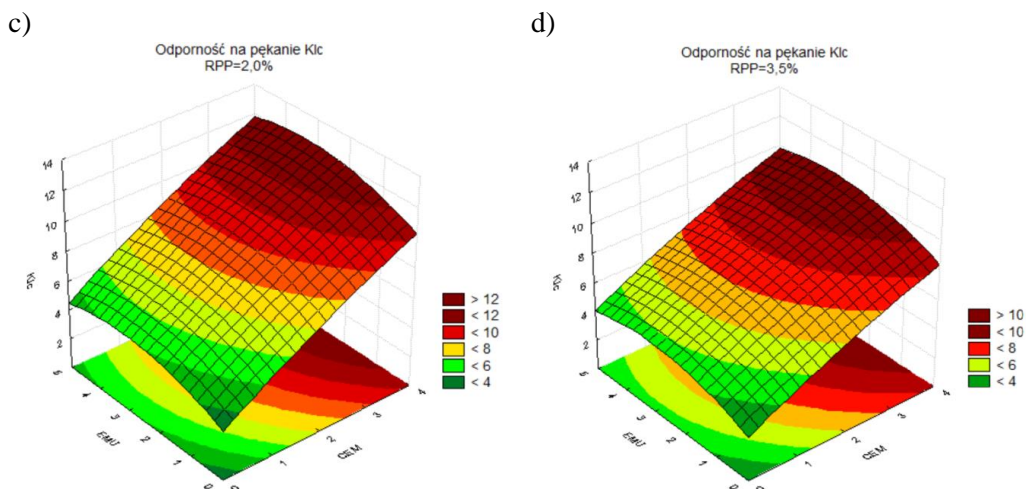
Tabela 6.11 Wpływ czynników na cechę: Odporność na pękanie K_{Ic}

	K_{Ic} 0°C; $R^2= 0,67$; Czysty błąd MS=1,17		K_{Ic} 20°C; $R^2= 0,55$; Czysty błąd MS=1,02	
	Współczynnik	$p \leq 0,05$	Współczynnik	$p \leq 0,05$
Średnia/Stała	-0,64	0,483	-0,95	0,232
(1)CEM[%](L)	2,59	0,000	3,05	0,000
CEM[%](Q)	-0,08	0,494	-0,43	0,000
(2)EMU[%](L)	1,14	0,000	1,34	0,000
EMU[%](Q)	-0,17	0,000	-0,28	0,000
(3)RPP[%](L)	3,22	0,000	0,55	0,261
RPP[%](Q)	-0,63	0,000	0,23	0,028
1L wz.2L	0,01	0,795	0,29	0,000
1L wz.3L	-0,26	0,016	-0,31	0,001
2L wz.3L	-0,01	0,838	-0,23	0,000

czerwonym kolorem zaznaczony czynniki o istotnym wpływie na rozpatrywaną cechę

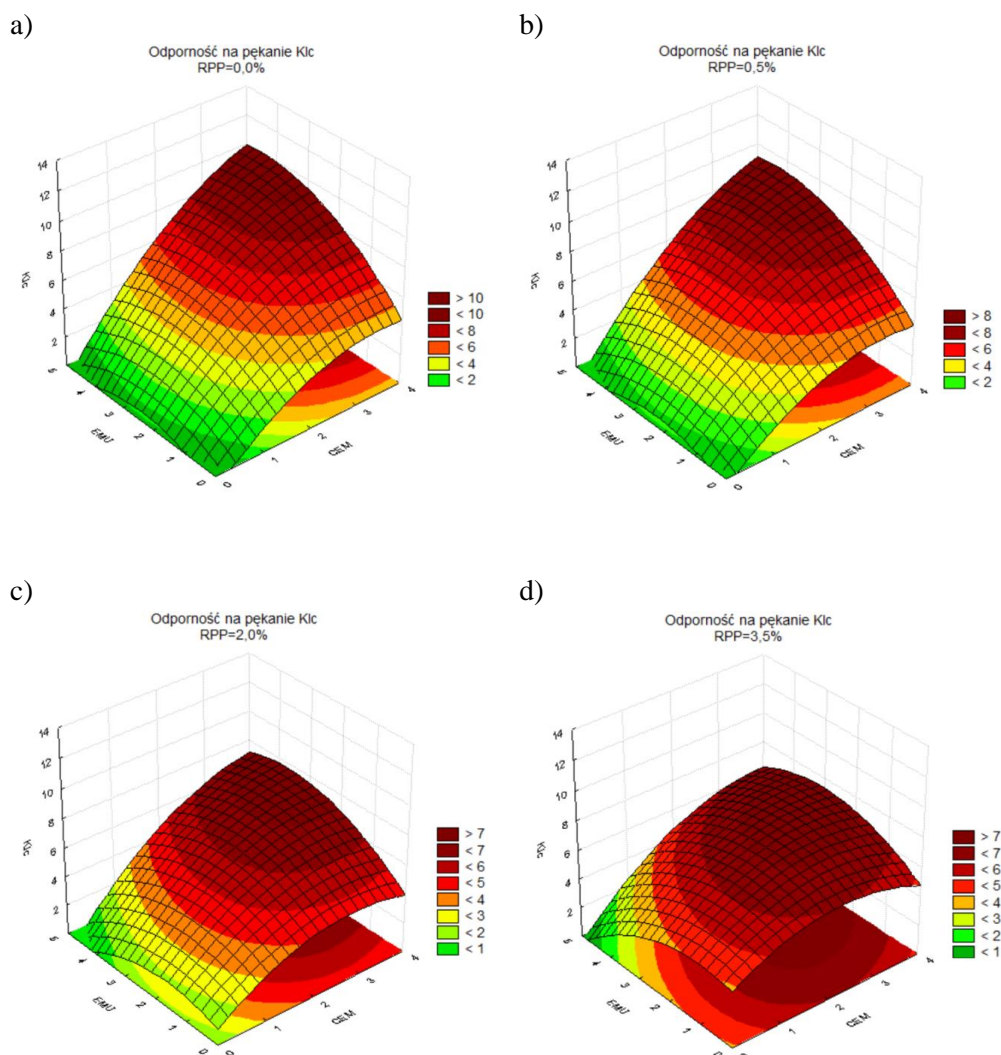
Badania w temperaturze 0 °C wykazały wpływ środków wiążących oraz modyfikatora na parametr odporność na pękanie K_{Ic} . Wzrost zawartości cementu, w znacznym stopniu prowadzi do wyższej odporności na pękanie. Znaczenie ma siła kohezji składników wywołana wiązaniami hydraulicznymi pochodzącymi ze spoiwa. Potwierdzają to wyniki badań przedstawione w pracy [57]. Należy również wskazać, że czynnikami oddziałującymi na odporność na pękanie jest interakcja cementu i emulsji asfaltowej, oraz interakcja emulsji asfaltowej i proszku polimerowego. Obecność modyfikatora w mieszance MCE prowadzi do wzrostu odporności na pękanie. Istotny jest odpowiedni dobór ilości spoiw w mieszance MCE oraz optymalizacja jego składu. Uzyskane w trakcie badań wyniki, przedstawiono zostały w formie wykresów, obrazujących zmiany odporności na pękanie, w zależności od zawartości ilości poszczególnych środków wiążących w mieszance. Dla pomiaru w temperaturze 0°C, zostały przedstawione na rysunku 6.25.





Rys. 6.25. Powierzchnia odpowiedzi dla parametru: odporność na pęknięcie K_{Ic} w temp. $0^{\circ}C$ w aspekcie zawartości cementu portlandzkiego i zawartości emulsji asfaltowej przy: a) 0,0% RPP; b) 0,5% RPP; c) 2,0% RPP; d) 3,5% RPP

Najwyższe wartości odporności na pęknięcie, odnotowywane są przy wysokiej zawartości cementu. Potwierdzają to również wyniki badań zaprezentowane w publikacjach [144] [145]. Poprawę parametru można uzyskać przy zastosowaniu modyfikatora polimerowego. Badania przeprowadzone w $0^{\circ}C$ wykazały, że mieszanka MCE zawierająca 2,0% cementu, 2,0% proszku polimerowego oraz 2,5% emulsji asfaltowej uzyskała wyższą odporność na pęknięcie K_{Ic} niż mieszanka o składzie 2,0% cementu, 3,5% proszku polimerowego i 5,0% emulsji asfaltowej. Uzyskane wyniki to odpowiednio $8,89 \text{ N/mm}^{3/2}$ dla mieszanki 2C-2P-2,5E oraz $7,86 \text{ N/mm}^{3/2}$ dla mieszanki 2C-3,5P-5E. Przy stałej ilości cementu równej 2,0%, mieszanka posiadająca 3,5% RPP i 0,0% EMU posiada taką samą odpornością na pęknięcie, co mieszanka z 0,5% RPP i 5,0% EMU. Najwyższy rezultat spośród wszystkich analizowanych, uzyskała mieszanka o składzie 3,5% cementu, 0,5% polimeru i 2,5% emulsji asfaltowej. Przy zerowej, oraz minimalnej zawartości polimeru w mieszance, najwyższe wartości odporności na pęknięcie podbudowy uzyskiwane są przez mieszanki MCE, które posiadają więcej niż 3,0% cementu w swoim składzie. **Wzrost zawartości modyfikatora RPP do poziomu 2,0% pozwala na redukcję ilości cementu w mieszance MCE, przy zachowaniu wysokiej odporności na pęknięcie. Dla tej ilości modyfikatora uzyskiwane są najkorzystniejsze rezultaty odporności na pęknięcie K_{Ic} , powyżej $12 \text{ N/mm}^{3/2}$.** Należy zaznaczyć poprawę odporności na pęknięcie, w mieszankach MCE, z minimalną ilością cementu oraz emulsji asfaltowej. Dodatek polimeru w ilości 3,5% pozwala zredukować zawartość cementu portlandzkiego do 2,0% oraz emulsji asfaltowej do 1,0%, dając możliwość uzyskania wysokiej odporności mieszanki MCE na pęknięcie, około $10 \text{ N/mm}^{3/2}$. Analogiczne wykresy powierzchni odpowiedzi, które powstały na podstawie wyników uzyskanych w czasie pomiaru w temperaturze $20^{\circ}C$, przedstawione zostały na rysunku 6.26.



Rys. 6.26. Powierzchnia odpowiedzi dla parametru: Odporność na pęknięcie K_{IC} w temp. 20°C w aspekcie zawartości cementu portlandzkiego i zawartości emulsji asfaltowej przy: a) 0,0% RPP; b) 0,5% RPP; c) 2,0% RPP; d) 3,5% RPP

Zmiana temperatury badania na 20°C, wskazuje na wzrost znaczenia obecności proszku polimerowego w mieszance MCE. Oddziaływanie polimeru ujawnia się w wyższych temperaturach otoczenia, co potwierdza ocena istotności wpływu zaprezentowana w tabelicy 6.11. Najwyższą wartość odporności na pęknięcie uzyskała mieszanka 3,5% cementu, 0,5% polimeru i 2,5% emulsji asfaltowej. Wysoki wskaźnik odporności na pęknięcie, wynoszący 8,6 N/mm^{3/2} uzyskano w mieszance bez emulsji asfaltowej, natomiast zawierającej 2,0% cementu oraz 3,5% modyfikatora polimerowego. Zbliżony wskaźnik odporności na pęknięcie, na poziomie 7,4 N/mm^{3/2} - 7,7 N/mm^{3/2} posiadają dwie mieszanki MCE. Pierwsza z nich zawiera 3,5% cementu, 2,0% polimeru i 5,0% emulsji asfaltowej. Druga, o minimalnie wyższym rezultacie, to mieszanka również zawierająca 3,5% cementu, jednak ze zredukowaną ilość emulsji do 2,5% i z większą ilością modyfikatora, równą 3,5%. **Odpowiednia ilość modyfikatora polimerowego pozwala na zwiększenie odporności na pęknięcie oraz na redukcję zapotrzebowania na emulsję asfaltową w mieszance MCE.** Przykładem jest mieszanka MCE z modyfikatorem w ilości 2,0% oraz cementem w ilości 2,0%. Wzrost ilości modyfikatora polimerowego w mieszance do 3,5% pozwala na jeszcze większą redukcję

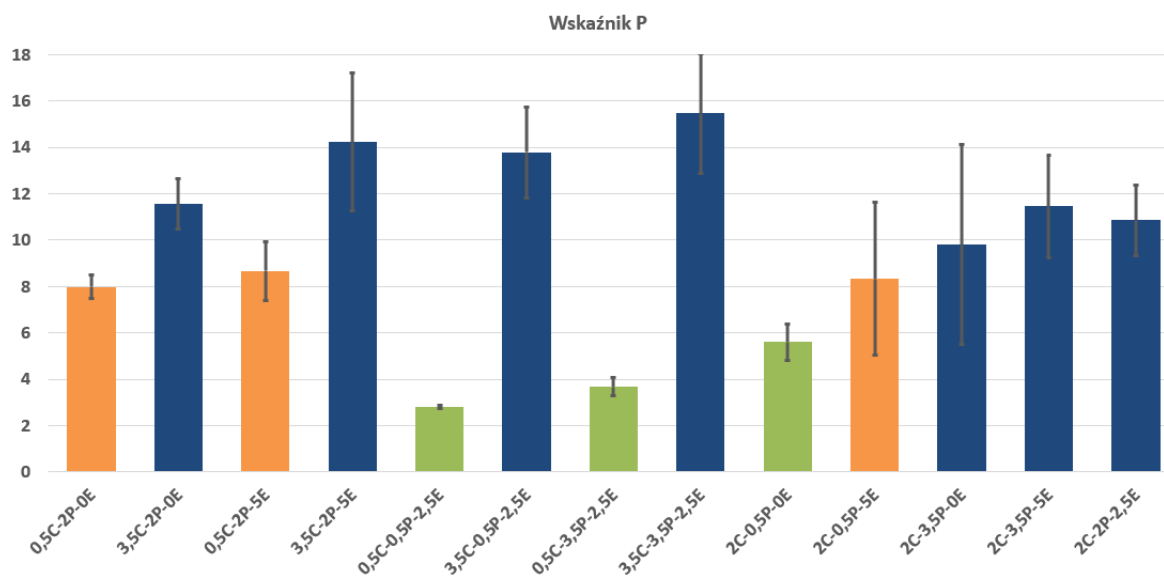
zawartości pozostałych środków wiążących w mieszance MCE. Już przy 1,0% cementu oraz 1,0% emulsji asfaltowej uzyskiwane są niemal maksymalne wyniki odporności na pękanie dla mieszanki MCE.

6.4.3 Wskaźnik pęknięć P

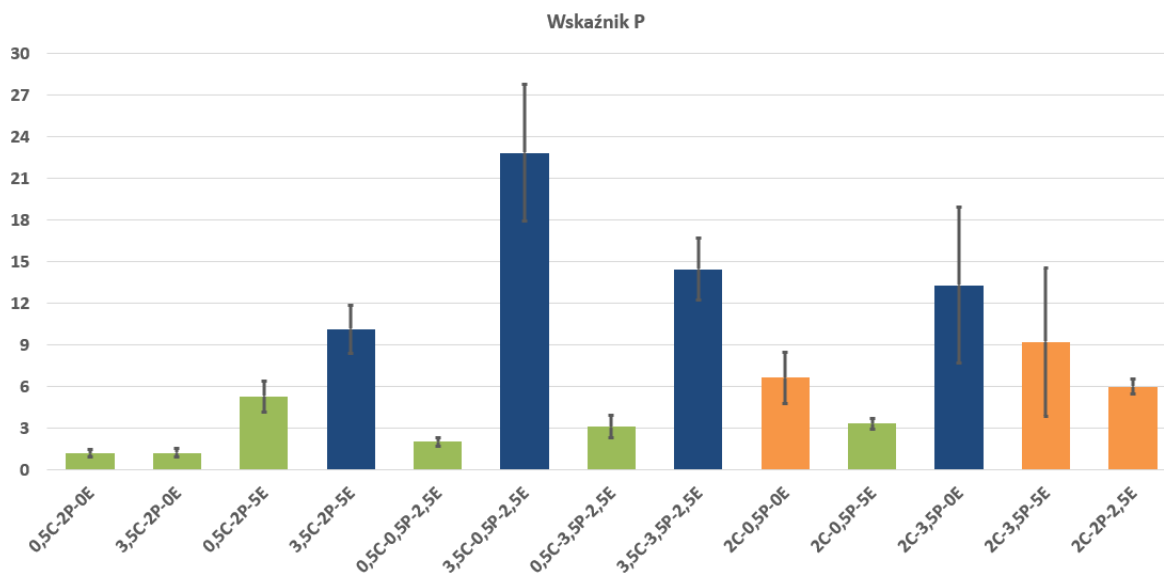
Dla mieszanek MCE, istotne jest uzyskanie wysokiej odkształcalności w momencie przyłożonego obciążenia. Dla zaobserwowania zależności między odkształceniem mieszanki ε_{max} oraz jej odporności na pękanie K_{Ic} , wykorzystano wskaźnik pęknięć P, który zaproponowali autorzy pracy [146]. Wskaźnik pęknięć P opisano równaniem (6.15):

$$P = K_{Ic} \cdot \varepsilon_{max} \quad (6.15)$$

Wskaźnik P wyznaczono dla pomiarów wykonanych w temperaturze 0°C oraz 20°C. Określono jak poszczególne środki wiążące oddziałują na analizowany parametr mieszanki MCE. Dla pomiaru w temperaturze 0°C, odnotowano najsilniejszy wpływ cementu i modyfikatora polimerowego na wskaźnik P. Wraz ze wzrostem ilości cementu oraz polimeru, wzrasta wartość wskaźnika pęknięć P. Wartości uzyskane dla temperatury 0°C przedstawiono na rysunku 6.27, natomiast rysunek 6.28 prezentuje wartości wskaźnika pęknięć P, dla pomiarów wykonanych w temperaturze 20°C.



Rys. 6.27. Wartość wskaźnika P w temperaturze pomiaru 0°C (słupek błędów stanowi przedział ufności 95%)

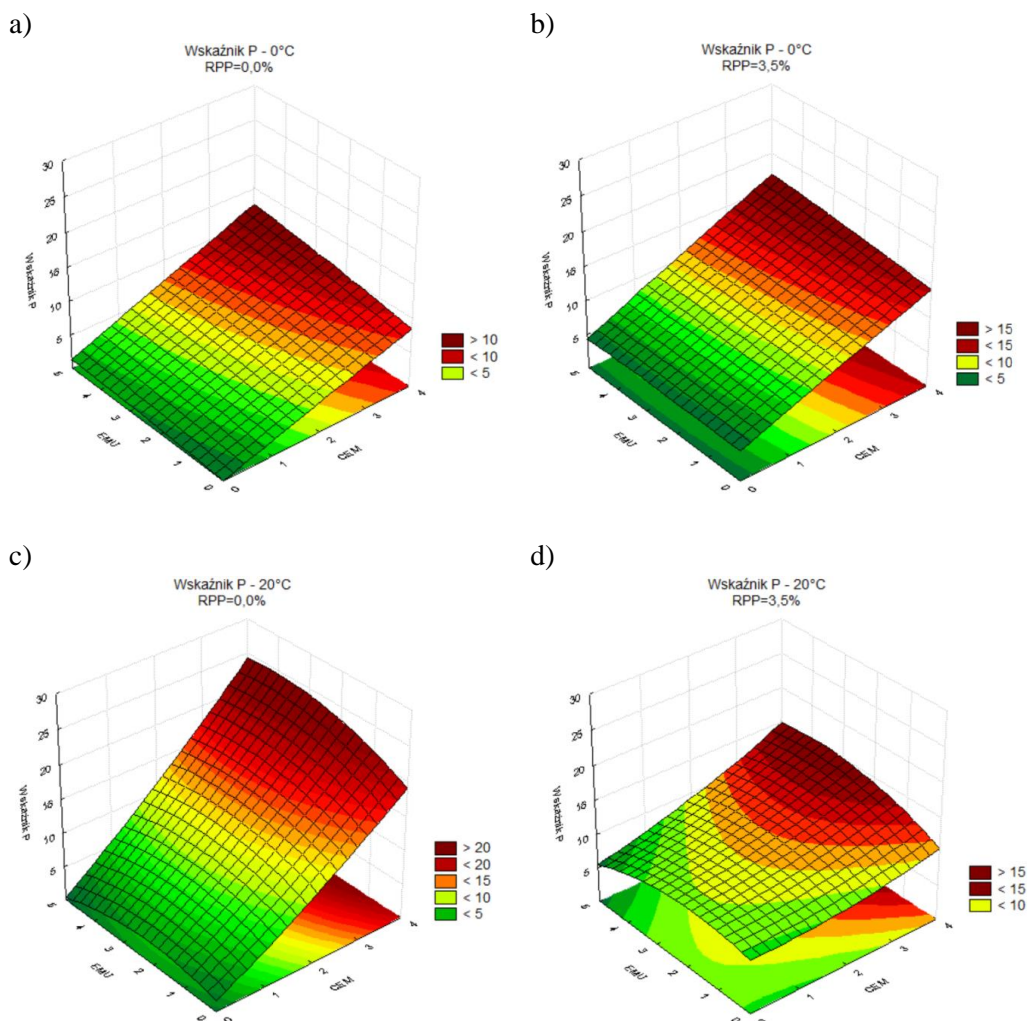


Rys. 6.28. Wartość wskaźnika P w temperaturze pomiaru 20°C (słupek błędu stanowi przedział ufności 95%)

Kolorem granatowym na rysunku 6.27 oznaczono mieszanki, których wskaźnik P wynosi powyżej 10. Dla wyników badań w temperaturze 0°C, cztery z nich zawierają maksymalne ilości cementu, tj. 3,5%. Trzy mieszanki zawierają w swoim składzie 2,0% cementu oraz modyfikator polimerowy w ilości 2,0% lub 3,5%. Mieszanki MCE 2C-2P-2,5EMU, 2C-3,5P-5,0EMU oraz 2C-3,5P-0,0EMU osiągają taki sam wskaźnik P, jak mieszanka MCE o składzie 3,5C-2P-0,0EMU. Kolorem pomarańczowym oznaczono mieszanki MCE, o wskaźniku P w przedziale 6 a 10. To mieszanki o minimalnej zawartości cementu równej 0,5%, które posiadają modyfikator RPP w ilości 2,0%. Kolorem zielonym oznaczono mieszanki MCE z najniższym wskaźnikiem P. Są to mieszanki z minimalną zawartością zarówno cementu, jak i modyfikatora. **Analizując uzyskane wyniki w temperaturze 0°C, należy stwierdzić, że potwierdza się wpływ modyfikatora na odkształcalność mieszanki MCE. Zastosowanie proszku polimerowego powoduje wzrost podatności oraz pozwala ograniczyć ilość tradycyjnych środków wiążących w składzie mieszanki MCE.**

Dla temperatury pomiaru równej 20°C, tak jak w przypadku danych w temp. 0°C, kolorem granatowym na rysunku 6.28 oznaczono mieszanki, których wskaźnik P wynosi powyżej 10. Wartości uzyskano dla trzech mieszanek MCE z maksymalną ilością cementu, równą 3,5% oraz jednej mieszanki z cementem w ilości 2,0% i modyfikatorem RPP w ilości 3,5%. **To potwierdzenie możliwości zastąpienia tradycyjnych środków wiążących poprzez wprowadzenie do składu mieszanki MCE redyspergowalnego proszku polimerowego RPP. Widoczny jest wzrost odkształcalności mieszanki MCE przy obecności w składzie modyfikatora RPP.** Kolorem pomarańczowym zaznaczono mieszanki o wskaźniku w przedziale 6 a 10. To mieszanki MCE z proszkiem polimerowym w ilości 2,0% lub 3,5%. Barwa zielona została wykorzystana do mieszanek MCE, o najniższym wskaźniku P. To mieszanki o niewielkiej ilości cementu oraz modyfikatora RPP w swoim składzie. **Analizy potwierdzają, że dla uzyskania odpowiednio wysokiej odkształcalności mieszanki MCE, niezbędne jest zastosowanie proszku polimerowego w ilości powyżej 2,0%. Istnieje również szansa na ograniczenie zastosowania cementu oraz emulsji, w składzie mieszanki MCE.** Na rysunku 6.29. zaprezentowane dane, przedstawiające wpływ poszczególnych

środków wiążących na charakterystykę mieszanki MCE w zakresie odkształcalności dla temperatury 0°C oraz 20°C.

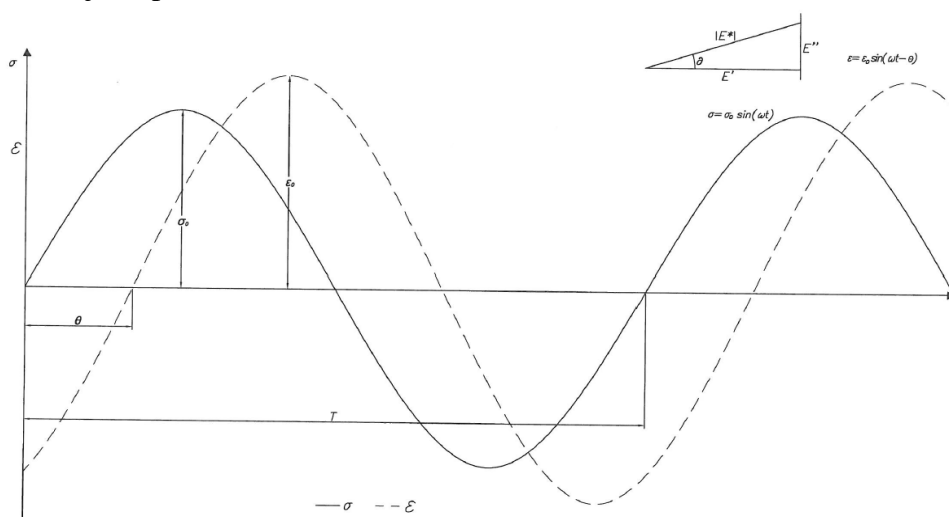


Rys. 6.29. Powierzchnia odpowiedzi dla parametru: Wskaźnik P w temp. 0°C oraz 20°C w aspekcie zawartości cementu portlandzkiego i zawartości emulsji asfaltowej przy: a) 0,0% RPP; b) 3,5% RPP; c) 0,0% RPP; d) 3,5% RPP

Możliwość odkształcenia mieszanki MCE jest bezpośrednio związana z rodzajem oraz ilością środka wiążącego w jej składzie. Obecność modyfikatora polimerowego w składzie mieszanki MCE, zwiększa parametr jakim jest wskaźnik pęknięć P. **W temperaturze 0°C istnieje zauważalny wzrost analizowanego wskaźnika P, porównując mieszankę bez polimeru oraz tę, która zawiera w swoim składzie 3,5% proszku polimerowego.** W przypadku pomiaru w 20°C, dodatek modyfikatora RPP w ilości 3,5% do tradycyjnej mieszanki MCE powoduje uzyskanie bardziej jednorodnych wyników. Wskaźnik P ulega zwiększeniu przy zawartości cementu mniejszej od 2%. Powierzchnia odpowiedzi ma zdecydowanie łagodniejszy przebieg, niż bez zawartości RPP w składzie mieszanki MCE. **Mając na uwadze powyższe mieszanka MCE z modyfikatorem polimerowym charakteryzuje się wysoką odpornością na pęknięcie przy zwiększonej odkształcalności. Dodatek 3,5% redyspergowalnego proszku polimerowego do składu mieszanki MCE powoduje wzrost możliwości odkształcenia do momentu wystąpienia pęknięcia.**

6.5 Właściwości reologiczne mieszanek MCE z modyfikatorem polimerowym

Parametry, które w dobry sposób opisują właściwości reologiczne kompozytów mineralno-asfaltowych to moduł dynamiczny (E^*) oraz kąt przesunięcia fazowego (φ) [147] [148] [149]. Ze względu na zachowania lepkosprężyste mieszanek mineralno-asfaltowych oraz mieszanek MCE przyłożona wartość naprężenia (σ_0) powoduje wywołanie odkształcenia (ε_0) opóźnionego o kąt przesunięcia fazowego (φ) [150]. Ocenę właściwości reologicznych przedstawionych w pracy dokonano poprzez ocenę modułu dynamicznego (E^*) oraz kąta przesunięcia fazowego (φ), oznaczonego w teście DTC-CY (Direct Tension-Compression Test on Cylindrical Samples) zgodnie z wymaganiami normy PN-EN 12697-26 [151]. Próbkę wykorzystaną do badań zagęszczono w prasie żyrotorowej zgodnie z wymaganiami normy PN-EN 12697-31 [102] do gęstości objętościowej, przy której wskaźnik zagęszczenia osiągnął wartość 98-100%. Docelowo do badań z próbek zagęszczonych w prasie żyrotorowej wycięto rdzenie o średnicy 100mm. Przed wykonaniem badania kondycjonowano je w odpowiedniej temperaturze.



Rys. 6.30. Zależność przyłożonego naprężenia i wywołanego nim odkształcenia ciała lepkosprężystego [151]

W metodzie bezpośredniego ściskania i rozciągania próbka poddana zostaje cyklicznemu sinusoidalnemu obciążeniu, które powoduje wywołanie małej wartości odkształcenia do $50 \mu\epsilon$ [147] [151] [152]. Badanie modułu dynamicznego przeprowadzono dla pięciu wartości temperatur (-10°C , $+5^\circ\text{C}$, $+13^\circ\text{C}$, $+25^\circ\text{C}$, $+50^\circ\text{C}$) oraz sześciu czasów obciążania (0,1Hz, 0,3Hz, 1Hz, 3Hz, 10Hz, 20Hz). Na tej podstawie określono wartości modułu dynamicznego (E^*) oraz kąta przesunięcia fazowego (φ). Schemat zależności odkształcenia i naprężenia ciała lepkosprężystego przedstawiono na rysunku 6.30, natomiast układ badawczy przedstawiono na rysunku 6.31.



Rys. 6.31. Próbką w badaniu modułu zespolonego w układzie DTC-CY [Krasowski J.]

W przypadku ciała idealnie sprężystego kąt przesunięcia fazowego wynosi $\varphi=0^\circ$, natomiast w przypadku idealnej cieczy $\varphi=90^\circ$. Materiał lepkosprężysty znajduje się w zakresie kąta przesunięcia fazowego pomiędzy 0° a 90° [119].

Wartość naprężenia jest opisana poprzez zależność (6.16), odkształcenia przez zależność (6.17) natomiast wartość modułu zespolonego przez (6.18) [153]:

$$\sigma = \sigma_0 * \sin(\omega \cdot t) \quad (6.16)$$

$$\varepsilon = \varepsilon_0 * \sin(\omega \cdot t - \varphi) \quad (6.17)$$

$$E_{(i\omega)}^* = \frac{\sigma}{\varepsilon} = \frac{\sigma_0}{\varepsilon_0} \cdot e^{i\varphi} = |E^*| \cdot \cos \varphi + |E^*| \cdot i \cdot \sin \varphi = E_1 + E_2 \cdot i \quad (6.18)$$

Zgodnie z równaniem (6.18) wartość modułu zespolonego składa się z modułu sprężystego (6.19) oraz modułu traconego (lepkiego) (7.20):

$$E_1 = |E^*| * \cos \varphi \quad (6.19)$$

$$E_2 = |E^*| * \sin \varphi \quad (6.20)$$

gdzie: σ_0 – początkowe naprężenie, ω – częstotliwość zredukowana, t – czas obciążenia, ε_0 – początkowe odkształcenie, φ – kąt przesunięcia fazowego, E_1 – moduł sprężysty (rzeczywista część modułu zespolonego), E_2 – moduł lepki (tracona część modułu zespolonego), i – część urojona, $|E^*|$ – moduł zespolony (moduł dynamiczny).

Moduł sztywności kompozytów mineralno-asfaltowych ulega zmianie w zakresie długości czasu trwania obciążenia oraz temperatury. Zmiany te są do zaobserwowania, przy wykorzystaniu krzywych wiodących modułu dynamicznego [154]. Do budowy krzywych wiodących modułu dynamicznego wykorzystywane są założenia zasady superpozycji czasowo-temperaturowej [155] [156]. W niniejszej pracy do budowy krzywej wiodącej zaproponowano niesymetryczny model Richardsa [150] który jest modyfikacją modelu w raporcie NCHRP 9-29: PP 02 [153]. Model ten można zaklasyfikować do modeli matematycznych sigmoidalnych niesymetrycznych poprzez wprowadzenie współczynnika niesymetryczności przebiegu krzywej (λ). Dodatek modyfikatora RPP do mieszanki MCE spowoduje zbliżenie właściwości reologicznych, do podatnej mieszanki MMA. Do optymalizacji przebiegu zmian modułu zespolonego w funkcji sigmoidalnej wykorzystano metodę minimalizacji sumy kwadratów odchyłeń dla oznaczonych modułów zespolonych. Postać funkcji sigmoidalnej niesymetrycznej opisano wzorem 6.21.

$$\log|E^*| = \delta + \frac{\alpha}{[1 + \lambda e^{\beta + \gamma \log \omega}]^{1/\lambda}} \quad (6.21)$$

gdzie: $|E^*|$ – moduł zespolony, ω – współczynnik przesunięcia temperaturowego, δ – wartość dolnej asymptoty (parametr dopasowania krzywej wiodącej), α – różnica między wartością górnej i dolnej asymptoty (parametr dopasowania krzywej wiodącej), λ, β, γ – parametry dopasowania krzywej wiodącej.

Prezentacja krzywej wiodącej modułu sztywności wykorzystuje zasadę superpozycji czasowo-temperaturowej. W tym celu niezbędne jest wprowadzenie współczynnika przesunięcia temperaturowego (ω_T) w postaci funkcji wielomianu przedstawionej we wzorze 6.22 [157]:

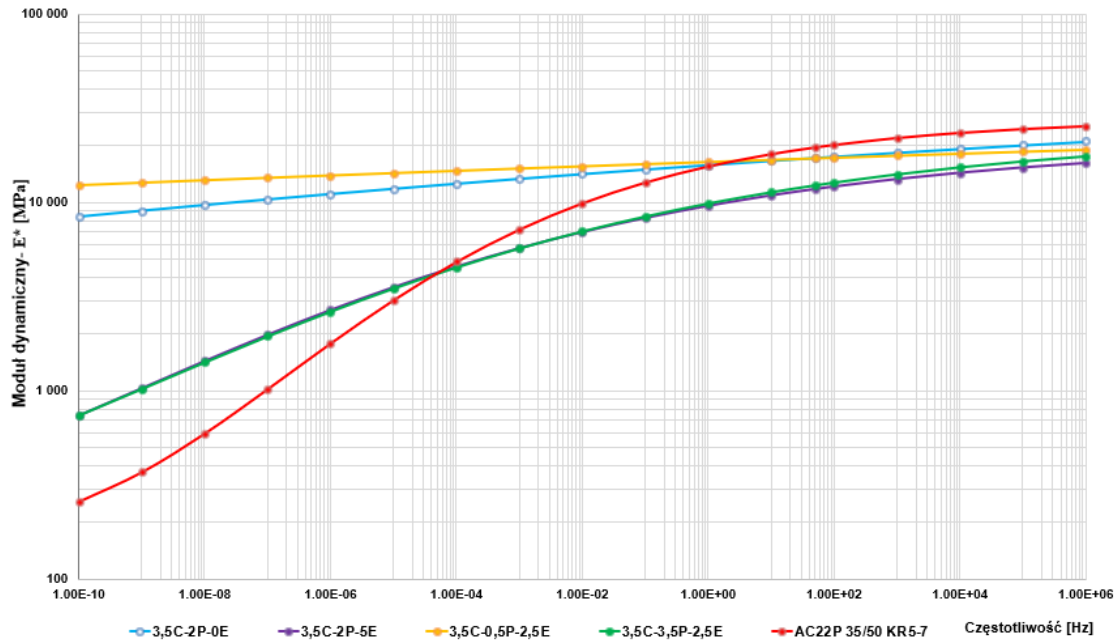
$$\ln \omega_T = a + b \cdot T + c \cdot T^2 \quad (6.22)$$

gdzie: ω_T – współczynnik przesunięcia temperaturowego, T – temperatura badania, T_{ref} – temperatura referencyjna, a, b, c – parametry modelowe.

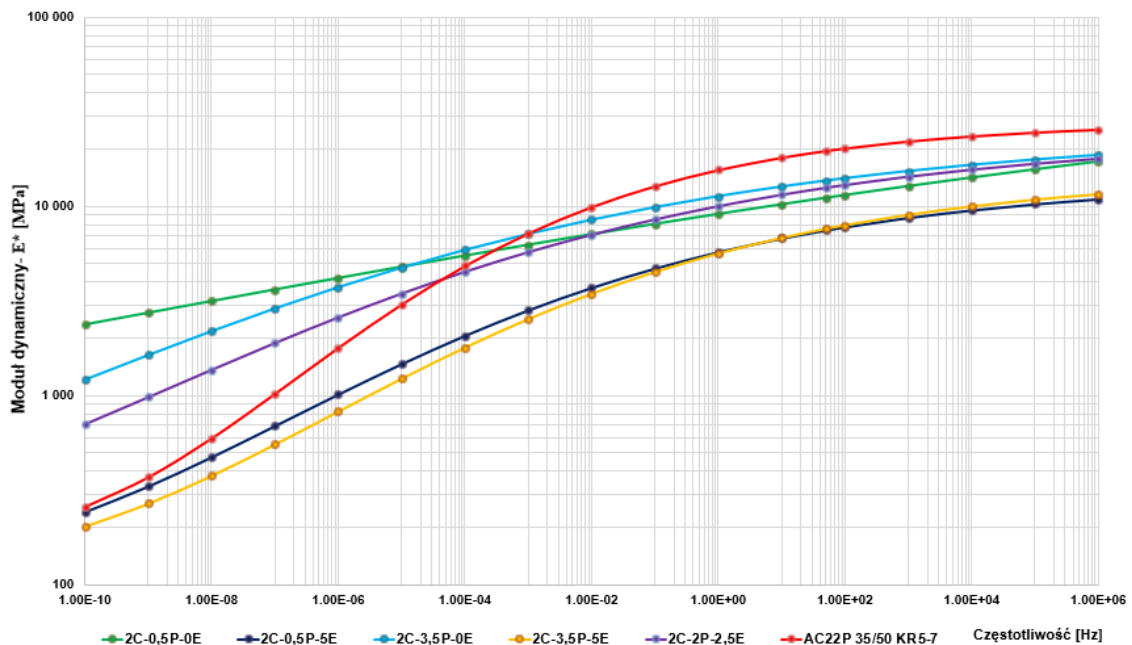
Zasadnym wydaje się określenie jak modyfikator polimerowy RPP, oddziałuje na właściwości mieszanki MCE w zakresie reologicznym. Analiza wyników modułu dynamicznego wykazała widoczny wpływ cementu, na rozpatrywany parametr. Dla przejrzystego przedstawienia wyników badań, mieszanki MCE zostały podzielone na trzy grupy, w zależności od zawartości CEM w ich składzie. Krzywe wiodące mieszanki MCE, zostały zestawione z krzywą wiodącą modułu dynamicznego mieszanki mineralno-asfaltowej AC22P, którą na wykresie przedstawiono kolorem czerwony. Mieszanka mineralno-asfaltowa przewidziana

jest do kategorii ruchu KR5-7. Beton asfaltowy do warstwy podbudowy zasadniczej charakteryzował się wytrzymałością na pośrednie rozciąganie ITS_{DRY} równą 1575,8 kPa, odpornością na działanie wody $TSR = 99\%$, odpornością na działanie wody i mrozu $ITSR$ równą 82%, oraz zawartością wolnych przestrzeni V_m o wartości 5,5%. Krzywe wiodące modułu dynamicznego zaprezentowano na rysunku 6.32.

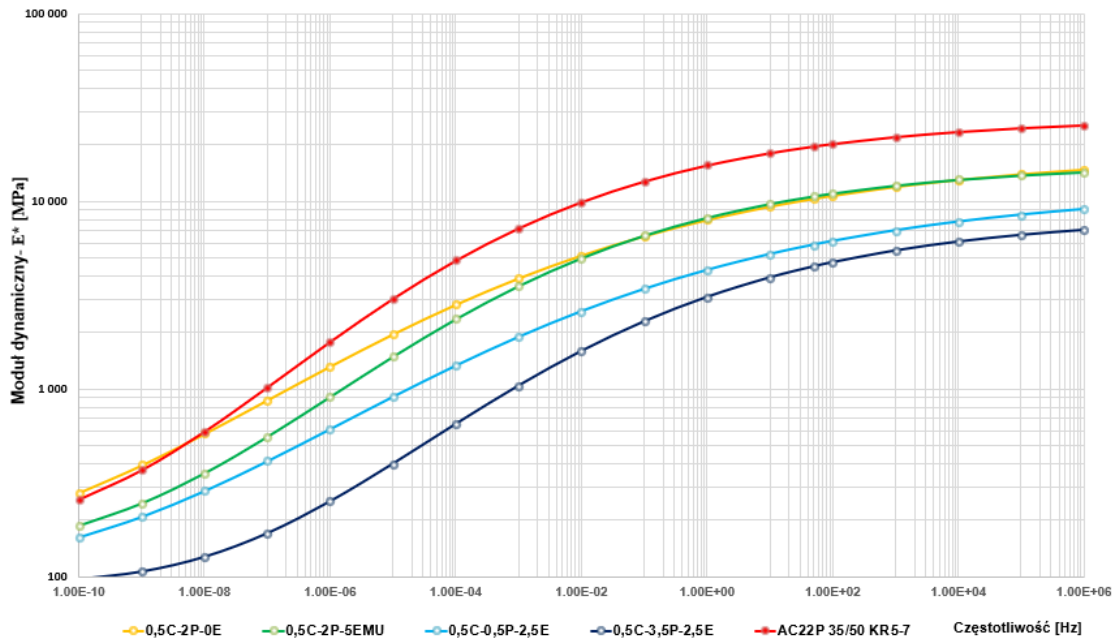
a)



b)



c)



Rys. 6.32. Krzywe wiodące modułu dynamicznego, dla temperatury odniesienia 13°C, mieszanek MCE zawierających modyfikator polimerowy: a) grupa I, b) grupa II, c) grupa III

W grupie I znalazły się cztery mieszanki MCE, w których składzie występuje 3,5% cementu portlandzkiego (rys. 6.32a). Dwie z nich zawierają sumarycznie proszek polimerowy oraz emulsję asfaltową w ilości nie większej niż 2,5%. Mieszanki te charakteryzują się najwyższymi wartościami modułu dynamicznego, bez względu na czas obciążenia. Moduł dynamiczny w niewielkim stopniu ulega zmianie w dłuższym czasie obciążenia. Kolejne dwie mieszanki MCE, zawierają 3,5% cementu, jednak sumaryczna ilość emulsji asfaltowej oraz proszku polimerowego zawiera się w przedziale 6% - 7%. Mieszanki te charakteryzują się wysokimi wartościami modułu dynamicznego dla niższych częstotliwości obciążenia, jednak wraz ze zmianą częstotliwość zauważalny jest stopniowy spadek wartości modułu. Należy zaznaczyć, że dla dłuższych czasów obciążenia, wartości modułu dynamicznego są wyższe niż moduł dynamiczny mieszanki z betonu asfaltowego AC22P. W II grupie (rys. 6.32b) znalazło się pięć mieszanek MCE, które zawierają w swoim składzie 2,0% cementu portlandzkiego. Mieszanki MCE z II grupy, w krótkim czasie obciążenia zachowuje się bardzo podobnie do betonu asfaltowego, jednak wartość otrzymanego modułu dynamicznego jest niższa. Zmiany widoczne są w dłuższym czasie obciążenia. Trzy z mieszanek MCE, które zawierają sumarycznie modyfikator polimerowy oraz emulsję asfaltową w ilości do 4,5%, charakteryzują się wyższymi wartościami modułu dynamicznego od mieszanki AC22P z betonu asfaltowego. Pozostałe dwie mieszanki MCE o symbolach 2C-2P-2,5E oraz 2C-3,5P-5E, zawierają sumaryczną ilość proszku polimerowego oraz emulsji asfaltowej powyżej 5,0%. Z tego względu mieszanki, dla każdej częstotliwości obciążenia, posiadają niższy moduł dynamiczny od tradycyjnej mieszanki mineralno-asfaltowej. Wzrost udziału proszku polimerowego oraz emulsji asfaltowej obniża wartość modułu dynamicznego, co w rezultacie może prowadzić do podatności na deformacje w warstwie podbudowy. Ostatnia analizowana grupa nr III, to mieszanki MCE, które w swoim składzie zawierają jedynie

0,5% cementu portlandzkiego (rys. 6.32c). Mieszanki charakteryzują się niemal identycznym przebiegiem krzywych wiodących modułu dynamicznego, jak dla mieszanki z betonu asfaltowego AC22P, jednak dla każdej częstotliwości obciążenia, wartości modułu są niższe. **Krzywe wiodące mieszanki 0,5C-2,0P-0E oraz 0,5C-2,0P-5E dla krótkiego czasu obciążenia pokrywają się. Wydłużenie czasu obciążenia powoduje znaczny spadek modułu dynamicznego mieszanki zawierającej 5,0% emulsji asfaltowej w swoim składzie. Dla korzystne jest zminimalizowanie ilości emulsji asfaltowej w mieszance MCE, na rzecz modyfikatora polimerowego RPP.** Należy odnotować, że mieszanka 0,5C-2,0P-0E przy zwiększonym czasie obciążenia, ma moduł dynamiczny zbliżony do mieszanki AC22P. Tym samym mieszanka MCE z modyfikatorem RPP upodobniła swój charakter pracy do mieszanki z betonu asfaltowego. Uzyskane rezultaty mieszanek z grupy III klasyfikują je, jako najbardziej wrażliwe na deformacje.

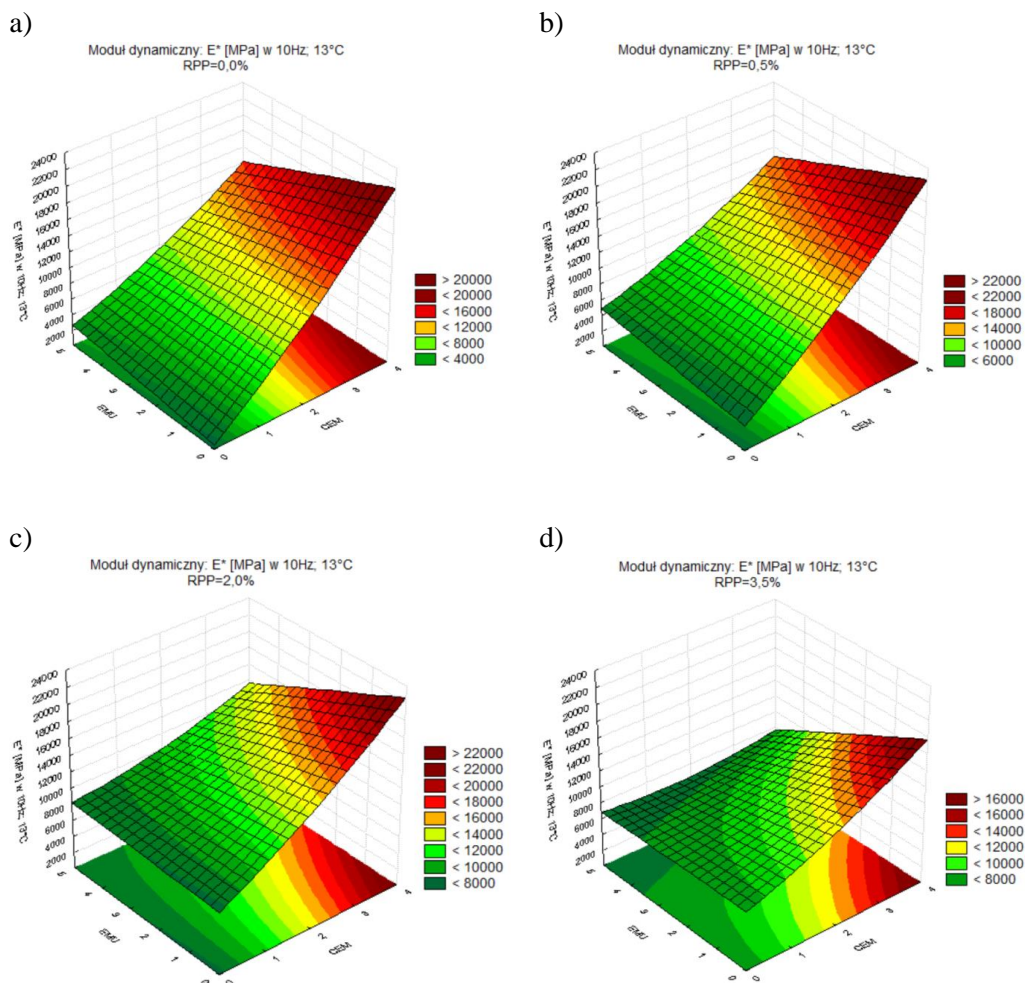
Wyniki przeprowadzonych badań, zestawionych w tablicy 6.12 wskazują, że składnikiem mieszanki MCE, która istotnie wpływa na moduł dynamiczny E^* w temp. 13°C jest cement oraz modyfikator polimerowy. Zgodnie z poprzednimi badaniami, wzrost zawartości cementu w mieszance MCE, prowadzi do wzrostu modułu dynamicznego E^* . Obecność RPP w mieszance także powoduje wzrost wartości modułu dynamicznego. Należy również zaznaczyć, że zarówno udział procentowy cementu względem emulsji asfaltowej oraz interakcja cementu względem proszku polimerowego, powodują spadek modułu dynamicznego E^* . Rezultaty przedstawione w tablicy 6.12 opisują wpływ poszczególnych środków wiążących na omawiany parametr w temperaturze 13°C i częstotliwości 10Hz.

Tablica 6.12 Wpływ czynników na cechę: moduł dynamiczny E^* (13°C, 10 Hz)

	E^* 13°C, 10 Hz; $R^2= 0,80$		
	t	Współczynnik	$p \leq 0,05$
Średnia/Stała	0,34	545,74	0,739
(1)CEM[%](L)	4,49	4418,57	0,000
CEM[%](Q)	1,00	210,63	0,333
(2)EMU[%](L)	0,87	445,69	0,396
EMU[%](Q)	-0,09	-6,89	0,929
(3)RPP[%](L)	5,74	5659,98	0,000
RPP[%](Q)	-5,06	-1065,85	0,000
1L wz.2L	-4,24	-479,23	0,001
1L wz.3L	-4,03	-759,22	0,001
2L wz.3L	-1,28	-144,62	0,220

czerwonym kolorem zaznaczony czynniki o istotnym wpływie na rozpatrywaną cechę

Uzyskane wyniki, zostały zestawione w formie wykresów, które przedstawiają wpływ poszczególnych środków wiążących na moduł dynamiczny mieszanki MCE. Powierzchnie odpowiedzi, obrazujące zmianę wartości modułu dynamicznego w temperaturze 13°C, przy obciążeniu 10Hz, przedstawiono je na rysunku 6.33.

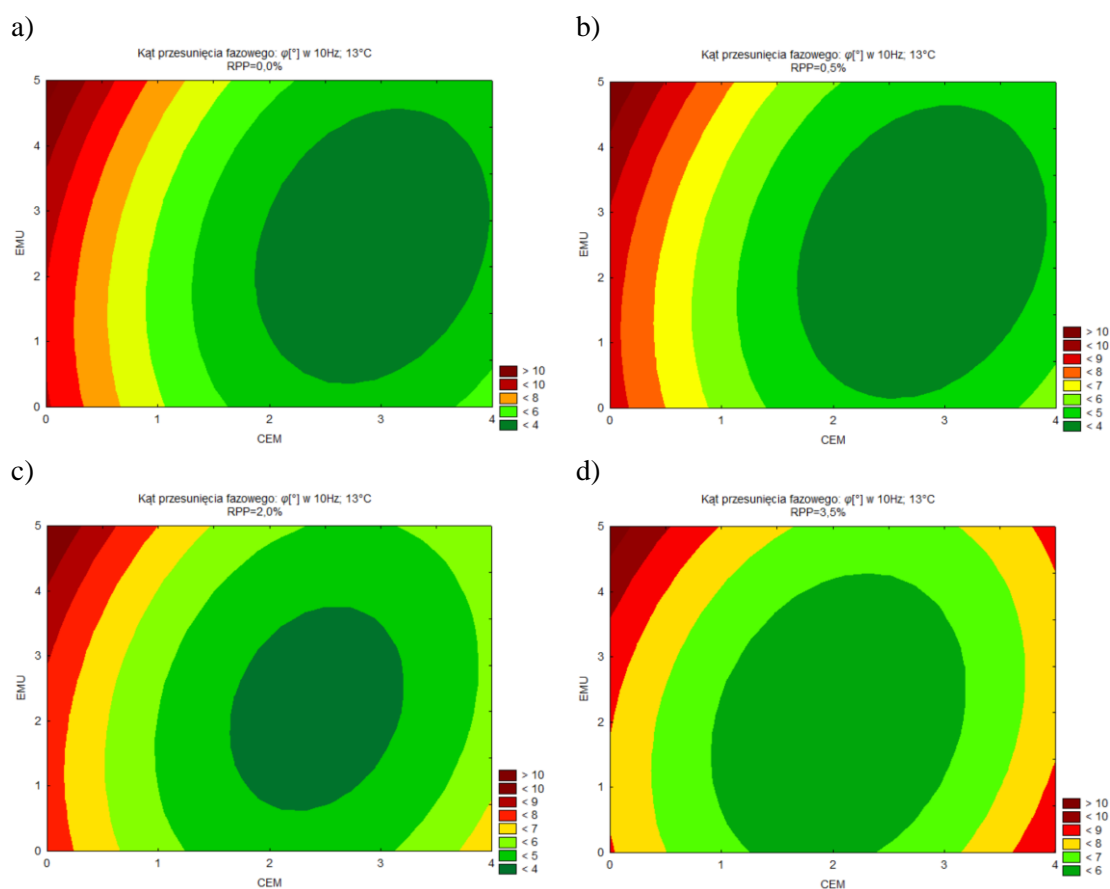


Rys. 6.33. Powierzchnia odpowiedzi modułu dynamicznego E^* w aspekcie zawartości cementu portlandzkiego i zawartości emulsji asfaltowej przy: a) 0,0% RPP; b) 3,5% RPP; c) 0,0% RPP; d) 3,5% RPP

Wyniki badań wskazują, że najwyższe wartości modułu dynamicznego, uzyskiwane są przy maksymalnych zawartościach cementu w mieszance MCE, oraz minimalnej zawartości emulsji asfaltowej. Obecność emulsji asfaltowej w mieszance MCE prowadzi do bardziej podatnego charakteru pracy, co przekłada się na obniżenie modułu dynamicznego. Modyfikator polimerowy RPP w mieszance MCE, powoduje uzyskanie interesujących zależności. Dodatek 0,5% proszku polimerowego do mieszanki MCE, powodują wzrost wartości modułu dynamicznego, przy minimalnej ilości cementu oraz emulsji asfaltowej. Zaobserwowano dwukrotnie większe wartości modułu dynamicznego, tj. wzrost z 2000 MPa do 4000 MPa. Wiązania polimerowe powodują wzrost siły kohezji składników mieszanki, co potwierdzają wyniki badań zaprezentowane w publikacji [11]. Obecność proszku polimerowego w ilości 2,0% w mieszance MCE, w rezultacie daje zbliżony efekt. Dla 1,0% CEM oraz 1,0% EMU, wartość modułu dynamicznego wzrasta do około 6000 MPa, z poziomu 4000 MPa. Przy wyższych zawartościach cementu oraz emulsji, polimer nie wywołuje aż tak znacznych zmian rozpatrywanego parametru. Dopiero proszek polimerowy w ilości 3,5% w mieszance MCE wprowadza znaczne zmiany wyników. Przy minimum pozostałych składników spoiwa, utrzymany zostaje moduł dynamiczny na poziomie 6000 MPa. Dla mieszanek z wyższą ilością cementu w składzie, zauważalny jest spadek wartości modułu

dynamicznego. Dla 3,5% cementu, jest to zmiana z około 22000 MPa, do 16000 MPa. **Stosowanie modyfikatora polimerowego w składzie mieszanki MCE w ilości 3,5% powoduje obniżenie modułu dynamicznego w porównaniu do mieszanek MCE bez dodatku modyfikatora polimerowego. Wyniki badań pozwalają stwierdzić, że odpowiednia proporcja udziału środków wiążących w mieszance MCE, wpływa na moduł dynamiczny.** Istnieje możliwość obniżenia zawartości emulsji asfaltowej oraz cementu w mieszance MCE o około 1,0%, przy zastosowaniu około 2,0% modyfikatora RPP. Mieszanka 2,5C-0P-1,5E posiada zbliżony moduł sztywności do mieszanki MCE 1,5C-2P-0,5E. Taki udział procentowy nie doprowadzi do przeszywnienia konstrukcji nawierzchni, pozwoli natomiast używać należytej trwałość w konstrukcji nawierzchni.

Wykonane badania pokazują, że obecność modyfikatora RPP w mieszance oraz CEM, ma znaczny wpływ na wartości kąta przesunięcia fazowego (φ) mieszanki MCE (rys.6.34). Silne oddziaływanie na kąt przesunięcia fazowego, w mieszance MCE spowodowane jest obecnością modyfikatora polimerowego RPP. Wzrost ilości RPP powoduje wzrost kąta przesunięcia fazowego, potwierdza to zmian (rys.6.34a) oraz (6.34d). Zwiększenie ilości cementu w mieszance, prowadzi do obniżenia wartości omawianego parametru. Dla omawianego kąta przesunięcia fazowego (φ), również wykonane zostały wykresy zmiany wartości, w zależności od zawartości środków wiążących w mieszance MCE. Rezultaty zestawiono na rysunku 6.34.

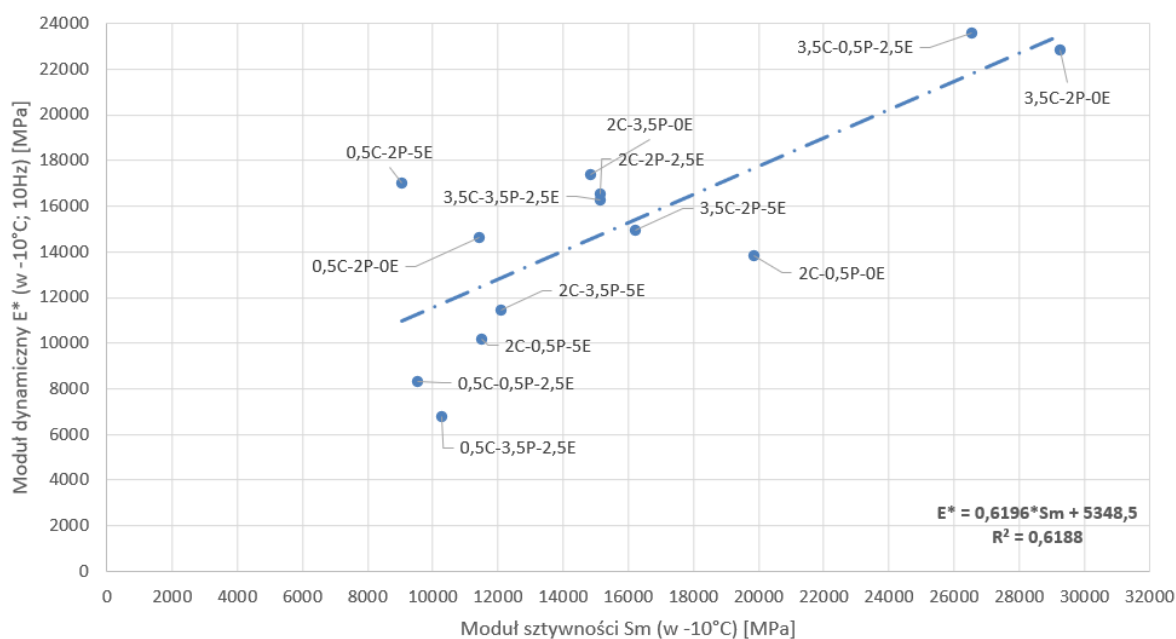


Rys. 6.34. Powierzchnia odpowiedzi kąta przesunięcia fazowego w aspekcie zawartości cementu portlandzkiego i zawartości emulsji asfaltowej przy: a) 0,0% RPP; b) 3,5% RPP; c) 0,0% RPP; d) 3,5% RPP

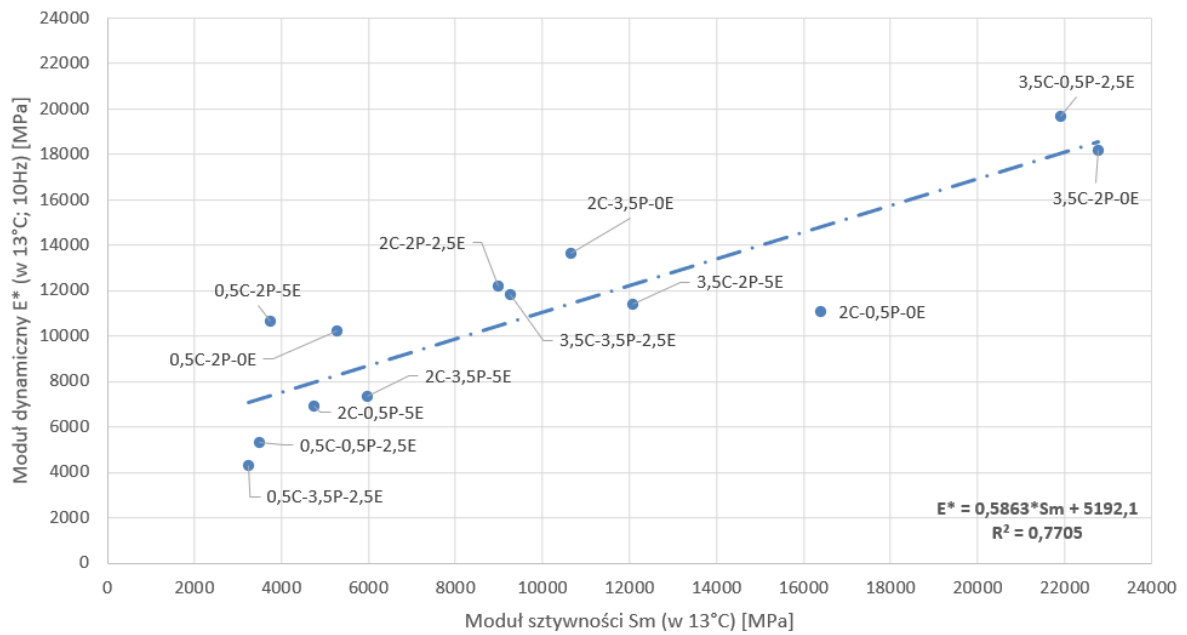
Dla tradycyjnych mieszanek MCE, które nie zawierają w swoim składzie modyfikatora polimerowego, najwyższe wartości kąta przesunięcia fazowego, uzyskiwane są przy minimalnym udziale cementu oraz dużej zawartości emulsji asfaltowej w składzie. Asphalt pochodzący z emulsji wpływa na zwiększenie części lepkiej w mieszance MCE. Najniższymi wartościami kąta przesunięcia fazowego $\varphi < 4,0$, charakteryzują się mieszanki MCE, które zawierają cement w ilości powyżej 2,0%. Natomiast wraz ze wzrostem ilości proszku polimerowego w mieszance MCE, następuje wzrost kąta przesunięcia fazowego. **Największe zmiany kąta przesunięcia fazowego, obserwowane są przy obecności modyfikatora RPP w ilości 3,5%.** Modyfikator polimerowy prowadzi do zwiększenia kąta przesunięcia fazowego. Jego obecność powoduje wzrost udziału części urojonej modułu zespolonego (E_2). Silnie widoczne jest to w mieszankach MCE zawierających powyżej 3,0% cementu, bez względu na ilość emulsji asfaltowej w składzie. Wartość kąta przesunięcia fazowego, jest identyczna, jak dla mieszanek z minimalną wartością CEM 0,5% oraz EMU powyżej 3,0%. Wskazane zależności pozwalają stwierdzić, że modyfikator polimerowy RPP, może stanowić regulator części lepkiej mieszanek MCE.

Wykonane w ramach pracy badania, oraz ich analizy, wykazały, że istnieje możliwość prognozowania modułu dynamicznego, przy pomocy innej, znanej cechy mieszanki MCE. Na rysunku 6.35. zaprezentowano korelację modułu dynamicznego E^* w różnych temperaturach pomiaru i czasie obciążenia 10 Hz, z modułem sztywności S_m , badanym w schemacie obciążenia IT-CY w temp. -10°C , 13°C , 25°C oraz 50°C .

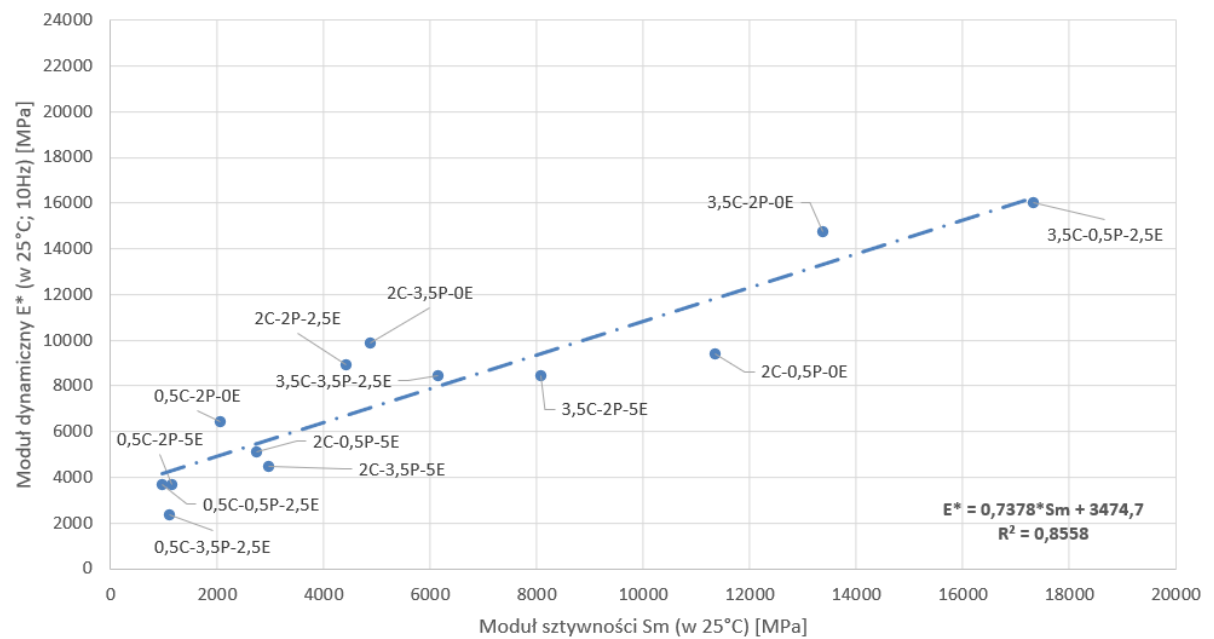
a)



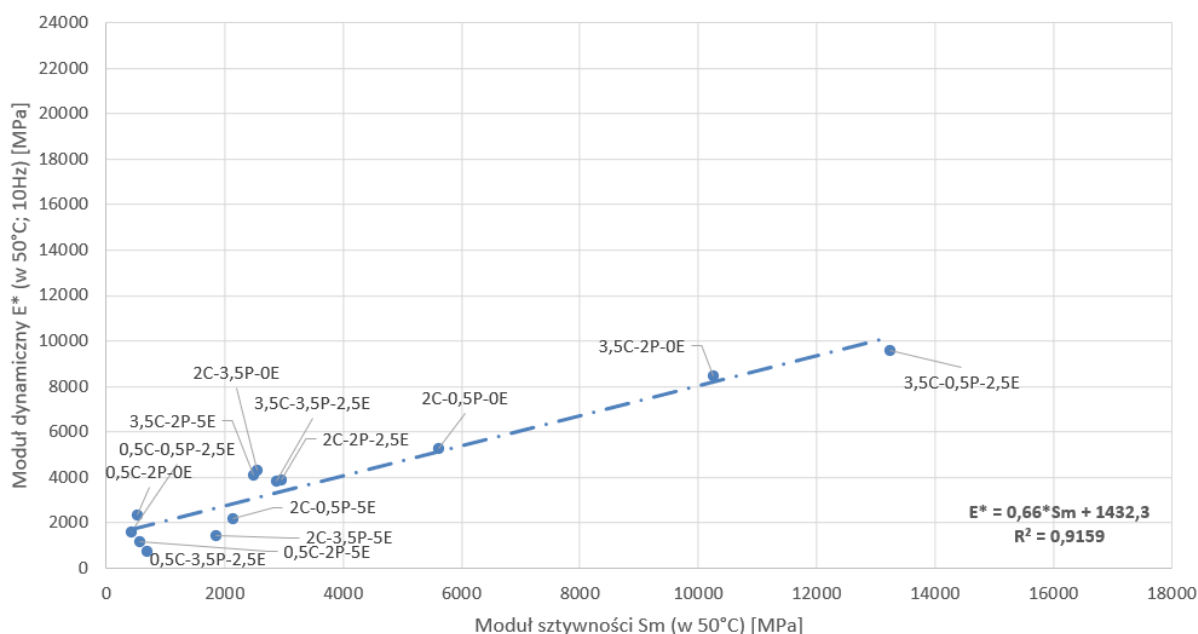
b)



c)



d)



Rys. 6.35. Zależność modułu dynamicznego E^* , od modułu sztywności S_m , dla temperatury: a)-10°C, b) 13°C, c) 25°C, d) 50°C

Przedstawione zależności modułu dynamicznego E^* w czasie obciążenia 10 Hz, od modułu sztywności S_m , dla mieszanek MCE z modyfikatorem polimerowym, wykazały, że bez względu na temperaturę pomiaru, najwyższe wartości modułu, uzyskiwane są dla mieszanek 3,5C-2P-0E oraz 3,5C-0,5P-2,5E. Najniższe wartości uzyskiwane są dla mieszanek MCE z cementem w ilości 0,5%. Wzrost temperatury badania powoduje lepsze dopasowanie się danych i wyższą korelację. Współczynnik determinacji R^2 wzrasta, wraz ze wzrostem rozpatrywanej temperatury badania. Najdokładniej opisane zostały pomiary w temperaturze 25°C oraz 50°C. Dla wszystkich temperatur, funkcja liniowa dobrze opisuje analizowane zależności. Istnieje szansa na prognozowanie wartości modułu dynamicznego na podstawie znajomości modułu sztywności S_m .

6.6 Podsumowanie

Dobry plan eksperymentu pozwolił dokonać kompleksowej oceny wpływu redyspergowalnego proszku polimerowego na właściwości mieszanki MCE. W analizie poszczególnych właściwości, przedstawiono wyniki dla mieszanek MCE z modyfikatorem polimerowym oraz tradycyjnych mieszanek MCE bez proszku polimerowego. Taki sposób prezentacji, daje możliwość oceny oddziaływania ilości modyfikatora polimerowego, cementu oraz emulsji asfaltowej na mieszankę mineralno-cementowo-emulsyjną.

Najistotniejszą korzyścią, jaka płynie ze stosowania modyfikacji z udziałem proszku polimerowego, to możliwość ograniczenia stosowanego w mieszankach cementu portlandzkiego oraz emulsji asfaltowej. Z uwagi na dostęp do składników tradycyjnej mieszanki MCE, opisany w rozdziale 1, oraz temperatury produkcji (rozdział 3.4), istotna jest optymalizacja składu mieszanki. Dozowanie redyspergowalnego proszku polimerowego odbywa

się w temperaturze otoczenia, bez konieczności podgrzewania składników. Polimer, nie ma terminu przydatności, może być składowany, oraz transportowany w dogodnym momencie.

Obecność modyfikatora RPP w składzie mieszanki MCE pozwala ograniczyć zawartość cementu portlandzkiego o około 1,0%-1,5% (m/m) oraz emulsji asfaltowej o około 2,0% (m/m), w stosunku do tradycyjnej mieszanki MCE.

Modyfikator polimerowy w ilości powyżej 2,0% (m/m) powoduje zwiększenie odporności na działanie wody oraz wody i mrozu dla wskaźników TSR oraz ITSR. Badania wykazały spadek nasiąkliwości (n_w) mieszanki MCE. Szczelność mieszanki MCE wynika z wytworzonej błony polimerowej. Stosowanie proszku polimerowego w ilości powyżej 3,0% (m/m) redukuje moduł sztywności. Dla wskazanej ilości modyfikatora, widoczny jest znaczny wzrost możliwego odkształcenia, do momentu zniszczenia, oraz wzrost odporności na pękanie. To niezwykle korzystna cecha, która pozwoli na wykonywanie mieszanek MCE o zwiększonej odporności na pękanie. Zwiększona odkształcalność podbudowy przyczyni się do wyżej trwałości zmęczeniowej warstwy z mieszanki mineralno-cementowo-emulsyjnej z modyfikatorem polimerowym.

Przeprowadzone badania wykazały, że cement istotnie wpływa na właściwości mieszanki MCE. Należy zaznaczyć, że stosowanie modyfikatora w postaci redyspergowalnego proszku polimerowego w większym stopniu wpływa na właściwości lepkosprężyste mieszanki MCE niż emulsja asfaltowa.

Uzyskane wyniki badań właściwości fizykomechanicznych mieszanki MCE z redyspergowalnym proszkiem polimerowym, potwierdzają pozytywne oddziaływanie RPP. Zasadne jest poszukiwanie optymalnej ilości środków wiążących w mieszance, dla redukcji ilości tradycyjnych środków wiążących, przy otrzymaniu jak najlepszych właściwości mieszanki mineralno-cementowej z emulsją asfaltową oraz modyfikatorem polimerowym. W tablicy 6.13 zestawiono modele materiałowe, w postaci wielomianu stopnia drugiego, które posłużą do wykonania optymalizacji składu mieszanki MCE z modyfikatorem polimerowym.

Tablica 6.13. Modele matematyczne opisujące wpływ modyfikatora polimerowego na właściwości mieszanki MCE

Model materiałowy dla cechy	R ²
$V_m = 11,55 + 1,43 * CEM - 0,59 * CEM^2 + 0,13 * EMU - 0,03 * EMU^2 - 1,32 * RPP + 0,39 * RPP^2 + 0,25 * CEM * EMU + 0,11 * CEM * RPP - 0,06 * EMU * RPP$	0,67
$n_w = 3,77 + 0,77 * CEM - 0,27 * CEM^2 - 0,47 * EMU + 0,04 * EMU^2 - 0,56 * RPP + 0,11 * RPP^2 - 0,02 * CEM * EMU + 0,01 * CEM * RPP + 0,06 * EMU * RPP$	0,88
$ITS_{DRY} = 172,23 + 58,56 * CEM + 90,63 * CEM^2 + 118,98 * EMU - 17,77 * EMU^2 + 99,86 * RPP - 18,29 * RPP^2 - 11,77 * CEM * EMU - 29,34 * CEM * RPP - 14,75 * EMU * RPP$	0,99
$S_m(5^\circ C) = 2986,8 + 6487,4 * CEM + 801,6 * CEM^2 - 1140,8 * EMU + 111,8 * EMU^2 + 2305,1 * RPP - 239,3 * RPP^2 - 652,0 * CEM * EMU - 1770,7 * CEM * RPP + 272,3 * EMU * RPP$	0,97
$S_m(13^\circ C) = 2683,2 + 6671,8 * CEM + 449,3 * CEM^2 - 1909,0 * EMU + 156,1 * EMU^2 + 1054,9 * RPP - 228,6 * RPP^2 - 612,4 * CEM * EMU - 1374,9 * CEM * RPP + 462,9 * EMU * RPP$	0,96
$S_m(50^\circ C) = -2128,6 + 4299,8 * CEM + 395,4 * CEM^2 - 379,6 * EMU - 60,7 * EMU^2 - 51,4 * RPP + 206,1 * RPP^2 - 520,8 * CEM * EMU - 1179,2 * CEM * RPP + 185,6 * EMU * RPP$	0,97

$TSR = 75,24 + 8,46 * CEM - 0,44 * CEM^2 - 6,39 * EMU + 1,17 * EMU^2 + 3,47 * RPP + 0,82 * RPP^2 - 0,20 * CEM * EMU - 4,75 * CEM * RPP + 0,90 * EMU * RPP$	0,85
$ITSR = 19,26 + 42,84 * CEM - 5,95 * CEM^2 + 8,24 * EMU - 1,88 * EMU^2 - 1,59 * RPP + 0,19 * RPP^2 - 1,31 * CEM * EMU - 2,59 * CEM * RPP + 1,84 * EMU * RPP$	0,90
$\varepsilon_{max}(0^{\circ}C) = 1,14 + 0,0 * CEM + 0,0 * CEM^2 - 0,15 * EMU + 0,03 * EMU^2 + 0,12 * RPP - 0,02 * RPP^2 + 0,01 * CEM * EMU + 0,03 * CEM * RPP - 0,01 * EMU * RPP$	0,30
$\varepsilon_{max}(20^{\circ}C) = 1,41 + 0,25 * CEM + 0,03 * CEM^2 - 0,10 * EMU + 0,02 * EMU^2 - 0,89 * RPP + 0,23 * RPP^2 - 0,02 * CEM * EMU - 0,07 * CEM * RPP - 0,07 * EMU * RPP$	0,44
$K_{IC}(0^{\circ}C) = -0,64 + 2,59 * CEM - 0,08 * CEM^2 + 1,14 * EMU - 0,17 * EMU^2 + 3,22 * RPP - 0,63 * RPP^2 + 0,01 * CEM * EMU + 0,26 * CEM * RPP - 0,01 * EMU * RPP$	0,67
$K_{IC}(20^{\circ}C) = -0,95 + 3,05 * CEM - 0,43 * CEM^2 + 1,34 * EMU - 0,28 * EMU^2 + 0,55 * RPP + 0,23 * RPP^2 + 0,29 * CEM * EMU - 0,31 * CEM * RPP - 0,23 * EMU * RPP$	0,55
$E * (13^{\circ}C; 10Hz) = 545,74 + 4418,57 * CEM + 210,63 * CEM^2 + 445,69 * EMU - 6,89 * EMU^2 = 5659,98 * RPP - 1065,85 * RPP^2 - 479,23 * CEM * EMU - 759,22 * CEM * RPP - 144,62 * EMU * RPP$	0,80

7. Optymalizacja składu mieszanki MCE

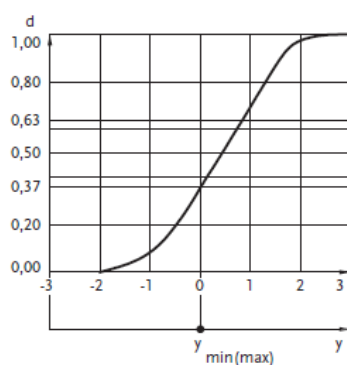
Uzyskane wyniki ujawniły, jak duży wpływ na parametry mieszanki MCE, ma udział poszczególnych środków wiążących oraz modyfikatora polimerowego. Naturalnym wydaje się poszukiwanie optymalnego rozwiązania, które zapewni korzystne właściwości mieszanki MCE, a tym samym podbudowy drogowej wykonanej z tego rodzaju mieszanki. Proces optymalizacji uwzględnia z góry przyjęte kryteria. Zmiana kryteriów optymalizacji prowadzi do istotnych zmian w ujęciu właściwości materiału. Tym samym dla kompleksowej oceny analizowanego zagadnienia w zakresie mieszanek MCE, korzystne jest zastosowanie optymalizacji wielokryterialnej. Wykorzystuje ona uogólnioną funkcję użyteczności [158,159]. We wskazanej metodzie optymalizacji wartość rozważanych kryteriów, wyrażana jest w bezwymiarowej skali. Skonstruowanie tego rodzaju skali, wymaga określenia dla każdego kryterium przedziału wartości zadowalających. Poszczególnym kryteriom przypisuje się nieujemne współczynniki, odzwierciedlających ich ważność. Ich suma musi być równa 1. Określenie odpowiednich wag, dla poszczególnych cech, zakłada znajomość wymagań technicznych. Przy pomocy wskazanej metodyki, określone zostały optymalne ilości składników mieszanki MCE, tj. cementu, emulsji asfaltowej oraz modyfikatora polimerowego. Uogólniona funkcja użyteczności U_i^{III} to liczby z przedziału (0;1). Przedziały jakościowe funkcji, zostały przedstawione tabelarycznie w tablicy 7.1 [158].

Tablica 7.1. Ocena jakościowej funkcji użyteczności [158]

Przedział jakościowy	Interpretacja
1,00	Wartość doskonała.
1,00-0,83	Wartość bardzo dobra reprezentująca uzyskanie jakości materiału o niezwykłych właściwościach optymalizacyjnych.
0,8-0,63	Reprezentuje jakość dobrą powyżej przeciętnej.
0,63-0,37	Wartość satysfakcjonująca (dostateczna) możliwa do przyjęcia w określonych warunkach.
0,37-0,2	Wartość nie do przyjęcia, która może zwiększyć zawodność optymalizowanego produktu.

Użyteczności d_i przypisane poszczególnym cechom $y^{(i)}$ określone są za pomocą dwóch algorytmów, a ich profile przedstawiono na rysunku 7.1.

a)

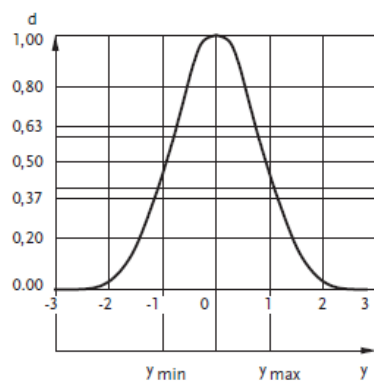


$$d = \exp[-\exp(-y)] = e^{-e^{-y}}$$

oraz

$$Y = \frac{w_i - w_{oi}}{\Delta w_i}$$

b)



$$d = e^{-(|y'|)^n}$$

oraz

$$y' = \frac{2y_u - (y_{\max} + y_{\min})}{y_{\max} - y_{\min}}$$

Rys. 7.1. Profile funkcji użyteczności: a) dla funkcji profilowej jednostronnej (niesymetrycznej), b) dla funkcji profilowej dwustronnej (symetrycznej)

Użyteczność uogólnioną U^{III} lub oznaczoną jako D przyjmuje się jako ważoną średnią geometryczną poszczególnych d_i (7.1) [158]:

$$D = \left[\prod_{u=1}^n d_u \right]^{1/n} \quad (7.1)$$

gdzie: n - liczba zmiennych

Wskazane profile funkcji użyteczności przedstawiają dwa możliwe przypadki jakie można napotkać w procesie optymalizacji. Pierwszy z nich dotyczy sytuacji, gdy wartość graniczna danej cechy jest reprezentowana poprzez jedną wartość (funkcja jednostronna rys.7.1a), oraz przypadek gdy wartość optymalna znajduje się w pewnym przedziale (funkcja dwustronna rys.7.1b). Dlatego zadaniem optymalizacyjnym jest poszukiwanie rozwiązania lub obszaru rozwiązań gdzie funkcja użyteczności przyjmuje wartość co najmniej 0,37. Rozwiązanie optymalne to wynik procesu optymalizacji uwzględniający z góry przyjęte kryteria. Zmiana danego kryterium wpływa istotnie na wynik szacowania pożądanych rezultatów w ujęciu właściwości materiału. Parametry przyjęte do optymalizacji mieszanki MCE w zakresie udziału procentowego: cementu portlandzkiego, emulsji asfaltowej oraz proszku polimerowego przedstawiono poniżej:

- zawartość wolnych przestrzeni V_m ,
- wytrzymałość na pośrednie rozciąganie ITS_{DRY} ,
- moduł sztywności S_m , w temp. 5°C, 13°C oraz 50°C,
- odporność na działanie wody TSR,
- odporność na działanie wody i mrozu $ITSR$,
- odporność na pękanie K_{Ic} w temp. 0°C, 20°C,
- odkształcenia przy maksymalnej sile ε_{\max} .

Do optymalizacji wykorzystano modele prezentowane w tabelicy 6.13.

Na wybór wymienionych parametrów, wpływ miało kilka zależności. Część z nich, to parametry normowe mieszanki MCE, wymagane przez Polskie wytyczne [93]. Mowa tutaj między innymi o odporności na pośrednie rozciąganie ITS_{DRY} , czy zawartości wolnych

przestrzeni. Dla warunków klimatycznych panujących w Europie Środkowej, mieszanka MCE powinna charakteryzować się również odpornością na działanie wody oraz wody i mrozu [98] [99] [100]. Kolejno z założenia optymalna mieszanka ma być trwała. Z maksymalną odpornością na pękanie, przy zachowaniu podatności oraz odkształcalności. Stąd wnikliwa analiza modułu sztywności S_m , w trzech temperaturach pomiarowych, czy uwzględnienie odporności na pękanie mieszanki MCE. Mówiąc o odporność na pękanie mieszanki MCE, nie sposób uwzględnić odkształcenia przy maksymalnej sile. Proces optymalizacji składu mieszanki MCE wykonano przez zastosowanie funkcji Harringtona. [158,159]. Dzięki wykonanym estymowanym modelom regresyjnych funkcji obiektu badań, możliwe było uzyskanie efektów optymalizacji. Wyniki optymalizacji wykonano z krokiem 0,5%, reprezentującym ilość danego składnika w mieszance MCE. Optymalizacja odbywała się na rezultatach aproksymowanych z modeli matematycznych. Wykonano to w taki sposób, aby możliwe było wskazanie zmian właściwości mieszanki MCE, przy podkreślaniu oddziaływania proszku polimerowego. Przykład procesu optymalizacji przedstawiono na rysunku 7.2.

CEM[%]	EMU[%]	RPP[%]	V_m	ITS _{DRY}	TSR	ITCY; 5°C	Pomocnic za V_m	Pomocnic za ITS _{DRY}	Pomocnic za TSR	Pomocnic za ITCY; 5°C	UIII	OPTI	Przypadek
0.5	0	0	12.12	224.17	79.58	6430.88	0.84	0.04	0.22	0.46	0.241	0.241	CEM[%]:0.5/ EMU[%]:0/ RPP[%]:0
0.5	0	0.5	11.59	262.19	80.33	7080.91	0.98	0.08	0.49	0.70	0.406	0.406	CEM[%]:0.5/ EMU[%]:0/ RPP[%]:0.5
0.5	0	1	11.24	291.07	81.49	7611.29	0.93	0.13	0.80	0.72	0.510	0.510	CEM[%]:0.5/ EMU[%]:0/ RPP[%]:1
0.5	0	1.5	11.09	310.79	83.06	8022.03	0.89	0.16	0.95	0.74	0.566	0.566	CEM[%]:0.5/ EMU[%]:0/ RPP[%]:1.5
0.5	0	2	11.14	321.37	85.04	8313.13	0.90	0.18	0.99	0.75	0.594	0.594	CEM[%]:0.5/ EMU[%]:0/ RPP[%]:2
0.5	0	2.5	11.38	322.80	87.43	8484.57	0.97	0.19	1.00	0.76	0.609	0.609	CEM[%]:0.5/ EMU[%]:0/ RPP[%]:2.5
0.5	0	3	11.81	315.09	90.22	8536.38	0.92	0.17	1.00	0.76	0.589	0.589	CEM[%]:0.5/ EMU[%]:0/ RPP[%]:3
0.5	0	3.5	12.44	298.22	93.43	8468.53	0.77	0.14	1.00	0.76	0.534	0.534	CEM[%]:0.5/ EMU[%]:0/ RPP[%]:3.5

Rys. 7.2. Optymalizacja składu mieszanki MCE

W celu kompleksowej oceny wpływu analizowanych spoiw i modyfikatora polimerowego na zachowanie mieszanki MCE wyodrębniono cztery obszary, dla których określono optymalne rozwiązania.

I. Optymalizacja w aspekcie zachowania wymagań polskich wytycznych, poszukiwano mieszanki MCE, która spełnia polskie wytyczne do projektowania i wbudowywania mieszank MCE. [93] Tym samym mieszanka charakteryzuje się odpowiednim modułem sztywności S_m w 5°C. Podbudowa droga wykonania z mieszanki MCE, powinna również zawierać odpowiednią ilość wolnych przestrzeni V_m , do 15%. Wiąże się z tym również parametr odporności na pośrednie rozciąganie ITS_{DRY}, oraz odporność na działanie wody TSR.

II. Optymalizacja w aspekcie odporności na działanie wody oraz mrozu, założenia optymalizacji nr II, pokrywają się z założeniami I, czyli spełnieniem parametrów wymaganych przez wytyczne. Dodatkowo podkreśla warunki klimatyczne, opisane poprzez parametr odporność na działanie wody (TSR) oraz odporność na działanie wody i mrozu (ITS_R).

III. Optymalizacja w aspekcie zwiększonej odporności na pękanie, dla wskazanej optymalizacji, mieszanka MCE spełnia założenia wytycznych, uwzględnione w punkcie nr I, ponadto wskazane jest aby mieszanka MCE charakteryzowała się zwiększoną odpornością na pękanie. W tym celu określono optymalne wartości odkształcenia przy maksymalnej sile

ε_{\max} , oraz wskaźnika odporności na pękanie mieszanki K_{IC} . Uwzględnione dwie temperatury pomiaru, 0°C oraz 20°C.

IV. Optymalizacja w aspekcie uzyskania optymalnej sztywności, przy ostatniej optymalizacji uwagę skupiono na zdolność mieszanki do odkształceń w niższych temperaturach, oraz zachowania trwałości w wyższych. W tym celu optymalizowano skład mieszanki MCE, w zakresie modułu sztywności S_m w temperaturze 13°C, oraz 50°C. Ponadto uwzględniono odpowiednią zawartość wolnych przestrzeni, odporność na pośrednie rozciąganie ITS oraz odporność na działanie wody TSR.

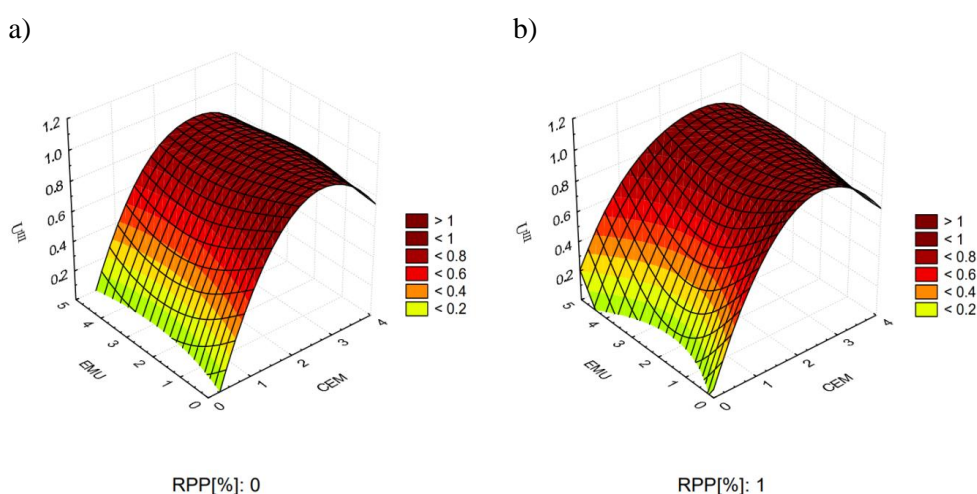
7.1 Optymalizacja w aspekcie zachowania wymagań polskich wytycznych

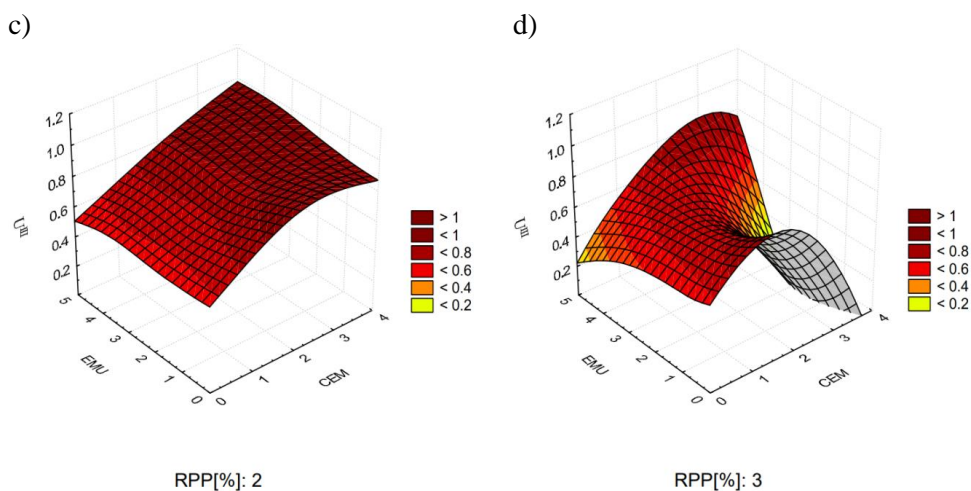
Wartości przyjęte do wykonania optymalizacji składu mieszanki MCE, zostały opisane za pomocą normowych wymagań. Wartości parametrów do optymalizacji przyjęto zgodnie z polskimi wytycznymi dla mieszank MCE [93]. Parametry przyjętego kryterium zestawiono poniżej w tablicy 7.2.

Tablica 7.2. Kryterium optymalizacji – MCE spełniające wymagania polskich wytycznych

	Zawartość wolnych przestrzeni (V_m)	Wytrzymałość na pośrednie rozciąganie (ITS _{DRY})	S_m (IT-CY) 5°C	TSR
	[%]	[kPa]	[MPa]	[%]
lepsza	8	550	7000	81
gorsza	15	400	2000	80

Rezultaty optymalizacji przedstawia rysunek 7.3, za pomocą funkcji odpowiedzi prezentującej wartości funkcji użyteczności U^{III} . W ramach kryterium uwzględniono zawartość wolnych przestrzeni V_m , w przedziale między 8% a 15%, odporność na pośrednie rozciąganie powyżej 550 kPa, moduł sztywności S_m w temp. 5°C o wartościach między 2000 MPa – 7000 MPa, oraz odporność na działanie wody TSR powyżej 80%.





Rys. 7.3. Zmiana funkcji użyteczności w zależności od ilości udziału procentowego składników dla normowych właściwości mieszanki MCE

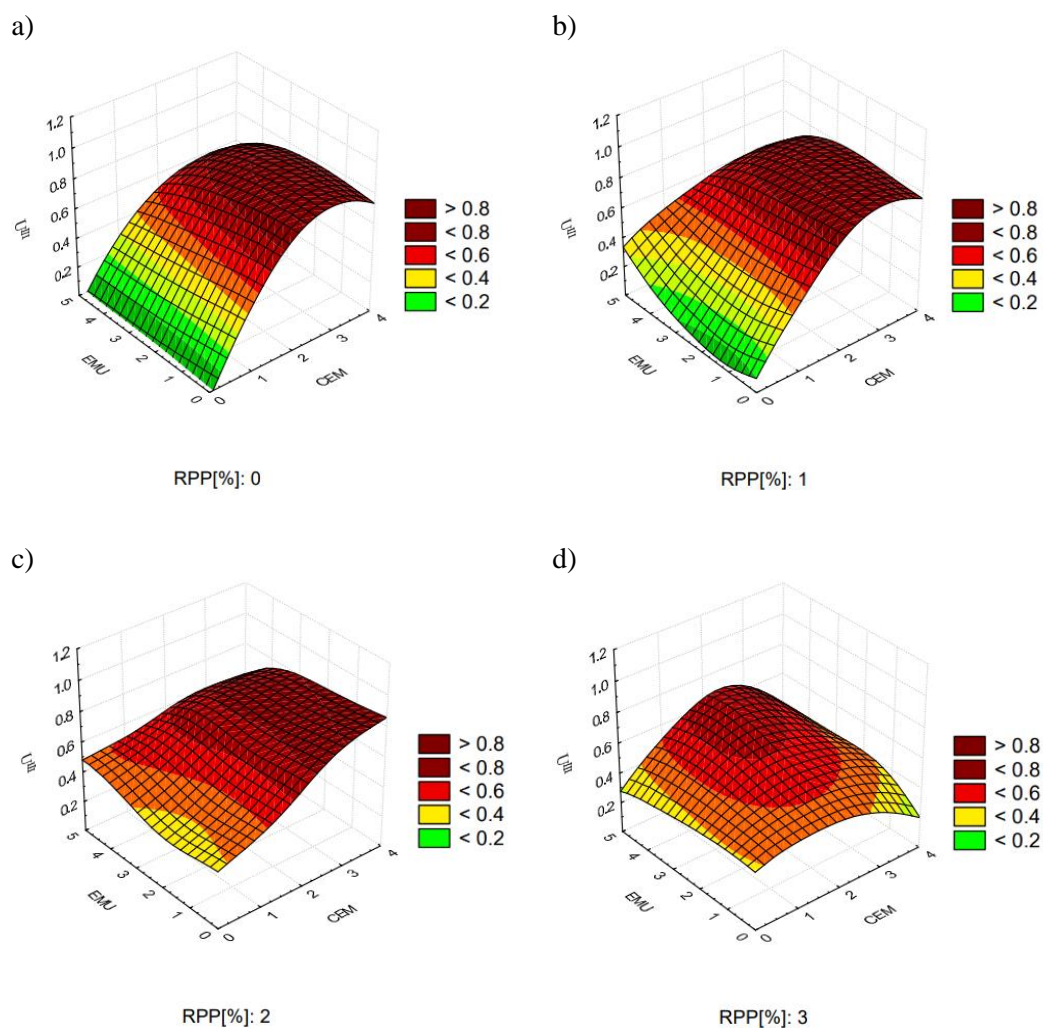
Dla uzyskania efektu, założonego w kryterium optymalizacji (tablica 7.1), konieczne jest stosowanie cementu portlandzkiego w ilości między 2,0% a 3,0%. Ilość emulsji asfaltowej nie wpływa znacząco na założenia określone w kryterium I. Obecność modyfikatora polimerowego prowadzi do poprawy parametrów mieszanki MCE. Przy ilości proszku RPP równej 2,0% w składzie mieszanki MCE, kryterium optymalizacji w pełni uzyskiwane jest dla mieszanek MCE zawierających minimum 1,0% cementu oraz 0,5% emulsji asfaltowej. Tym samym obecność modyfikatora RPP poprawia parametry normowe mieszanki MCE, daje również możliwość redukcji zawartości pozostałych spoiw. Zwiększenie modyfikatora RPP do 3,0%, powoduje pogorszenie parametrów mieszanki MCE. Optymalne jest stosowanie 2,0% proszku RPP w składzie mieszanki MCE. Dla mieszanek MCE zawierających od 2,5% do 3,0% cementu, polimeru w ilości 1,5% - 2,0%, oraz emulsji asfaltowej w ilości 1,0-2,0% funkcja użyteczności U_i^{III} zawiera się w przedziale między 0,89 a 0,98. Przykładem jest mieszanka MCE o symbolu 2,5C-1,5P-1E.

7.2 Optymalizacja w aspekcie odporności na działanie wody oraz mrozu

Zdefiniowano wartości parametrów, które podkreślą wodo- i mrozoodporność mieszanki MCE. Pozostałe wartości parametrów do optymalizacji zostały przyjęte z polskimi wytycznymi dla mieszanek MCE [93]. Uwzględniono zatem odporność na rozciąganie pośrednie ITS_{DRY} , które zawiera się w przedziale powyżej 550 kPa. Zawartość wolnych przestrzeni V_m w ilości między 8% a 14%, moduł sztywności S_m , zbadany w temp. 5°C 3000 MPa a 7000 MPa. Kolejno odporność na działanie wody TSR powyżej 80%, oraz wody i mrozu $ITSR$ powyżej 70%. Parametry przyjętego kryterium zestawiono w tablicy 7.3., natomiast rezultaty optymalizacji przedstawia rysunek 7.4.

Tablica 7.3. Kryterium optymalizacji – mieszanka MCE odporna na działanie wody oraz mrozu

	Zawartość wolnych przestrzeni (V_m)	Wytrzymałość na pośrednie rozciąganie (ITS_{DRY})	S_m (IT-CY) 5°C	TSR	ITSR
	[%]	[kPa]	[MPa]	[%]	[%]
lepsza	8	550	7000	81	71
gorsza	14	400	3000	80	70



Rys. 7.4. Zmiana funkcji użyteczności w zależności od ilości udziału procentowego składników dla wodo- i mrozoodporności mieszanki MCE

Spełnienie założonego kryterium optymalizacji możliwe jest przy zastosowaniu 2,0% cementu oraz od 1,0% do 3,0% emulsji asfaltowej w składzie mieszanki MCE. Zmiana ilości modyfikatora RPP z 0,0% do 1,0% nie wpływa znacząco na rezultaty optymalizacji. Efekt uszczelnienia widoczny jest przy zawartości proszku RPP równej 2,0%. Parametry mieszanki ulegają poprawie, przy obecności minimalnej ilości cementu oraz emulsji asfaltowej, tj. około 1,0%. Tym samym stosowanie 2,0% modyfikatora polimerowego w składzie mieszanki MCE, pozwala na redukcję zawartości pozostałych spoiw, przy zachowaniu odpowiednio wysokich, pożądanych parametrów wodo i mrozoodporności (tablica 7.3). Wzrost ilości modyfikatora RPP do 3,0% prowadzi do obniżenia efektu założonego

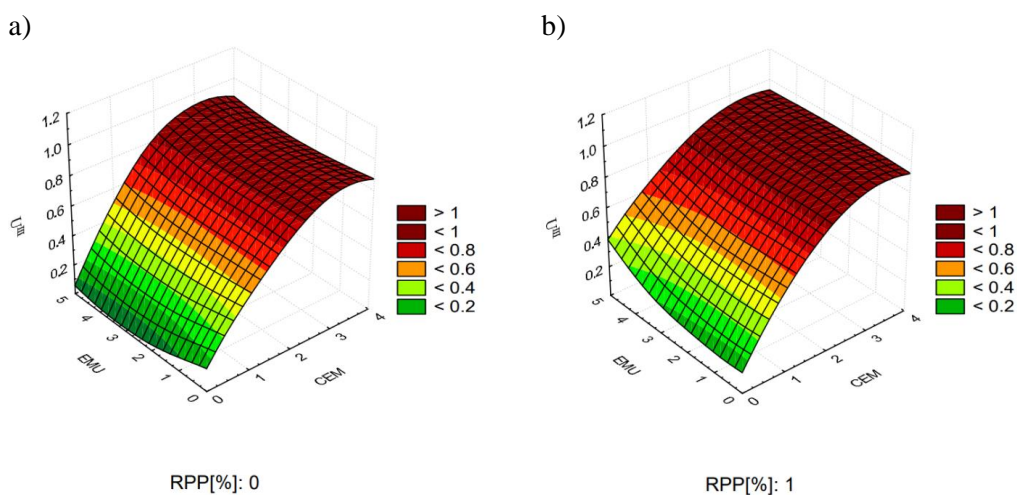
w kryterium optymalizacji. Oznacza to, że nie ma konieczności zwiększania ilości RPP powyżej 2,0% w składzie mieszanki MCE. Tym samym dla mieszanek MCE zawierających od 2,0% do 2,5% cementu, proszku polimerowego w ilości 1,5% - 2,0%, oraz emulsji asfaltowej w ilości 0,0-1,0% funkcja użyteczności U_i^{III} zawiera się w przedziale między 0,70 a 0,82. Jako optymalne rozwiązania można wskazać mieszankę MCE o symbolu 2,5C-1,5P-1E.

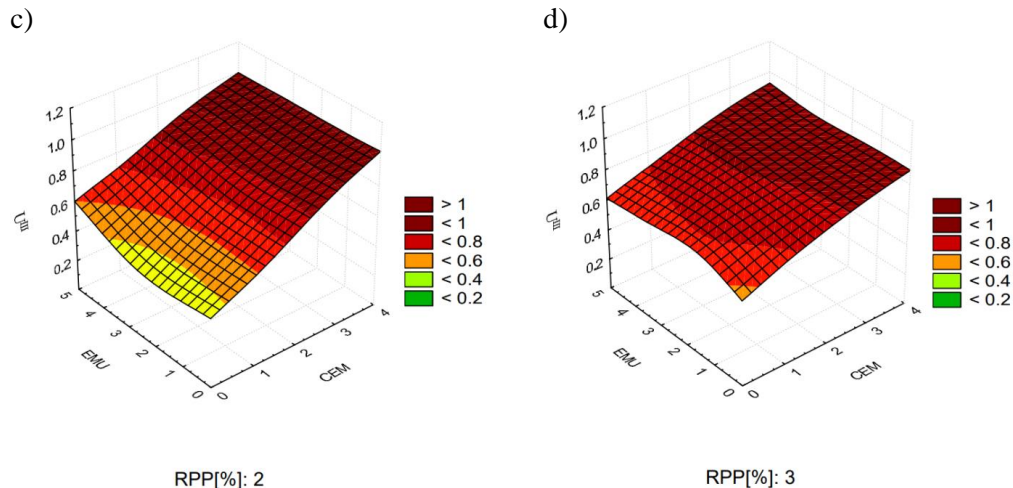
7.3 Optymalizacja w aspekcie zwiększonej odporności na pękanie

Dla trzeciego kryterium zdefiniowano wartości parametrów, które podkreślą zwiększoną odporność na pękanie mieszanki MCE. Dla uzyskania pożądaných rezultatów, zmianie poddano parametry odporności na pękanie. Uzyskano to poprzez zwiększenie współczynnika K_{IC} , powyżej $4,1 \text{ N/mm}^{1.5}$ oraz zwiększenie odkształcalności ε_{max} powyżej 1,1%. Wartości przyjęto zarówno dla temperatury pomiaru 0°C jak i 20°C . Pozostałe wartości zostały zachowane względem kryterium II. Mowa tutaj o V_m w przedziale 8% a 14%, odporności na pośrednie rozciąganie ITS, powyżej 900 kPa, wskaźniku TSR większym niż 81%. Parametry przyjęte do optymalizacji zestawiono w tablicy 7.4, natomiast rezultaty optymalizacji przedstawia rysunek 7.5.

Tablica 7.4. Kryterium optymalizacji – mieszanka MCE o zwiększonej odporności na pękanie

	V_m	ITS_{DRY}	IT-CY 5°C	TSR	$K_{IC} 0^\circ\text{C}$	$K_{IC} 20^\circ\text{C}$	$\varepsilon_{max} 0^\circ\text{C}$	$\varepsilon_{max} 20^\circ\text{C}$
	[%]	[MPa]	[MPa]	[%]	[N/mm ^{1.5}]	[N/mm ^{1.5}]	[%]	[%]
lepsz	8	900	7000	81	4,1	4,1	1,1	1,1
gorsza	14	700	2000	80	4,0	4,0	1,0	1,0





Rys. 7.5. Zmiana funkcji użyteczności w zależności od ilości udziału procentowego składników dla zwiększonej odporności na pęknięcie mieszanki MCE

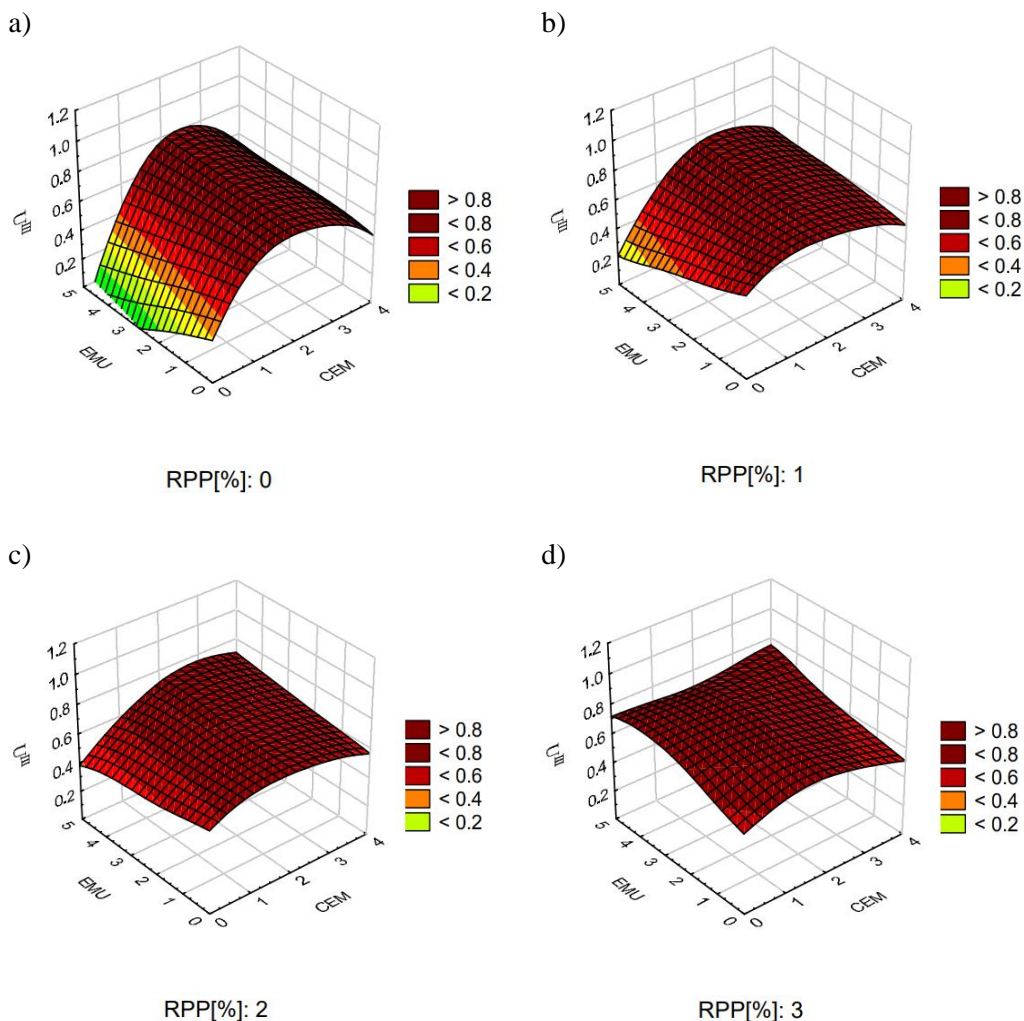
Rozpatrując tradycyjne mieszanki MCE (rys. 7.5a), uzyskanie kryteriów optymalizacji, podkreślających zwiększoną odporność na pęknięcie, możliwe jest przy zastosowaniu w składzie mieszanki MCE, cementu w ilości nie mniejszej niż 2,0%. Obecność modyfikatora RPP w mieszance MCE, znacząco wpływa na poprawę jej odporności na pęknięcie. Przy zawartości 2,0% polimeru RPP w składzie mieszanki MCE możliwe jest ograniczenie ilości cementu z 2,5% do około 1,0%. Interakcja cementu portlandzkiego oraz proszku polimerowego powoduje usieciowanie mieszanki MCE, co prowadzi do większej odporności na pęknięcie. Potwierdzone to zostało w rozdziale 6.4. Obecność modyfikatora polimerowego RPP w ilości 3,0% pozwala na redukcję cementu oraz emulsji asfaltowej do minimum, tj. około 0,5%. Mieszanka MCE będzie w pełni spełniać przyjęte kryteria optymalizacji w tabelicy 7.4. Wykonana optymalizacja pozwoliła ustalić, że dla mieszanek MCE zawierających 2,0% cementu oraz proszek polimerowy w ilości 1,5% - 2,5%, oraz emulsję asfaltową w ilości 0,0-1,0% funkcja użyteczności U_I^{III} zawiera się w przedziale między 0,78 a 0,93. Dla omawianego kryterium wskazano mieszankę 2C-1,5P-1E.

7.4 Optymalizacja w aspekcie uzyskania optymalnej sztywności

Zdefiniowano wartości parametrów, które podkreślą odpowiedni moduł sztywności mieszanki MCE w zależności od temperatury otoczenia. Dla uzyskania pożądaných rezultatów, analizie poddano moduł sztywności S_m w dwóch temperaturach. Uwzględniono pomiar w 13°C, dla którego wartość modułu ma zawierać się w przedziale między 2000 MPa, a 12000 MPa. Kolejno w wysokiej temperaturze pomiaru, jak 50°C. Korzystnie gdy moduł sztywności jest wyższy od 1000 MPa. Pozostałe wartości zostały bez zmian, względem kryterium III. Parametry przyjętego kryterium zestawiono w tabelicy 7.5., natomiast rezultaty optymalizacji przedstawia rysunku 7.6.

Tablica 7.5. Kryterium optymalizacji – mieszanka MCE o optymalnej sztywności

	Zawartość wolnych przestrzeni (V_m)	Wytrzymałość na pośrednie rozciąganie (ITS_{DRY})	IT-CY 13°C	IT-CY 50°C	TSR
	[%]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[%]
lepsza	8	900	12000	1000	81
gorsza	14	700	2000	900	80



Rys. 7.6. Zmiana funkcji użyteczności w zależności od ilości udziału procentowego składników dla modułu sztywności mieszanki MCE

Kryteria optymalizacji zakładają spełnienia warunków normowych, przy zachowaniu sztywności mieszanki w wysokiej temperaturze. Dla tradycyjnej mieszanki MCE, bez modyfikatora polimerowego, korzystnie gdy ilość cementu portlandzkiego zawiera się w przedziale 1,5%-3,0%. Dodatek modyfikatora RPP do mieszanki MCE w ilości 1,0% prowadzi do poprawy rezultatów, przy minimalnej zawartości cementu. Wzrost ilości RPP kolejno do 2,0% i 3,0% w składzie mieszanki MCE, prowadzi do spełnienia założeń kryteriów optymalizacji przy równoczesnej redukcji ilości cementu oraz emulsji asfaltowej w składzie. Zapewni to uzyskanie trwałej podbudowy, oraz zminimalizuje również ryzyko wystąpienia spękań

odbitych, które powodowane są przez przeszywnienie podbudowy wykonanej z mieszanki MCE. Spełnione zostały kryteria optymalizacji przyjęte w tab. 7.5. Wykonana optymalizacja pozwoliła ustalić, że dla mieszanek MCE zawierających 2,5% cementu, modyfikatora RPP w ilości 1,5% - 2,5%, oraz emulsji asfaltowej w ilości 0,0-1,0% funkcja użyteczności U_i^{III} wynosi równo 0,68. Przykładem optymalnego składu mieszanki MCE jest 2,5C-1,5P-0,5E.

7.5 Podsumowanie

Opisany proces optymalizacji składu mieszanki MCE, w zakresie ilości cementu portlandzkiego, emulsji asfaltowej oraz modyfikatora polimerowego, pozwolił na wytypowanie dwóch mieszanek MCE. Wynika to z uwzględnienia wszystkich kryteriów optymalizacji. Pierwsza z mieszanek zawierała w swoim składzie 2,5% cementu portlandzkiego, 2,0% emulsji asfaltowej oraz 0% modyfikatora polimerowego. Jej właściwości zostały porównane z mieszanką MCE o składzie: 2,5% cementu portlandzkiego, 2,0% modyfikatora polimerowego oraz 0% emulsji asfaltowej. Wybrano te dwie kombinacje składników, ponieważ mieszanki dla zadanych kryteriów optymalizacji, wykazały bardzo podobne oraz równocześnie korzystne właściwości. W tabelicy 7.6 zestawiono funkcje użyteczności U_i^{III} dla każdego z rozpatrywanych kryteriów optymalizacji.

Tablica 7.6. Funkcje użyteczności dla mieszanek MCE po procesie optymalizacji

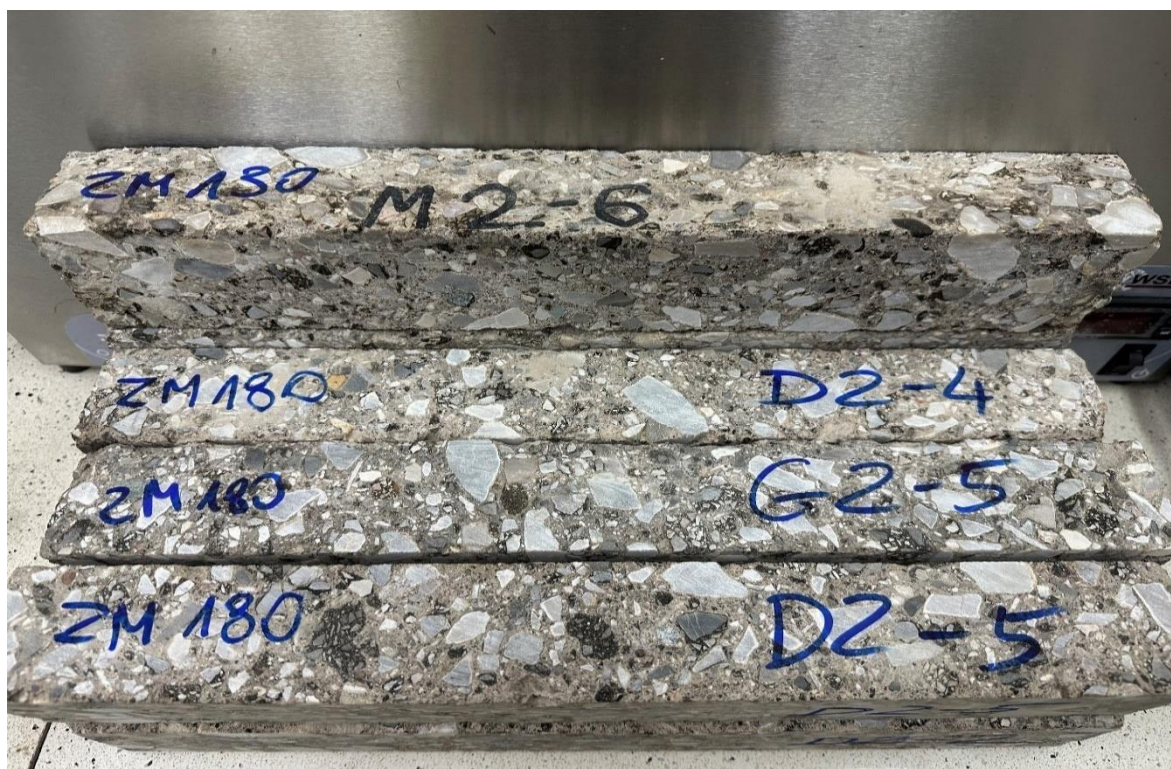
Kod mieszanki	Wartość funkcji użyteczności U_i^{III}			
	Kryterium I	Kryterium II	Kryterium III	Kryterium IV
2,5C-0P-2E	0,90	0,78	0,83	0,65
2,5C-2P-0E	0,94	0,84	0,85	0,66

Mając na uwadze skład mieszanek mineralno-cementowych z emulsją asfaltową oraz modyfikatorem polimerowym, w dalszej części pracy, mieszankę 2,5C-0P-2E oznaczono jako MCE, natomiast 2,5C-2P-0E jako MCP. Mieszanka MCP uzyskała wyższe wartości dla każdej z czterech funkcji użyteczności niż tradycyjna mieszanka MCE. **Tym samym potwierdza się możliwość minimalizacji ilości tradycyjnych spoiw na rzecz modyfikatora polimerowego RPP. Istnieje również szansa na całkowite wyeliminowanie emulsji asfaltowej z recyklowanej mieszanki MCE.** Dla kryterium I normowego, mieszanka MCE z RPP 0,94, tradycyjna mieszanka 0,90. Dla kryterium wodo- i mrozoodporności 0,84 przy 0,78 dla mieszanki z emulsją asfaltową. Kryterium III zakładające większą odporność na pękanie mieszanki, dla 2,5C-2P-0E funkcja użyteczności wynosi 0,85, natomiast 2,5C-0P-2E to wartość U_i^{III} równa 0,83. Kryterium IV, które zakłada optymalizację modułu sztywności mieszanki MCE, mieszanka z polimerem RPP uzyskała wartość funkcji użyteczności 0,66, natomiast z emulsją asfaltową 0,65.

8. Moduł sztywności oraz trwałość zmęczeniowa w teście czteropunktowego zginania mieszanki mineralno-cementowej z emulsją asfaltową oraz mineralno-cementowej z polimerem

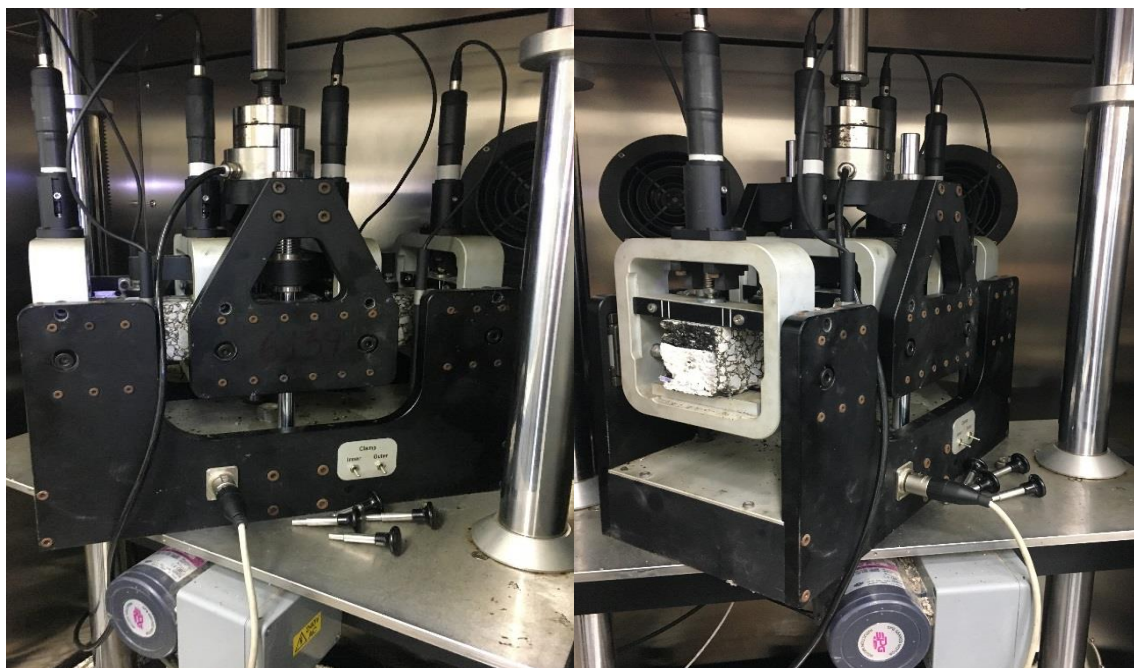
8.1 Badanie modułu sztywności w teście czteropunktowego zginania

Wartość modułu sztywności mieszanek z modyfikatorem polimerowym wyznaczono badaniem belki pryzmatycznej czteropunktowo zginanej. Uzyskano w ten sposób moduł zespolony, zgodnie z PN-EN 12697-26 [101], Załącznik B. Pomiar polega to na czteropunktowym, okresowym zginaniu, przy czym należy pamiętać, aby zapewnić próbce swobodną rotację oraz poziome przyłożenie wszystkich obciążeń oraz punktów reakcji. Proces zginania wywołany jest ruchem środkowych punktów, które obciążają materiał pionowo, prostopadle w stosunku do wzdłużnej osi. Okresowe przemieszczenie powinno być symetryczne względem punktu zero i sinusoidalne, natomiast amplituda przemieszczenia stała. Wskazane, aby w trakcie badania, siła konieczna do wywołania odkształcenia próbki, była mierzona w postaci funkcji czasu, razem z kątem fazowym między impulsem siły i przemieszczeniem. Dzięki tym danym możliwe jest wyznaczenie modułu sztywności. Pomiar wykonano w temperaturze 13°C i częstotliwości 10Hz. Belki wykorzystane w badaniu przedstawiono na rysunku 8.1



Rys. 8.1. Belki stosowane do badania modułu sztywności w układzie 4PB-PR

Próbki, w kształcie prostopadłościanu, przeznaczone do badania wycięto z płyt uprzednio przygotowanych w laboratorium. W czasie oznaczenia, 4 zaciski zostały równo rozmieszczone, w odległościach A, L-2A oraz A, przy tolerancji $\pm 2\text{mm}$, natomiast odległość A, to około $L/3$ całej długości. Schemat urządzenia przedstawiono na rysunku 8.2.



Rys. 8.2. Pomiar sztywności w układzie 4PB-PR

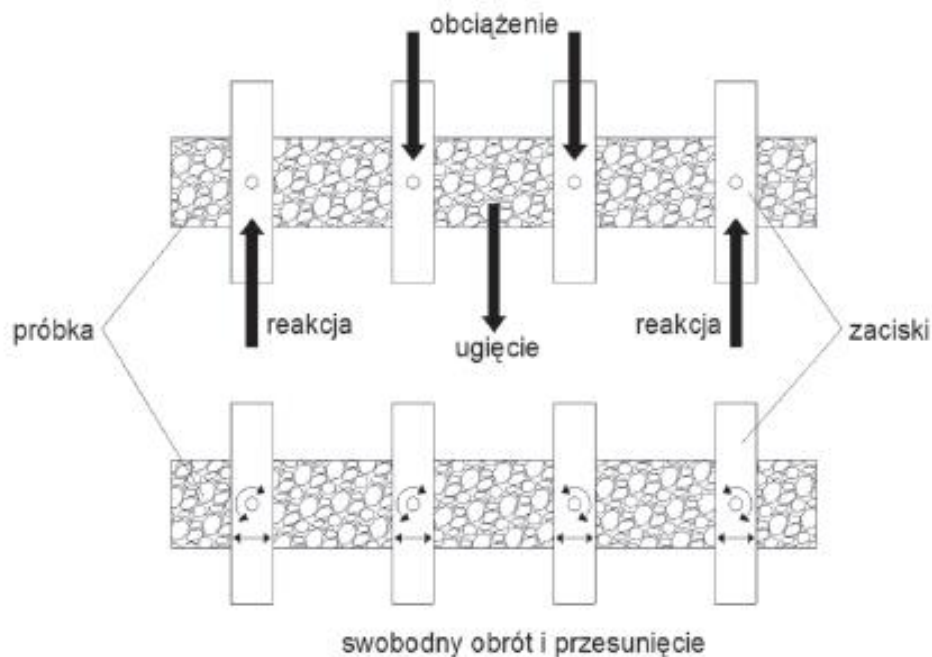
W momencie badania, do próbki zostaje przyłożono siłę sinusoidalną, dla uzyskania amplitudy odkształcenia na poziomie 50 ± 3 mikroadkształceń. Wskazane, aby amplituda ugięcia mieściła się w granicy 2%, w stosunku do nominalnej wartości. Podczas pomiaru rejestrowana jest siła F_0 , razem z ugięciem z_0 , kątem fazowym Φ , oraz temperaturą pomiaru i częstotliwością. Moduł sztywności określa się po stu cyklach obciążenia próbki. W tabelicy 8.1 zestawiono średnie wartości modułu sztywności, uzyskanego dla wytypowanych w procesie optymalizacji mieszanek, odczytane po setnym cyklu obciążenia. Mieszanka MCE posiada niższy moduł sztywności od mieszanki z modyfikatorem polimerowym MCP. Różnica wynosi około 15%. Współczynniki zmienności osiągają wartość od 5,3% dla mieszanki MCP, do 6,2% dla tradycyjnej mieszanki MCE.

Tab.8.1.: Moduł sztywności mieszanek MCE i MCP

	CEM [%]	EMU [%]	RPP [%]	Moduł sztywności w 13°C [MPa]	Współczynnik zmienności [%]	Odchylenie standardowe
MCE	2,5	2,0	0,0	5300,00	6,2	328,5
MCP	2,5	0,0	2,0	6100,00	5,3	313,3

8.2 Badanie trwałości zmęczeniowej w teście czteropunktowego zginania

Trwałość zmęczeniową wyznaczono w teście 4-punktowego zginania próbek o kształcie pryzmatycznym, zgodne z PN-EN 12697-24 [103]. Badanie pozwala ocenić, jak zachowują się mieszanki poddane próbie obciążenia zmęczeniowego, które przebiega w aparacie 4-punktowego zginania próbek. W czasie badania, pryzmatyczna belka poddawana jest 4-punktowemu zginaniu, przy zachowaniu swobodnego obrotu oraz przesunięcia w każdym punkcie przyłożenia obciążenia i reakcji. Schemat mocowania próbki zestawiono na rysunku 8.3.



Rys. 8.3. Schemat mocowania oraz badania trwałości zmęczeniowej dla metody 4PB-PR [103]

Zginanie wywoływane jest przez obciążanie w kierunku pionowym wewnętrznych uchwytów. Obciążenie to następuje prostopadle w stosunku do osi podłużnej próbki i powinno zmieniać się sinusoidalnie. Podczas badania wewnętrzne oraz zewnętrzne zaciski rozmieszczone są symetrycznie w stosunku do środka próbki. Przyłożone obciążenie prowadzi do powstania stałego momentu zginającego, który powoduje odkształcenie. W czasie przebiegu badania następuje pomiar: siły potrzebnej do zginania belki, ugięcia oraz kąta przesunięcia fazowego pomiędzy siłą i ugięciem. Ostatecznie trwałość zmęczeniową próbki do badań określa się zgodnie z wybranym kryterium zniszczenia. Pomiar wykonano w temperaturze 10°C. Próbkę przeznaczoną do badań powinny mieć kształt belki pryzmatycznej, o wymiarach 55x55x400mm, tak jak na rysunku 8.1. Układ pomiarowy wykorzystany do oceny trwałości zmęczeniowej mieszanki MCE oraz mieszaniny MCP przedstawiono na rysunku 8.4.



Rys. 8.4. Badanie trwałości zmęczeniowej w schemacie obciążenia 4PB-PR [Krasowski J.]

Podstawowe zależności, które umożliwiają określenie naprężeń oraz odkształceń omawianego przypadku, opisuje formuła (8.1) oraz (8.2.).

$$\sigma_i = \frac{3 * P_0 * c}{b * h^2} \quad (8.1)$$

gdzie: σ_i – amplituda naprężenia w i-tym cyklu badania [MPa], P_0 – maksymalna siła [N], c – odległość między podporą i siłą [mm], b – szerokość próbki [mm], h – wysokość próbki [mm]

$$\varepsilon_i = \frac{12 * w_0 * h}{3 * L^2 - 4 * c^2} \quad (8.2)$$

gdzie: ε_i – amplituda odkształcenia w i-tym cyklu badania [-], w_0 – maksymalne przemieszczenie [mm], h – wysokość próbki [mm], L – długość efektywna próbki [mm], c – odległość między podporą i siłą [mm]

Na podstawie znanej amplitudy naprężenia i odkształcenia w analizowanym cyklu oraz kąta przesunięcia fazowego można ustalić m.in. moduł sztywności, który zależy od warunków temperaturowych i częstotliwości badania. Ogólny wzór zapisano przy pomocy równania (8.3).

$$|E_i^*(T, f)| = \frac{\sigma_i}{\varepsilon_i} \quad (8.3)$$

gdzie: $|E_i^*(T, f)|$ – moduł sztywności ustalony w stałej temperaturze badania i częstotliwości obciążenia [MPa], σ_i – amplituda naprężenia w i-tym cyklu badania [MPa], ε_i – amplituda odkształcenia w i-tym cyklu badania [-]

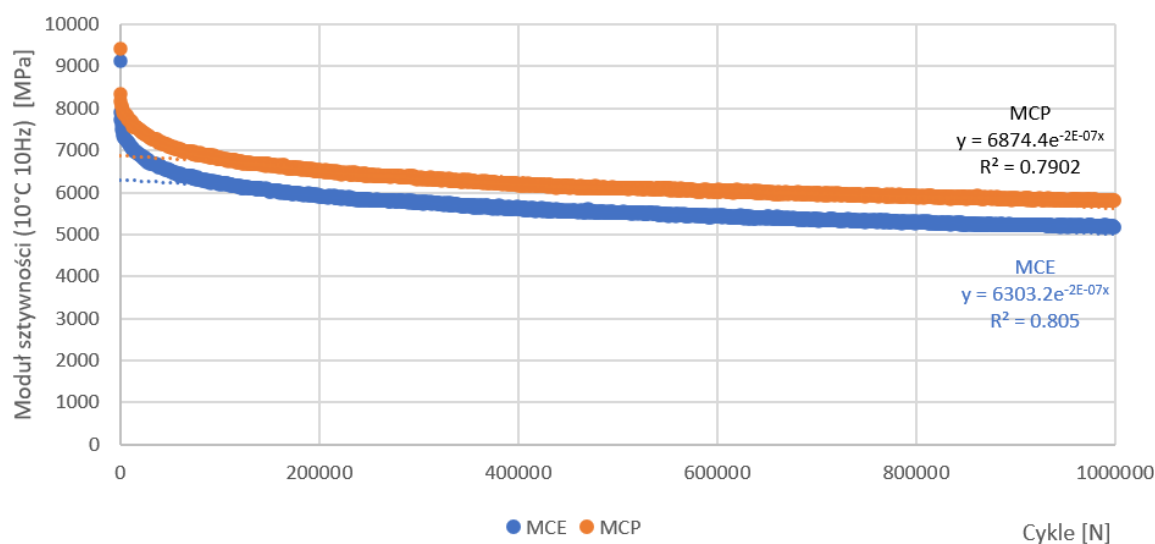
W tabelicy 8.3 zaprezentowano plan oceny trwałości zmęczeniowej mieszanki MCE i mieszanki MCP w zakresie odkształcenia.

Tab.8.3.: Wartość odkształcenia wykorzystana w badaniu trwałości zmęczeniowej mieszanek

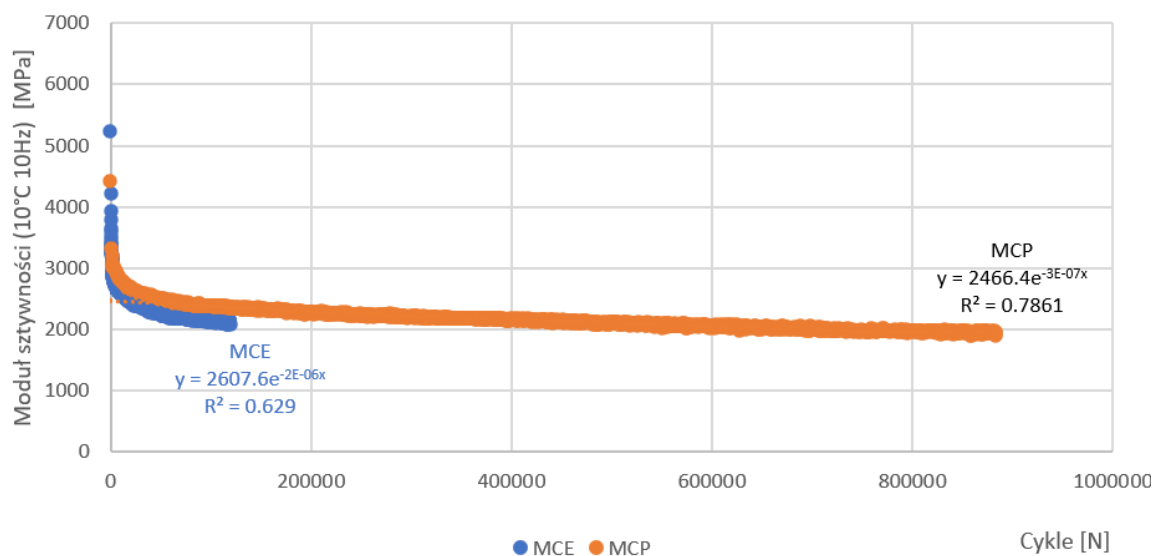
Mieszanka	Zadane odkształcenie [$\mu\varepsilon$]				
MCE	80,0	115,0	130,0	150,0	180,0
MCP	80,0	115,0	130,0	150,0	180,0

Dla pomiarów wykonanych przy zadanym naprężeniu 80 $\mu\varepsilon$, 115 $\mu\varepsilon$ oraz 130 $\mu\varepsilon$ nie zaobserwowano utraty trwałości zmęczeniowej. Ocenę trwałości zmęczeniowej rozpoczęto od odkształcenia równego 115 $\mu\varepsilon$. Uzyskane wyniki wykazały, że zarówno mieszanka MCP jak i MCE wykazały trwałość równą milionowi cykli obciążenia. Dlatego też w celu zaobserwowania efektu utraty trwałości zmęczeniowej, niezbędne było zwiększenie poziomu odkształcenia. Poniżej, na rysunku 8.5 zestawiono spadek wartości modułu sztywności recyklowanych mieszanek, w zależności od zadanego odkształcenia oraz cykli obciążenia.

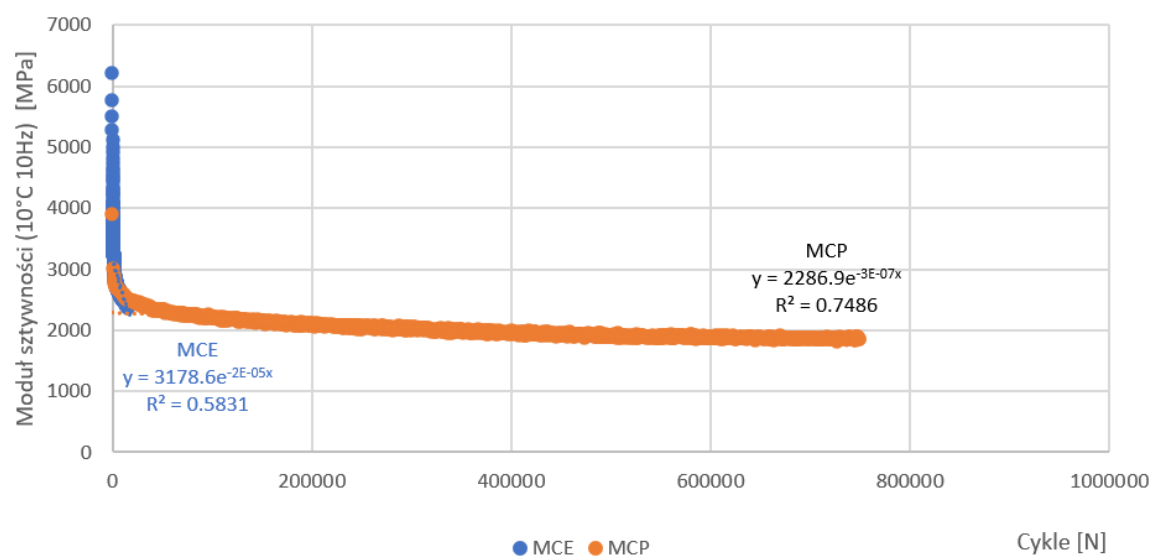
a)



b)



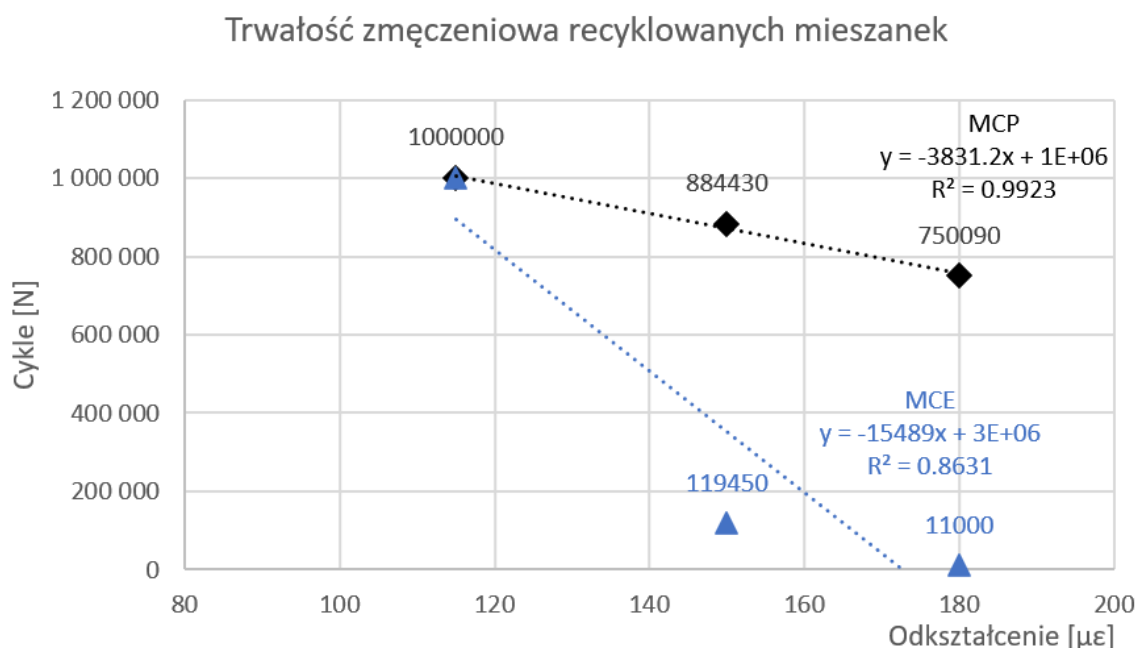
c)



Rys. 8.5. Zmiana modułu sztywności, przy zadanym odkształceniu: a) 115 $\mu\epsilon$, b) 150 $\mu\epsilon$, c) 180 $\mu\epsilon$

Badanie w temperaturze 10°C, z obciążeniem przykładanym w częstotliwości 10Hz, wskazuje na zbliżony przebieg zmiany modułu sztywności recyklowanych mieszank, przy odkształceniu równym 115 $\mu\epsilon$ (rys.8.5a). Zarówno mieszanka z modyfikatorem polimerowym (MCP), jak i tradycyjna mieszanka MCE zachowują trwałość miliona cykli obciążenia, przy zadanym odkształceniu równym 115 $\mu\epsilon$. Dla mieszanki MCP odnotowano średni spadek wartości modułu o 35%, natomiast dla mieszanki z emulsją asfaltową średni spadek równy około 45%. Funkcja wykładnicza dobrze opisuje zależność spadku modułu w aspekcie ilości cykli obciążenia, współczynnik determinacji R^2 jest równy 0,80, dla obydwóch mieszank. Kolejno na rysunku 8.5b zaprezentowano spadek wartości modułu sztywności recyklowanych mieszank przy odkształceniu równym 150 $\mu\epsilon$. Mieszanka z modyfikatorem

polimerowym MCP charakteryzuje się znacznie mniejszym spadkiem modułu sztywności. Utratę połowę wartości początkowej modułu sztywności zanotowano średnio po 884 tysiącach cykli obciążenia. Dla mieszanki MCE spadek 50% wartości początkowego modułu sztywności odnotowano już po 120 tysiącach cykli obciążenia. Tym samym przy odkształceniu równym 150 $\mu\epsilon$, modyfikator polimerowy znacznie poprawia trwałość zmęczeniową recyklowanej mieszanki MCP. Ostatnim krokiem badania trwałości zmęczeniowej było poddanie próbek mieszanki MCE oraz MCP odkształceniu równym 180 $\mu\epsilon$. Uzyskane wyniki zaprezentowano na rysunku 8.5c. Trwałość zmęczeniowa mieszanki z modyfikatorem polimerowym MCP to ponad 700 tysięcy cykli obciążenia, do momentu spadku połowy wartości modułu sztywności, wyznaczonego po 100 cyklach obciążenia. Mieszanka MCE w przypadku odkształcenia 180 $\mu\epsilon$ w warstwie traci swą trwałość zmęczeniową po 11 tysiącach cykli obciążenia. Podsumowując uzyskane rezultaty graficznie (rys.8.6) przedstawia zmianę trwałości zmęczeniowej mieszanek MCE i MCP, w zależności od zadanego odkształcenia. Średnie wartości liczbowe analizowanego procesu zmęczenia mieszanek MCE oraz MCP przedstawiono w tabelicy 8.4.



Rys. 8.6. Trwałość zmęczeniowa w zależności od zadanego odkształcenia

Tab.8.4.: Trwałość zmęczeniowa recyklowanych mieszanek

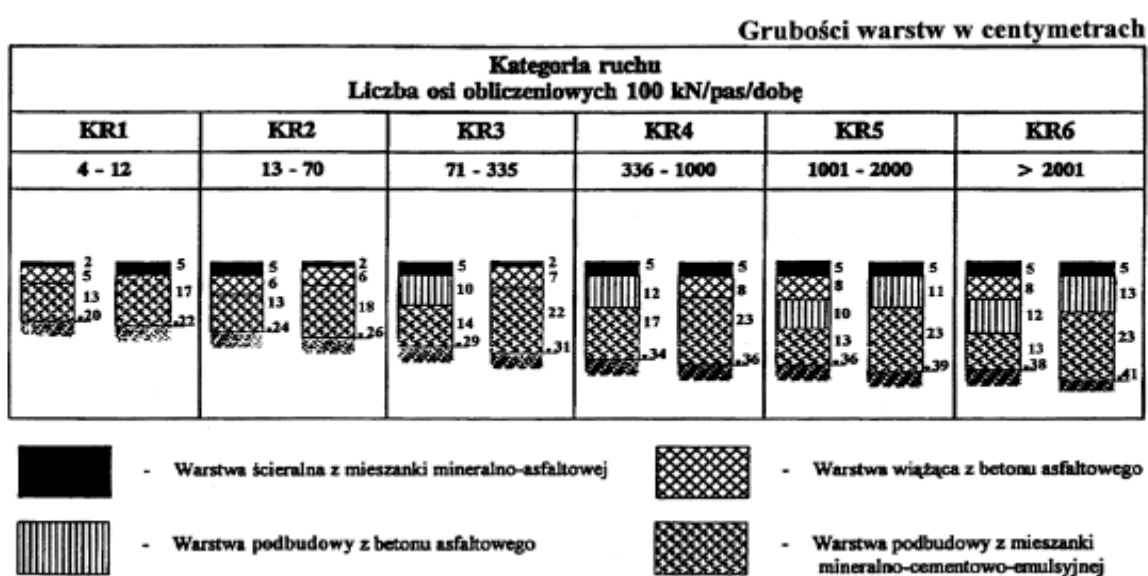
Mieszanka	Odształcenie [μm]	E_p [MPa]	E_k [MPa]	Cykle [N]
MCP	115,00	8798,20	5813,70	1.000.000,00
MCE	115,00	6526,20	3394,40	1.000.000,00
MCP	150,00	3756,30	1877,50	884.430,00
MCE	150,00	4145,10	2071,40	119.670,00
MCP	180,00	3315,70	1658,10	750.090,00
MCE	180,00	4740,80	2360,80	11.000,00

Wraz ze wzrostem zadanego odkształcenia, maleje trwałość zmęczeniowa mieszanek MCP i MCE. Należy zaznaczyć, że dla mieszanki MCP odnotowano pięciokrotnie mniejszy spadek trwałości, w porównaniu z tradycyjną mieszanką z emulsją asfaltową. Czarnym kolorem na wykresie przedstawiono zależności dla modyfikowanej mieszanki z RPP. Użytkany współczynnik determinacji R^2 dla mieszanki MCP, wynosi 0,99. Dla mieszanki MCE, oznaczonej kolorem niebieskim, obserwowany spadek trwałości zmęczeniowej postępuje szybko, po przekroczeniu poziomu odkształcenia równego $115\mu\text{m}$. Współczynnik determinacji R^2 wynosi 0,86 dla mieszanki MCE. **Mając na uwadze bezpieczną pracę konstrukcji nawierzchni drogowej, oraz wyższą trwałość zmęczeniową układu warstw, zasadna jest modyfikacja mieszanki MCE za pomocą redyspergowalnego proszku polimerowego w warstwie podbudowy drogowej.**

Badania wykazały wyższą trwałość zmęczeniową proponowanego rozwiązania. Mieszanka zawierająca w swoim składzie 2,0% modyfikatora polimerowego RPP charakteryzuje się mniejszym spadkiem modułu sztywności wraz ze wzrostem odkształcenia w stosunku do tradycyjnej mieszanki MCE. Zastosowanie rozwiązania modyfikacji składu mieszanki MCE poprzez dozowanie redyspergowalnego proszku polimerowego na zwiększenie trwałości zmęczeniowej układu warstw konstrukcji, w których zostanie wykonana podbudowa z mieszanki mineralno-cementowo-polimerowej umożliwia bezpieczną pracę konstrukcji nawierzchni. Dla niższych kategorii ruchu pakiet warstw konstrukcyjnych, z mieszankami MMA jest mniejszy, co powoduje powstawanie większego odkształcenia w warstwie podbudowy zasadniczej. Stosowanie mieszanki modyfikowanej proszkiem polimerowym pozwala na bezpieczną eksploatację konstrukcji gdzie pakiet MMA to jedynie 3 cm warstwy ścieralnej oraz 5 cm warstwy wiążącej. Tym samym zasadne wydaje się wykonania analiz i obliczeń, które będą stanowić propozycję uzupełnienia KTKN PiP kategorii ruchu KR5-KR7, dla konstrukcji typu E, przy zastosowaniu w podbudowie proponowanej mieszanki z modyfikatorem polimerowym RPP.

9. Propozycja typowych układów warstw konstrukcyjnych nawierzchni z podbudową wykonaną w technologii recyklingu głębokiego na zimno

Pierwsze próby stosowania recyklowanych na zimno mieszanek w podbudowie drogowej sięgają w Polsce lat 90-tych XX wieku [160]. W 1997 roku powstały pierwsze wytyczne do projektowania konstrukcji nawierzchni podatnych oraz instrukcje dotyczące mieszanki MCE [56]. W 1999 roku nastąpiło uzupełnienie krajowych wytycznych, które wprowadziło II wydanie Instrukcji Projektowania MCE [55]. Obydwa dokumenty pozwalają stosowanie recyklowanej na zimno mieszanki MCE, w warstwie podbudowy drogowej. Z końcem ubiegłego wieku technologia recyklingu zyskała większą popularność. W Zeszycie 61 przedstawiono propozycje typowych rozwiązań układów, do stosowania w konstrukcjach nawierzchni, w zależności od kategorii ruchu. Zalecane układy konstrukcji przedstawiono na rysunku 9.1.



Rys. 9.1. Propozycja „Zeszytu 61” typowych układów konstrukcyjnych z podbudową wykonaną z mieszanki MCE [55]

W wytycznych z 1999 roku [55] nie wyszczególniono parametrów stałych materiałowych zastosowanych do zaprojektowania typowych układów warstw. W ramach pracy doktorskiej porównano typowe konstrukcje typu A z dokumentu [56], oraz konstrukcje zaproponowane w Zeszycie IBDiM nr 61. Miało to na celu sprawdzenie, jaki moduł sztywności w obliczeniach przyjęli autorzy. Zestawienie polegało na uzyskaniu podobnej wartości odkształceń poziomych na spodzie warstw asfaltowych, oraz w podłożu gruntowym, co przekłada się na trwałość zmęczeniową nawierzchni. Uzyskano niemal identyczne wartości, gdy moduł sztywności recyklowanej mieszanki został przyjęty do obliczeń na poziomie 1500-1510 MPa. Stałe materiałowe przyjęte do obliczeń zestawiono w tablicy. 9.1.

Tab.9.1.: Stałe materiałowe przyjęte w analizie

Warstwa	Zeszyt 61-1		Zeszyt 61-2		KTKNPiP 1997 – Typ A	
	Moduł Younga E [MPa]	Wsp. Poissona ν	Moduł Younga E [MPa]	Wsp. Poissona ν	Moduł Younga E [MPa]	Wsp. Poissona ν
Baton asfaltowy do warstwy ścieralnej	10 300	0,3	10 300	0,3	10 300	0,3
Baton asfaltowy do warstwy wiążącej	-	-	10 100	0,3	10 100	0,3
Baton asfaltowy do warstwy podbudowy	9 600	0,3	-	-	9 600	0,3
Podbudowa z mieszanki MCE	?	0,3	?	0,3	-	-
Kruszywo łamane o ciągłym uziarnieniu	-	-	-	-	400	0,3
Podłoże	120	0,35	120	0,35	120	0,35

Konstrukcje z mieszanką MCE, dla kategorii ruchu KR4 zakładały zastosowanie 5 cm warstwy ścieralnej, 12 cm warstwy wiążącej z betonu asfaltowego oraz 17 cm podbudowy MCE, lub 8 cm warstwy wiążącej i 23 cm podbudowy z mieszanki MCE. Konstrukcja typu A, z podbudową z betonu asfaltowego, zakładała zastosowanie 5 cm warstwy ścieralnej, 8 cm warstwy wiążącej, 10 cm podbudowy z betonu asfaltowego, oraz 20 cm podbudowy z mieszanki niezwiązanej. Uzyskane rezultaty odkształceń oraz trwałości zmęczeniowej konstrukcji, dla kategorii ruchu KR4 zestawiono w tabelicy 9.2.

Tab.9.2.: Porównanie odkształceń oraz trwałości zmęczeniowej układu warstw konstrukcji, dla kategorii ruchu KR4

KR4				
Dokument	odkształcenie [$\mu\epsilon$]		trwałość [liczba osi obliczeniowych]	
	na spodzie warstw asfaltowych (x-x,y-y)	w podłożu (z-z)	na spodzie warstw asfaltowych	w podłożu
KTKNPiP 1997-typ A	69,7	208,4	13 098 910,00	43 012 481,00
Zeszyt 61-1	69,6	283,6	11 209 719,00	10 308 297,00
Zeszyt 61-2	70,3	284,2	28 265 311,00	10 701 396,00

Poziom odkształceń poziomych (x-x, y-y) na spodzie warstw asfaltowych, jak i pionowych (z-z) w podłożu gruntowym dla analizowanych konstrukcji (tab.9.2) jest zbliżony. Dla pierwszej z rozpatrywanych konstrukcji z podbudową MCE to około 70 $\mu\epsilon$ na spodzie warstw asfaltowych. Taki sam poziom odkształcenia powstaje w drugiej konstrukcji z MCE oraz dla konstrukcji typu A. Dla podłoża wartość ta wynosi około 210 $\mu\epsilon$ w przypadku konstrukcji typu A. Konstrukcje z mieszanką MCE charakteryzują się odkształceniem

w podłożu równym około 280 $\mu\epsilon$. Przekłada się to na trwałość zmęczeniową konstrukcji, która spełnia wymaganą liczbę osi obliczeniowych. W tej sytuacji można przyjąć, że moduł sztywności mieszanek MCE, przyjmowany przez autorów dokumentów z lat 90-tych jest równy 1500 MPa, a współczynnik Poissona $\nu = 0,3$.

Technologia recyklingu na zimno z mieszanką MCE w Zeszycie 61, była przewidywana do zastosowania w przypadku każdej kategorii ruchu. Znajdowało to zastosowanie przy remoncie oraz przebudowie zdegradowanych konstrukcji nawierzchni. Wraz z wejściem Polski do Unii Europejskiej działania na rzecz poprawy infrastruktury drogowej zostały zintensyfikowane. Maszyny do recyklingu co raz częściej pojawiały się na odcinkach remontowanych dróg. Razem z rozwojem transportu zmieniły się wymagania dla konstrukcji nawierzchni w Polsce. Drogi zaczęły być intensywniej eksploatowane przez pojazdy ciężarowe, obciążenie projektowe dla osi pojazdu wzrosło ze 100 kN do 115 kN. Konieczna była aktualizacja Katalogu, oraz zastosowania nowego podejścia w doborze konstrukcji nawierzchni drogowej. W 2014 roku został opublikowany Katalog Typowych Konstrukcji Nawierzchni Podatnych i Półsztywnych [58]. Dokument zawiera propozycje konstrukcji nawierzchni „Typu E”, które w podbudowie zasadniczej posiadają warstwę z mieszanki wykonanej w technologii recyklingu głębokiego na zimno. Konstrukcje przedstawiono na rysunku 9.3.

Kategoria ruchu	KR1	KR2	KR3	KR4	KR5	KR6	KR7
Ruch projektowy (min osi 100 kN)	0,03 - 0,09	0,09 - 0,5	0,5 - 2,5	2,5 - 7,4	7,4 - 22,0	22,0 - 52,0	> 52,0
TYP E					Nie stosuje się	Nie stosuje się	Nie stosuje się
LEGENDA: <ul style="list-style-type: none"> warstwa ścieralna z mieszanki mineralno-asfaltowej; warstwa wiążąca z betonu asfaltowego; warstwa podbudowy zasadniczej z betonu asfaltowego; warstwa podbudowy zasadniczej z mieszanki wykonanej w technologii recyklingu na zimno; wymagany wtórny moduł odkształcenia E_2 							

Rys. 9.3. Propozycja typowych układów konstrukcyjnych „Typ E” z podbudową wykonaną w technologii recyklingu głębokiego na zimno [58]

Autorzy katalogu [58], zaprojektowali recyklowane mieszanki w podbudowie dla kategorii ruchu KR1 – KR4. Do obliczeń typowych układów warstw konstrukcyjnych z podbudową z mieszanki MCE, moduł sztywności mieszanki przyjęto równy 1500 MPa, a współczynnik Poissona $\nu = 0,3$.

Przeprowadzone w ramach pracy badania nad mieszanką MCE z dodatkiem modyfikatora polimerowego RPP, pokazują że uzyskana mieszanka charakteryzuje się odpowiednimi właściwościami fizyko-mechanicznymi. Należy podkreślić, że mieszanka z modyfikatorem polimerowym charakteryzuje się wyższym modułem sztywności, co przekłada się na wyższą trwałość zmęczeniową. Przeprowadzone badania wykazały, że spadek trwałości

zmęczeniowa mieszanki MCP, jest pięciokrotnie mniejszy, od utraty trwałości zmęczeniowej mieszanki MCE. Mieszanka MCP wykonana w wytwórni stanowi pełnowartościowy materiał do zastosowania w warstwie podbudowy drogowej. Polimer RPP pozwala zredukować ilość tradycyjnych środków wiążących, przy zachowaniu odpowiedniej trwałości oraz większej odporności na pękanie mieszanki. Wyższa trwałość zmęczeniowa mieszanki MCP, to wyższa niezawodność układów konstrukcyjnych. Zasadne zatem jest wykonanie obliczeń, pozwalających na określenie typowych układów warstw konstrukcji z recyklowaną podbudową z dodatkiem modyfikatora polimerowego dla kategorii ruchu KR5-KR7. Tym samym w ramach pracy wykonano obliczenia trwałości zmęczeniowej, analizę układu odkształceń oraz naprężeń w konstrukcji nawierzchni drogowej. Uwzględniono konstrukcję z mieszanką MCP w warstwie podbudowy. Dla porównania wartości odkształceń oraz naprężeń zestawiono z wynikami stosowanego układu typu A1. Jest to konstrukcja z podbudową zasadniczą z mieszanki MMA. Przeprowadzone obliczenia miały na celu stworzenie propozycji typowych układów warstw konstrukcyjnych z podbudową z mieszanki MCP.

9.1 Kryteria zmęczeniowe

Propozycje układów warstw konstrukcyjnych z podbudową z mieszanki MCP, wykonano stosując metody mechanistyczne. Mieszanka mineralno-cementowo-polimerowa wykazała wysoką trwałość zmęczeniową, pięciokrotnie wyższą od tradycyjnej mieszanki MCE. Przeprowadzone badania laboratoryjne wskazują na słuszość stosowania mieszanki mineralno-cementowej z modyfikatorem polimerowym. Wykonanie propozycji typowych układów warstw konstrukcyjnych z mieszanką MCP, zostało przeprowadzone z uwzględnieniem dwóch kryteriów trwałości zmęczeniowej nawierzchni. Katalog Typowych Konstrukcji Nawierzchni Podatnych i Półsztywnych z 2014 roku uwzględnia w swoich założeniach kryteria trwałości zmęczeniowej dla nawierzchni asfaltowej opracowane w ramach metody AASHTO w 2004 roku. Kryteria wspomnianej metody powstały na bazie obszernych badań oraz analiz terenowych. Uwzględniono 136 odcinków doświadczalnych oraz różne warunki klimatyczne, na terytorium USA oraz Kanady. Badań kalibracyjnych na tak dużą skalę, nigdy wcześniej nie wykonano. Odzwierciedlają one również polskie warunki. Tym samym podane w metodzie AASHTO 2004 modele zmęczeniowe są oparte na rzeczywistym zachowaniu nawierzchni [161]. Należy wyjaśnić również pochodzenie nazwy wspomnianej metody. AASHTO, ponieważ została zrealizowana na zlecenie *American Association of State Highway and Transportation Officials*. W USA stosuje się nazwę "MEPDG" co oznacza *Mechanistic-Empirical Pavement Design Guide*. Kryteria AASHTO można podzielić na następujące rodzaje:

- Kryteria spękań zmęczeniowych warstw asfaltowych,
- Kryteria deformacji trwałych,
- Kryteria spękań warstw związanych spoiwami hydraulicznymi.

Pierwsze z nich to kryterium spękań warstw asfaltowych, wyznaczone wg AASHTO 2004. Spękania zmęczeniowe są uważane za jedną z najistotniejszych form uszkodzeń nawierzchni. Kryterium opisane jest za pomocą równania (9.1).

$$N = 17,3557 * (10^{-6}) * C * k'_1 * \left(\frac{1}{\varepsilon_t}\right)^{3,9492} * \left(\frac{1}{E}\right)^{1,281} \quad (9.1)$$

gdzie:

N – Liczba powtarzalnych obciążeń do wystąpienia spękań zmęczeniowych, na 50% całkowitej powierzchni pasa ruchu,

E – moduł sztywności warstwy mieszanki mineralno-asfaltowej [MPa],

ε_t – odkształcenie rozciągające w krytycznym punkcie, w przekroju pionowym nawierzchni liczba bezwymiarowa [m/m],

k'_1 – parametr określony w procesie kalibracji, zależny od grubości warstw asfaltowych,

$$k'_1 = \frac{1}{0,000398 + \frac{0,003602}{1 + e^{(11,02 - 1,374 * h_{ac})}}} \quad (9.2)$$

h_{ac} – grubość wszystkich warstw z mieszanek mineralno-asfaltowych [cm],

C – współczynnik zależny od właściwości objętościowych mieszanki mineralno-asfaltowej,

$$C = 10^M \quad (9.3)$$

$$M = 4,84 \cdot \left(\frac{V_b}{V_a + V_b} - 0,69\right) \quad (9.4)$$

V_b – efektywna, objętościowa zawartość asfaltu [v/v %],

V_a – objętościowa zawartość wolnej przestrzeni [v/v %],

Nową jakością wprowadzoną przez modele AASHTO 2004, jest uwzględnienie w praktycznych wzorach charakteru pracy warstw asfaltowych, w zależności od ich grubości. Zmienny typ pracy warstwy w zależności od jej grubości uwzględniono przez wprowadzenie parametru k'_1 .

Drugim rozpatrywanym kryterium jest deformacja strukturalna podłoża. Trwałość zmęczeniową podłoża definiuje równanie (9.5).

$$N = \frac{1}{m \sqrt{\frac{\varepsilon_p}{k}}} \quad (9.5)$$

gdzie:

N – Liczba dopuszczalnych obciążeń do wystąpienia krytycznej deformacji strukturalnej w konstrukcji nawierzchni,

k, m – współczynniki doświadczalne,

ε_p – wartość pionowego odkształcenia na powierzchni podłoża gruntowego w osi obciążenia [m/m],

9.2 Propozycje typowych konstrukcji nawierzchni podatnych z podbudową z mieszanki MCP wykonanej w technologii recyklingu głębokiego na zimno

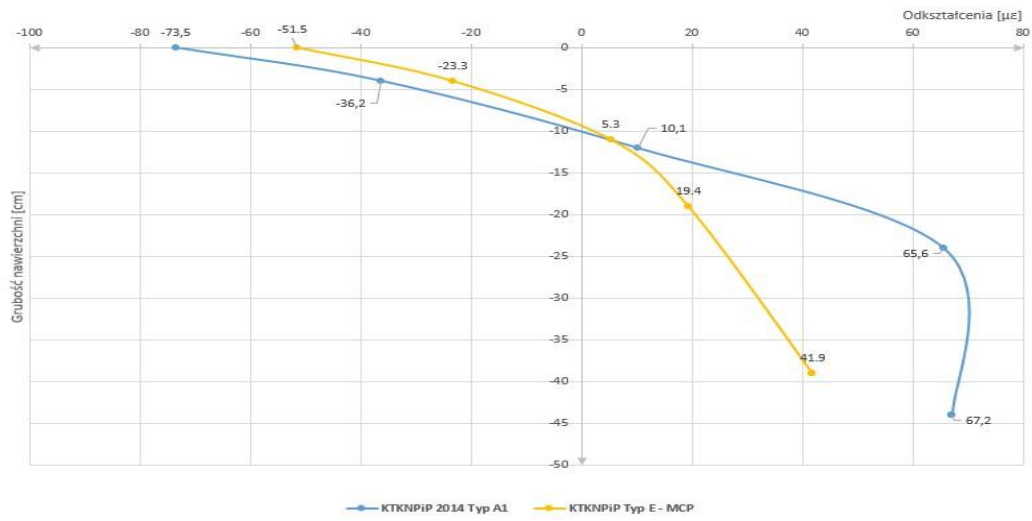
Dla porównania oraz sprawdzenia poprawności wykonanych propozycji konstrukcji nawierzchni z podbudową z mieszanki MCP, wyniki zestawiono z konstrukcją typu A1 pochodzącą z KTKN PiP 2014 [58]. Wariant ten zawiera podbudowę zasadniczą z mieszanki mineralno-asfaltowej oraz z mieszanki niezwiązanej z kruszywa C_{90/3}. W tabelicy 9.3 zestawiono modele obliczeniowe, oraz stałe materiałowe proponowanych układów z podbudową z mieszanki MCP dla kategorii ruchu KR5, KR6 i KR7.

Tab.9.3.: Model obliczeniowy proponowanej konstrukcji dla kategorii ruchu KR5 z mieszanką MCP

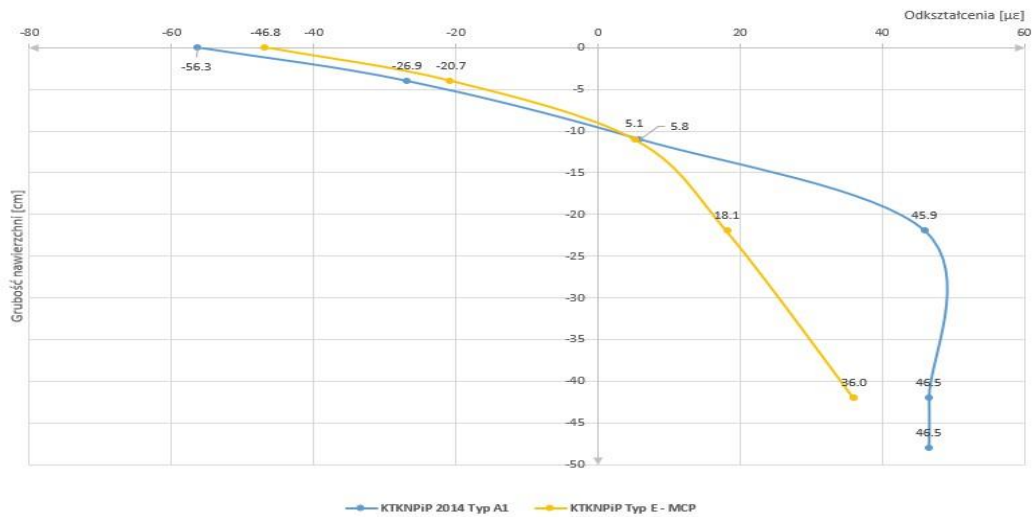
Warstwa	Moduł Younga E [MPa]	Wsp. Poissona ν	Grubość H [m]			Zawartość Asfaltu [%]
			KR 5	KR 6	KR 7	
Warstwa ścieralna z mastyksu grysowego (SMA) KR3-KR7	7 300	0,3	0,04	0,04	0,04	16
Warstwa wiążąca z betonu asfaltowego (AC) KR3-KR7	10 300	0,3	0,07	0,07	0,08	11,5
Warstwa podbudowy zasadniczej z betonu asfaltowego (AC) KR3-KR7	9 800	0,3	0,08	0,11	0,12	10,5
Warstwa podbudowy zasadniczej z mieszanki mineralno-cementowo-polimerowej	6 100	0,3	0,2	0,2	0,2	
Podłoże	120	0,35	podłoże gruntowe	podłoże gruntowe	podłoże gruntowe	

Przyjęte grubości warstw z mieszanki MMA oraz z mieszanki MCP zostały wytypowane w procesie obliczeń oraz szczegółowej analizy trwałości zmęczeniowej. Każdy z proponowanych układów składa się z warstwy ścieralnej z mieszanki SMA o grubości 4 cm. W konstrukcjach zastosowano warstwę wiążącą o grubości 7 cm dla kategorii KR5 i KR6, oraz 8 cm dla kategorii ruchu KR7. Zróżnicowana jest grubość warstwy podbudowy zasadniczej z mieszanki MMA. Od 8 cm dla kategorii ruchu KR5, 11 cm dla kategorii ruchu KR6 i 12 cm dla kategorii ruchu KR7. Każdy z proponowanych układów warstw konstrukcyjnych, zakłada zastosowanie warstwy podbudowy z mieszanki MCP o wysokiej trwałości, grubości 20 cm. Konstrukcje posadowione są na nośnym podłożu. Na rysunku 9.4 zestawiono rozkład odkształceń w omawianych konstrukcjach, natomiast na rysunku 9.5 rozkład naprężeń w konstrukcji. Wyniki uzyskane dla konstrukcji z mieszanką MCP, zestawiono z wynikami układu warstw konstrukcyjnych typu A1, który w KTKN PiP [58] występuje dla każdej kategorii ruchu, od KR1 do KR7.

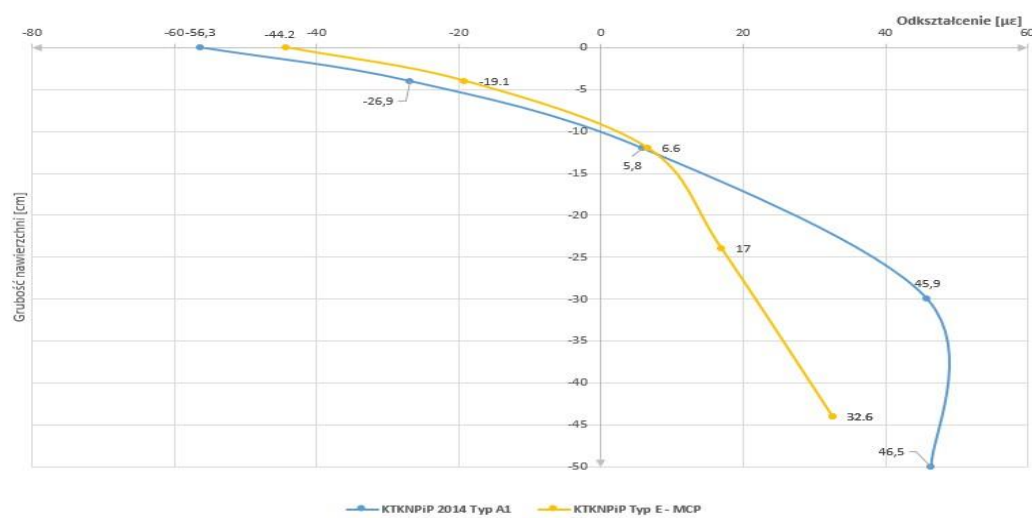
a)



b)

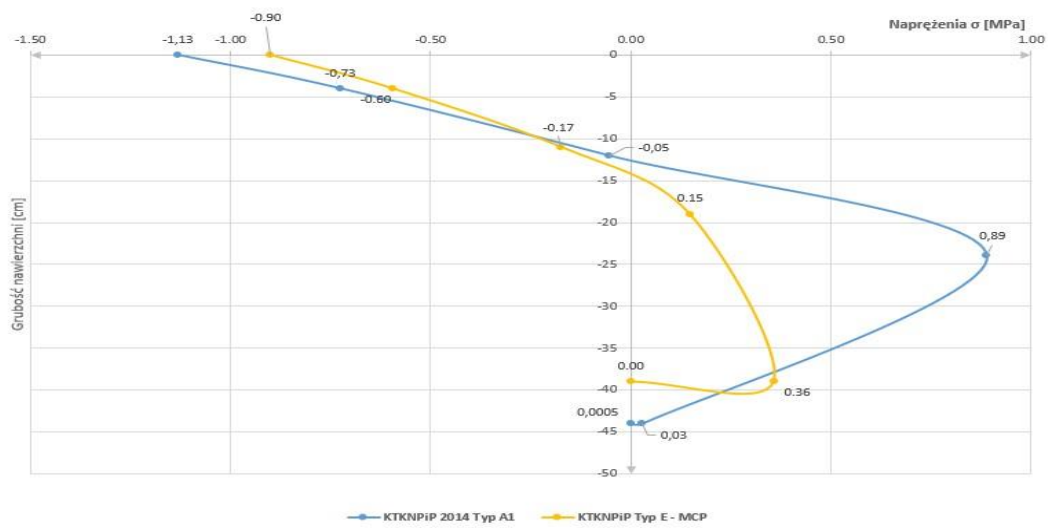


c)

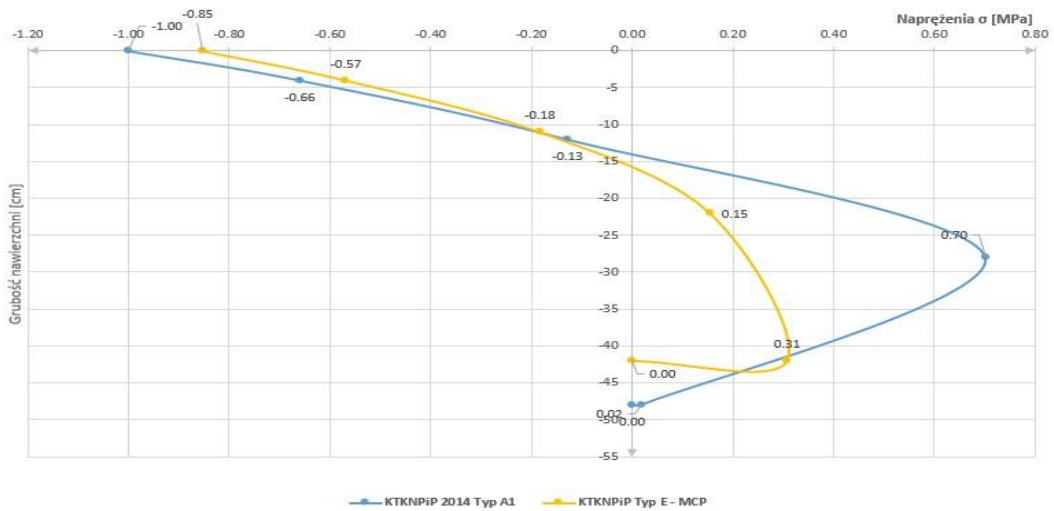


Rys.9.4.: Rozkład odształceń w konstrukcjach nawierzchni dla kategorii ruchu KR5 – KR7

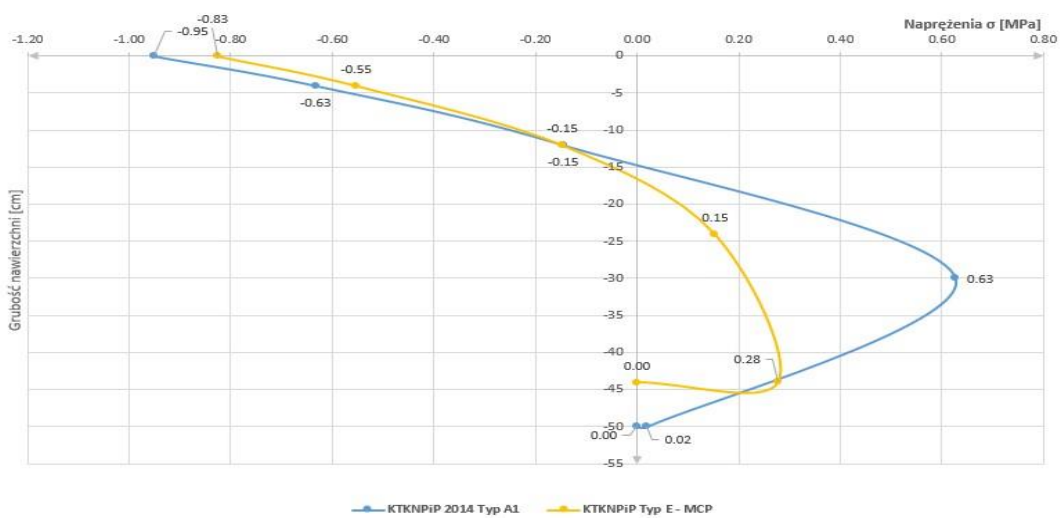
a)



b)



c)



Rys.9.5.: Rozkład naprężeń w konstrukcjach nawierzchni dla kategorii ruchu KR5 – KR7

Analiza przebiegu odkształceń poziomych (x-x, y-y) uzyskanych w rozpatrywanych konstrukcjach nawierzchni przybiera ten sam kształt i niemal te wartości dla obydwóch konstrukcji. Zarówno dla konstrukcji typu A1 (linia niebieska), jak i propozycji typu E (linia pomarańczowa) odkształcenia osiągają zbliżone wartości w warstwie ścieralnej oraz wiążącej. Zmiany rozkładu odkształceń, widoczne są poniżej warstwy wiążącej. W konstrukcjach, które posiadają w warstwie podbudowy z mieszanki MCP powstają o około 30% mniejsze odkształcenia. Wskazuje to na korzyści z zastosowania mieszanki MCP z modyfikatorem polimerowym RPP. Dla przykładu, w konstrukcji dla kategorii ruchu KR7, odkształcenie na spodzie warstwy podbudowy z mieszanki MCP wynosi 32,6 $\mu\epsilon$, natomiast w układzie typu A1 równe jest 46,5 $\mu\epsilon$. Analizując rozkład naprężeń w konstrukcjach, również zauważalna jest zależność, jak dla wartości odkształceń. Naprężenia uzyskują porównywalne wartości na poziomie warstwy ścieralnej oraz wiążącej. W warstwie podbudowy następuje znaczna redukcja naprężeń rozciągających, dla konstrukcji z podbudową z mieszanki MCP. Warto zaznaczyć, że dla konstrukcji z mieszanką MCP naprężenie rozciągające na spodzie warstw jest o 30% mniejsze, w porównaniu z konstrukcją typu A1. Mając na uwadze powyższe, w konstrukcjach z podbudową z mieszanki MCP uzyskiwane będą mniejsze odkształcenia w podłożu gruntowym. W tabelicy 9.4 zestawiono wyniki obliczeń trwałości zmęczeniowej wszystkich układów dla kategorii ruchu KR5 – KR7, oraz wartości odkształceń na spodzie warstw asfaltowych i w podłożu.

Tab.9.4.: Porównanie odkształceń oraz trwałości dla kategorii ruchu KR5-KR7

Rodzaj podbudowy	odkształcenie [$\mu\epsilon$]		trwałość [liczba osi obliczeniowych]	
	na spodzie warstw asfaltowych	w podłożu	na spodzie warstw asfaltowych	w podłożu
KR5				
KŁSM	65,5	187,6	19 456 398,00	68 923 884,00
MCP	19,4	128,5	2 278 331 591,00	376 074 813,00
KR6				
KŁSM	51,4	146,9	39 067 691,00	206 372 783,00
MCP	18,1	110,5	2 996 257 871,00	739 910 860,00
KR7				
KŁSM	45,9	131,2	54 455 200,00	342 592 462,00
MCP	17,0	100,5	3 838 084 516,00	1 132 180 828,00
KŁSM – mieszanka niezwiązana C _{90/3} o CBR \geq 80%				

Analiza wyników zestawionych w tab.9.4 wykazuje wyższe poziomy trwałości zmęczeniowej uzyskiwane przez proponowane konstrukcje z mieszanką mineralno-cementowo-polimerową. Odkształcenie powstające na spodzie warstw asfaltowych jest niemal 2,5 razy mniejsze, gdy w podbudowie występuje mieszanka MCP. Przekłada się to również na mniejsza odkształcenie generowane w podłożu gruntowym. Zaprojektowane rozwiązania konstrukcji z mieszanką modyfikowaną redyspergowalnym proszkiem polimerowym charakteryzują się wysoką trwałością zmęczeniową. Spełnione zostają wymagania dla kategorii ruchu KR5, KR6 oraz KR7. Zasadne zatem wydaje się wykonanie propozycji uzupełnienia obecnych wytycznych KTKNPIp o konstrukcje typu E dla wszystkich kategorii ruchu. Zaprojektowane konstrukcje zestawiono na rysunku 9.6.

Kategoria ruchu	KR1	KR2	KR3	KR4	KR5	KR6	KR7
Ruch projektowy (mln osi 100 kN)	0,03-0,09	0,09-0,5	0,5-2,25	2,25-7,4	7,4-22,0	22,0-52,0	>52,0
TYP E							
LEGENDA: <ul style="list-style-type: none"> warstwa ścieralna z mieszanki mineralno-asfaltowej; warstwa wiążąca z betonu asfaltowego, warstwa podbudowy zasadniczej z betonu asfaltowego; warstwa podbudowy zasadniczej wykonanej w technologii recyklingu na zimno; ∇ wymagany wtórny moduł odkształcenia E_2 							

Rys.9.6.: Propozycja uzupełniania KTKN PiP 2014, konstrukcje typu E

10. Wnioski

Na podstawie uzyskanych wyników badań mieszanki mineralno-cementowej z emulsją asfaltową i modyfikatorem polimerowym, oraz w oparciu o analizę literatury technicznej zagranicznej i krajowej sformułowano wnioski szczegółowe oraz ogólne.

Wnioski ogólne:

- Zastosowanie modyfikatora polimerowego RPP w postaci redyspergowalnego proszku polimerowego (EVA) powoduje poprawę właściwości mieszanki mineralno-cementowej z emulsją asfaltową.
- Dodatek modyfikatora RPP do recyklowanej mieszanki MCE, powoduje jej uszczelnienie. Tym samym zmniejsza się zawartość wolnych przestrzeni (V_m) w mieszance, co redukuje również nasiąkliwość (n_w) mieszanki.
- Dodatek modyfikatora polimerowego w składzie mieszanki MCE przyczynia się do redukcji modułu sztywności. Silne oddziaływanie ujawnia się w wyższych temperaturach pomiaru. Spadek modułu obserwowany jest przy dodaniu modyfikatora powyżej 2%.
- Mieszanka MCE z modyfikatorem polimerowym charakteryzuje się wysoką odpornością na pękanie przy zwiększonej odkształcalności. Stosowanie tego typu mieszanki w podbudowie, powinno gwarantować większą trwałość zmęczeniową konstrukcji nawierzchni drogowej.
- Moduł dynamiczny zależy głównie od ilości cementu w składzie mieszanki MCE. Modyfikator polimerowy RPP powoduje obniżenie modułu sztywności, przy wzroście kąta przesunięcia fazowego. Mieszanki MCE z dodatkiem proszku polimerowego charakteryzują się większą podatnością, przy zachowaniu należytej trwałości. Może przyczynić się to do wykluczenia wystąpienia spękań odbitych, oraz deformacji strukturalnych w podbudowie drogowej.
- Proces optymalizacji składu recyklowanej mieszanki oraz badania trwałości zmęczeniowej jednoznacznie wskazują, że obecność modyfikatora RPP prowadzi do zwiększenia trwałości zmęczeniowej podbudowy.
- Dodatek modyfikatora polimerowego pozwala na redukcję ilości cementu oraz ilości emulsji asfaltowej, przy uzyskaniu pożądanych parametrów mieszanki. Badania wskazują na szansę wykluczenia emulsji z recyklowanej podbudowy, na rzecz modyfikatora RPP.
- Obecność modyfikatora polimerowego RPP wpływa na wzrost kohezji składników mieszanki MCE, przy równoczesnym obniżeniu modułu sztywności oraz wzroście kąta przesunięcia fazowego.

Wnioski szczegółowe:

- Czynnikiem, który najsilniej wpływa na wytrzymałość na pośrednie rozciąganie ITS_{DRY} jest cement portlandzki. Modyfikator polimerowy RPP wpływa na obniżenie wytrzymałości na pośrednie rozciąganie ITS_{DRY} . Najwyższy wynik wytrzymałości na pośrednie rozciąganie, równy 1600 kPa, uzyskano dla mieszanki MCE o symbolu 3,5C-0,5P-2,5E. Dla mieszanki 3,5C-3,5P-2,5E, w której ilość modyfikatora polimerowego RPP jest większa o 3%, wartość wytrzymałości na pośrednie rozciąganie wynosi 1220 kPa.
- Wzrost zawartości modyfikatora polimerowego RPP o 3%, z 0,5% do 3,5%, powoduje redukcję modułu sztywności mieszanki MCE o 30%. Wartość modułu sztywności w teście pośredniego rozciągania S_m w temp. 5°C dla mieszanki 2C-0,5P-0E wynosi 18500 MPa, a dla mieszanki 2C-3,5P-0E równa jest 12680 MPa.
- Zastosowanie modyfikatora polimerowego RPP w mieszance MCE w ilości 2%, pozwala uzyskać wartość odporności na działanie wody $TSR > 80\%$.
- Zmiana ilości modyfikatora polimerowego w mieszance MCE z 0,5% do 2,0% powoduje wzrost odkształcenia przy maksymalnej sile ϵ_{max} o 15%. Wzrost ilości modyfikatora polimerowego RPP z 0,0% do 3,5% pozwala uzyskać odkształcenie wyższe o około 30%.
- Istnieje możliwość obniżenia zawartości emulsji asfaltowej oraz cementu w mieszance MCE do około 1,5%, przy zastosowaniu 2,0% modyfikatora RPP. Mieszanka 2,5C-0P-1,5E charakteryzuje się podobnym modułem sztywności do mieszanki MCE o symbolu 1,5C-2P-0,5E.
- Wzrost zawartości modyfikatora RPP do poziomu 2,0% pozwala na redukcję ilości cementu w mieszance MCE, przy zachowaniu wysokiej odporności na pękanie. Dla mieszanek MCE z redyspergowalnym proszkiem polimerowym w ilości 2%, uzyskiwane są najkorzystniejsze rezultaty odporności na pękanie K_{Ic} , powyżej $12 \text{ N/mm}^{3/2}$.
- Zarówno mieszanka z modyfikatorem polimerowym MCP, jak i tradycyjna mieszanka MCE zachowują trwałość zmęczeniową miliona cykli obciążenia, przy zadanym odkształceniu równym $115 \mu\epsilon$. Dla mieszanki MCP odnotowano średni spadek wartości modułu o 35%, natomiast dla mieszanki z emulsją asfaltową średni spadek równy 45%.
- Trwałość zmęczeniowa mieszanki z modyfikatorem polimerowym MCP, przy zadanym odkształceniu równym $180 \mu\epsilon$, wynosi ponad 700 tysięcy cykli obciążenia, do momentu spadku połowy wartości modułu sztywności, wyznaczonego po 100 cyklach obciążenia. Mieszanka MCE w przypadku odkształcenia $180 \mu\epsilon$ traci swą trwałość zmęczeniową po 11 tysiącach cykli obciążenia.
- Mieszanka MCP o symbolu 2,5C-2P-0E z modyfikatorem polimerowym w ilości 2,0% charakteryzuje się pięciokrotnie wyższą trwałością zmęczeniową, w porównaniu z tradycyjną mieszanką MCE o symbolu 2,5C-0P-2E.
- Mieszanka, która spełnia przyjęte kryteria optymalizacji, oraz charakteryzuje się wysoką wartością funkcji użyteczności to 2,5C-2P-0E. Dodatek modyfikatora polimerowego RPP powoduje poprawę pożądanych parametrów mieszanki.
- Konstrukcje nawierzchni posiadające podbudowę z mieszanki MCP, charakteryzują się wysoką trwałością zmęczeniową. Równocześnie pozwalają na redukcję grubości pakietu warstw asfaltowych, w porównaniu z tradycyjnymi konstrukcjami z podbudową z mieszanki MMA oraz mieszanki niezwiązanej z kruszywa łamanego.

Kierunki dalszych badań:

- Wykonanie odcinka doświadczalnego w technologii recyklingu głębokiego na zimno „in situ” z mieszanki mineralno-cementowo-polimerowej.
- Stworzenie bazy danych na podstawie badań uzyskanych na odcinku doświadczalnym, dla określenia zachowania się mieszanki MCP w warunkach rzeczywistych.

Streszczenie

W pracy przedstawiono ocenę wpływu dodatku modyfikatora polimerowego na właściwości fizykomechaniczne mieszanki mineralno-cementowej z emulsją asfaltową. Modyfikatory polimerowe sprawdzają się w kompozytach mineralno-cementowych czy mineralno-asfaltowych. Podjęto próbę oceny, jak zmieniają się właściwości mieszanki MCE, poprzez modyfikację redyspergowalnym proszkiem polimerowym.

Jako modyfikator wykorzystano kopolimer polietylenu i octanu winylu (EVA). Do mieszanki MCE dozowany był w postaci redyspergowalnego proszku polimerowego. Mieszanka MCE zawierała w swoim składzie również cement portlandzki oraz wolnorozpadową emulsję asfaltową. Do oceny wpływu modyfikatora polimerowego na właściwości mieszanki MCE, przyjęto plan eksperymentu Boxa-Behnkena. Cement oraz proszek polimerowy dozowane były z krokiem 1,5%, w ilości: 0,5%, 2,0% oraz 3,5%. Emulsję asfaltową dozowano z krokiem 2,5%, w ilości: 0,0%, 2,5%, oraz 5,0%.

Korzystając z uzyskanych wyników badań właściwości fizykomechanicznych, odporności na działanie czynników klimatycznych, modułu sztywności oraz odporności na pękanie, dokonano optymalizacji składu mieszanki MCE, zapewniającą odpowiednią jakość oraz spełnienie przyjętych kryteriów optymalizacji.

W procesie optymalizacji, wybrano dwie mieszanki, które wykazały najwyższe wartości funkcji użyteczności. Dla wytypowanych mieszanek wykonano badania trwałości zmęczeniowej, które wykazały lepsze rezultaty w przypadku stosowania dodatku modyfikatora polimerowego w mieszance MCE. Finalnie możliwe było przeprowadzenie obliczeń oraz analiz, które pozwoliły na opracowanie propozycji typowych układów warstw konstrukcyjnych z podbudową z mieszanki MCP.

Słowa kluczowe: cement, emulsja asfaltowa, polimer, redyspergowalny proszek polimerowy, modyfikacja, trwałość zmęczeniowa, optymalizacja, mieszanka mineralno-cementowa z emulsją asfaltową, mieszanka mineralno-cementowa z polimerem

Abstract

The paper presents an assessment of the impact of the addition of a polymer modifier on the physico-mechanical properties of a mineral-cement mixture with a bitumen emulsion. Polymer modifiers work well in mineral-cement or mineral-asphalt composites. An attempt was made to assess how the properties of the MCE mixture would change by modifying it with redispersible polymer powder.

A copolymer of polyethylene and vinyl acetate (EVA) was used as a modifier. The MCE mixture was dosed in the form of a redispersible polymer powder. The MCE mixture also contained portland cement and a slowly disintegrating bitumen emulsion. To assess the impact of the polymer modifier on the properties of the MCE mixture, the Box-Behnken experiment plan was adopted. Cement and polymer powder were dosed in 1.5% steps, in the following amounts: 0.5%, 2.0% and 3.5%. The asphalt emulsion was dosed in steps of 2.5%, in the following amounts: 0.0%, 2.5% and 5.0%.

Using the obtained results of tests of physical and mechanical properties, resistance to climatic factors, stiffness modulus and cracking resistance, the composition of the MCE mixture was optimized, ensuring appropriate quality and meeting the adopted optimization criteria.

In the optimization process, two mixtures were selected that showed the highest utility function values. Fatigue durability tests were performed for the selected mixtures, which showed better results when the addition of a polymer modifier was used in the MCE mixture. Finally, it was possible to carry out calculations and analyzes that allowed the development of proposals for typical systems of construction layers with a subbase of MCP mixture.

Keywords: cement, asphalt emulsion, polymer, redispersible polymer powder, modification, fatigue life, optimization, mineral-cement mixture with bitumen emulsion, mineral-cement mixture with polymer

Bibliografia

1. Dobiszewska, M. *Kompozyty cementowe z dodatkiem pyłu bazaltowego*; Wydawnictwa Uczelniane Uniwersytetu Technologiczno-Przyrodniczego: Bydgoszcz, 2019; ISBN 978-83-65603-62-3.
2. Lech Czarnecki *Chemia w Budownictwie*; Arkady: Warszawa, 1995;
3. Ohama, Y.; Van Gemert, D.; Ota, M. Introducing Process Technology and Applications of Polymer-Modified Mortar and Concrete in Construction. *Restor. Build. Monum.* **2013**, *19*, 369–392, doi:10.1515/rbm-2013-6624.
4. Łukowski, P. *Material modification in concrete. [in Polish].*; Ass. Of Concrete Producers: Cracow, 2016; ISBN 978-83-61331-22-3.
5. Fic, S.; Szewczak, A. Porównanie Charakterystyk Różnych Wytrzymałości Betonu Żwirowego o Zmiennym Wskaźniku w/c. *Bud. Architekt.* **2017**, *16*, 155–166, doi:10.24358/Bud-Arch_17_163_15.
6. *Kompozyty*; Boczkowska, A., Ed.; Wyd. 2 zm.; Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej: Warszawa, 2003; ISBN 978-83-7207-434-8.
7. Kulesza, M.; Dębski, D.; Fangrat, J.; Michalak, J. Effect of Redispersible Polymer Powders on Selected Mechanical Properties of Thin-Bed Cementitious Mortars. *Cem. Wapno Beton* **2020**, *25*, 168–177, doi:10.32047/CWB.2020.25.3.1.
8. Huppenthal, L. *Roztwory Polimerów*; Wyd. 1.; Wydawn. Nauk. Uniwersytetu Mikołaja Kopernika: Toruń, 2008; ISBN 978-83-231-2295-1.
9. Kulesza, M. Wpływ Redyspergowalnych Proszków Polimerowych Na Czas Wiązania Zapraw Cementowych. *Mater. Bud.* **2017**, *1*, 140–142, doi:10.15199/33.2017.11.54.
10. Kulesza, M.; Dębski, D.; Fangrat, J. Effect of Redispersible Polymer Powder on Setting Time of Thin-Bed Mortars. *MATEC Web Conf.* **2018**, *163*, 04005, doi:10.1051/matec-conf/201816304005.
11. Afridi, M.U.K.; Ohama, Y.; Demura, K.; Iqbal, M.Z. Development of Polymer Films by the Coalescence of Polymer Particles in Powdered and Aqueous Polymer-Modified Mortars. *Cem. Concr. Res.* **2003**, *33*, 1715–1721, doi:10.1016/S0008-8846(02)01094-3.
12. Łukowski, P. *Material modification in concrete. [in Polish].*; Ass. Of Concrete Producers: Cracow, 2016; ISBN 978-83-61331-22-3.
13. Beeldens, A. From Microstructure to Macrostructure: An Integrated Model of Structure Formation in Polymer-Modified Concrete. *Mater. Struct.* **2005**, *38*, 601–607, doi:10.1617/14215.
14. Silva, D.A.; Monteiro, P.J.M. ESEM Analysis of Polymeric Film in EVA-Modified Cement Paste. *Cem. Concr. Res.* **2005**, *35*, 2047–2050, doi:10.1016/j.cemconres.2004.10.037.
15. Melichar, T.; Bydžovský, J.; Keprlová, Š. Study of Parameters of New Polymer-Cement Composites after Exposure to Extreme Temperatures. *Adv. Mater. Res.* **2014**, *1000*, 81–84, doi:10.4028/www.scientific.net/AMR.1000.81.
16. Schulze, J.; Killermann, O. Long-Term Performance of Redispersible Powders in Mortars. *Cem. Concr. Res.* **2001**, *31*, 357–362, doi:10.1016/S0008-8846(00)00498-1.
17. Schulze, J.; Killermann, O. Long-Term Performance of Redispersible Powders in Mortars. *Cem. Concr. Res.* **2001**, *31*, 357–362, doi:10.1016/S0008-8846(00)00498-1.
18. Sikora, P.; Łukowski, P.; Cendrowski, K.; Horszczaruk, E.; Mijowska, E. The Effect of Nanosilica on the Mechanical Properties of Polymer-Cement Composites (PCC). *Procedia Eng.* **2015**, *108*, 139–145, doi:10.1016/j.proeng.2015.06.129.
19. Czarnecki, L. Polymer-Concrete Composites for the Repair of Concrete Structures. *MATEC Web Conf.* **2018**, *199*, 01006, doi:10.1051/matecconf/201819901006.
20. Goushis, R.; K M, M. Effectiveness of Polymeric and Cementitious Materials to Secure Cracks in Concrete under Diverse Circumstances. *Int. J. Adhes. Adhes.* **2022**, *114*, 103099, doi:10.1016/j.ijadhadh.2022.103099.
21. Ghosal, M.; Chakraborty, A.K. Application of Thermosetting v/s Thermoplastic Polymeric Composites and Polymeric Nanocomposites in Cement Concrete for Greater Sustainability. *Mater. Today Proc.* **2021**, *43*, 2311–2316, doi:10.1016/j.matpr.2021.01.070.

22. Figala, P.; Drochytka, R.; Černý, V.; Kolísko, J. Structure of Polymer-Cement Composite Optimized with Secondary Raw Materials. *Mater. Struct. Technol.* **2019**, *1*, 26–31, doi:10.31448/mstj.01.01.2018.26-31.
23. Kong, X.-M.; Wu, C.-C.; Zhang, Y.-R.; Li, J.-L. Polymer-Modified Mortar with a Gradient Polymer Distribution: Preparation, Permeability, and Mechanical Behaviour. *Constr. Build. Mater.* **2013**, *38*, 195–203, doi:10.1016/j.conbuildmat.2012.07.080.
24. Van Gemert, D.; Czarnecki, L.; Maultzsch, M.; Schorn, H.; Beeldens, A.; Łukowski, P.; Knapen, E. Cement Concrete and Concrete–Polymer Composites: Two Merging Worlds. *Cem. Concr. Compos.* **2005**, *27*, 926–933, doi:10.1016/j.cemconcomp.2005.05.004.
25. Khan, K.A.; Ahmad, I.; Alam, M. Effect of Ethylene Vinyl Acetate (EVA) on the Setting Time of Cement at Different Temperatures as Well as on the Mechanical Strength of Concrete. *Arab. J. Sci. Eng.* **2019**, *44*, 4075–4084, doi:10.1007/s13369-018-3249-4.
26. Liu, Q.; Lu, Z.; Hu, X.; Chen, B.; Li, Z.; Liang, R.; Sun, G. A Mechanical Strong Polymer-Cement Composite Fabricated by in Situ Polymerization within the Cement Matrix. *J. Build. Eng.* **2021**, *42*, 103048, doi:10.1016/j.jobbe.2021.103048.
27. Ahmad, O.A. FABRICATION OF POLYMER CONCRETE OF LIGHT WEIGHT AND HIGH PERFORMANCE. *Int. J. GEOMATE* **2021**, *20*, doi:10.21660/2020.77.44329.
28. Liu, H.; Elchalakani, M.; Karrech, A.; Yehia, S.; Yang, B. High Strength Flowable Lightweight Concrete Incorporating Low C3A Cement, Silica Fume, Stalite and Macro-Polyfelin Polymer Fibres. *Constr. Build. Mater.* **2021**, *281*, 122410, doi:10.1016/j.conbuildmat.2021.122410.
29. Heidarneshad, F.; Jafari, K.; Ozbakkaloglu, T. Effect of Polymer Content and Temperature on Mechanical Properties of Lightweight Polymer Concrete. *Constr. Build. Mater.* **2020**, *260*, 119853, doi:10.1016/j.conbuildmat.2020.119853.
30. Łukowski, P. Polymer-Cement Composites Containing Waste Perlite Powder. *Materials* **2016**, *9*, 839, doi:10.3390/ma9100839.
31. Jaworska, B.; Łukowski, P.; Jaworski, J. Influence of Cement Substitution by Calcareous Fly Ash on the Mechanical Properties of Polymer-Cement Composites. *MATEC Web Conf.* **2018**, *163*, 03005, doi:10.1051/mateconf/201816303005.
32. Varun, B.K.; Anila Kumar, C.P. Strength Characteristics of Polymer Modified High Volume Fly Ash Concrete. *Mater. Today Proc.* **2021**, *46*, 285–288, doi:10.1016/j.matpr.2020.08.038.
33. Liu, G.-J.; Bai, E.-L.; Xu, J.-Y.; Yang, N.; Wang, T. Dynamic Compressive Mechanical Properties of Carbon Fiber-Reinforced Polymer Concrete with Different Polymer-Cement Ratios at High Strain Rates. *Constr. Build. Mater.* **2020**, *261*, 119995, doi:10.1016/j.conbuildmat.2020.119995.
34. Effects of Resins on Mechanical Performance of Polymer Concrete. *J. Croat. Assoc. Civ. Eng.* **2021**, *73*, 995–1006, doi:10.14256/JCE.3187.2021.
35. Łukowski, P.; Adamczewski, G. Self-Repairing of Polymer-Cement Concrete. *Bull. Pol. Acad. Sci. Tech. Sci.* **2013**, *61*, 195–200, doi:10.2478/bpasts-2013-0018.
36. Pique, T.M.; Baueregger, S.; Plank, J. Influence of Temperature and Moisture on the Shelf-Life of Cement Admixed with Redispersible Polymer Powder. *Constr. Build. Mater.* **2016**, *115*, 336–344, doi:10.1016/j.conbuildmat.2016.04.056.
37. Ghassemi, P.; Rajabi, H.; Toufigh, V. Fatigue Performance of Polymer and Ordinary Cement Concrete under Corrosive Conditions: A Comparative Study. *Eng. Fail. Anal.* **2020**, *111*, 104493, doi:10.1016/j.engfailanal.2020.104493.
38. Ghassemi, P.; Toufigh, V. Durability of Epoxy Polymer and Ordinary Cement Concrete in Aggressive Environments. *Constr. Build. Mater.* **2020**, *234*, 117887, doi:10.1016/j.conbuildmat.2019.117887.
39. Murugappan, V.; Muthadhi, A. Studies on the Influence of Alginate as a Natural Polymer in Mechanical and Long-Lasting Properties of Concrete – A Review. *Mater. Today Proc.* **2022**, *S2214785322017746*, doi:10.1016/j.matpr.2022.03.424.
40. Błażejowski, K.; Styk, S. *Technologia warstw asfaltowych*; Wydawnictwa Komunikacji i Łączności: Warszawa, 2011; ISBN 978-83-206-1540-1.
41. ORLEN Asphalt *Poradnik Asfaltowy 2023*; 2023;

42. Gawęł, I.; Kalabińska, M.; Piłat, J.; Wydawnictwa Komunikacji i Łączności *Asfalty drogowe*; Wydawnictwa Komunikacji i Łączności: Warszawa, 2014; ISBN 978-83-206-1945-4.
43. Wybrane Zagadnienia Lepkosprężystości Drogowych Asfaltów Modyfikowanych, Zawierających Elastomer SBS 2013.
44. Mieczkowski, P.; Budziński, B.; Słowik, M.; Kempa, J.; Sorociak, W. Experimental Study of Tensile Properties of Styrene–Butadiene–Styrene Modified Asphalt Binders. *Materials* **2021**, *14*, 1734, doi:10.3390/ma14071734.
45. Zhu, J.; Birgisson, B.; Kringos, N. Polymer Modification of Bitumen: Advances and Challenges. *Eur. Polym. J.* **2014**, *54*, 18–38, doi:10.1016/j.eurpolymj.2014.02.005.
46. Radziszewski, P.; Sarnowski, M.; Pokorski, P.; Kowalski, K.J.; Król, J. High Temperature Properties of Modified Bituminous Binders Produced in Poland. *MATEC Web Conf.* **2019**, *262*, 05011, doi:10.1051/mateconf/201926205011.
47. Iwański, M.; Mazurek, G. Optimization of the Synthetic Wax Content on Example of Bitumen 35/50. *Procedia Eng.* **2013**, *57*, 414–423, doi:10.1016/j.proeng.2013.04.054.
48. Costa, L.; Fernandes, S.; Silva, H.; Oliveira, J. Study of the Interaction between Asphalt and Recycled Plastics in New Polymer Modified Binders (PMB). *Ciênc. Tecnol. Mater.* **2017**, *29*, e192–e197, doi:10.1016/j.ctmat.2016.04.005.
49. Jan B. Król; Piotr Radziszewski; Karol J. Kowalski; Michał Sarnowski; Paweł Czajkowski Laboratory and Field Investigations of Polymer and Crumb Rubber Modified Bitumen. *J. Civ. Eng. Archit.* **2014**, *8*, doi:10.17265/1934-7359/2014.10.014.
50. Mazurek, G. The Viscoelastic Characteristics of the Asphalt Concrete Modified with Different Synthetic Waxes Using a Modified Huet- Sayegh Model.; VGTU Technika, August 10 2017.
51. Šrámek, J.; Kozel, M.; Remek, L.; Mikolaj, J. Evaluation of Bitumen Modification Using a Fast-Reacting SBS Polymer at a Low Modifier Percentage. *Materials* **2023**, *16*, 2942, doi:10.3390/ma16082942.
52. Mazurek, G.; Buczyński, P.; Iwański, M.; Podsiadło, M.; Pypeć, P.; Kowalczyk, A. Effects of the Mixing Process on the Rheological Properties of Waste PET-Modified Bitumen. *Materials* **2023**, *16*, 7271, doi:10.3390/ma16237271.
53. Saeed, S.M.; Sutanto, M.H.; Napiah, M.; Usman, A.; Batari, A.; Aman, M.Y.; Aliyu Yaro, N.S. Optimization of Rubber Seed Oil Content as Bio-Oil Rejuvenator and Total Water Content for Cold Recycled Asphalt Mixtures Using Response Surface Methodology. *Case Stud. Constr. Mater.* **2021**, *15*, e00561, doi:10.1016/j.cscm.2021.e00561.
54. Dołżycki, B.; Jaskuła, P. Review and Evaluation of Cold Recycling with Bitumen Emulsion and Cement for Rehabilitation of Old Pavements. *J. Traffic Transp. Eng. Engl. Ed.* **2019**, *6*, 311–323, doi:10.1016/j.jtte.2019.02.002.
55. Zawadzki, J.; Matras, J.; Mechowski, T.; Sybilski, D. Warunki Techniczne Wykonywania Warstw Podbudowy z Mieszanki Mineralno Cementowo-Emulsyjnej (MCE). Wydanie II Uzupełnione. Informacje, Instrukcje. Zeszyt 61 1999.
56. Katalog Typowych Konstrukcji Nawierzchni Podatnych i Półsztywnych. Wydanie Drugie Poprawione 1997.
57. Szydłowski, C. Ocena Odporności Na Pęknięcie Podbudów Drogowych z Mieszanek Mineralno-Cementowo-Emulsyjnych (MCE). *Mater. Bud.* **2017**, *1*, 83–87, doi:10.15199/33.2017.10.28.
58. Judycki, J. Katalog Typowych Konstrukcji Nawierzchni Podatnych i Półsztywnych 2014.
59. Day, D.; Lancaster, I.M.; McKay, D. Emulsion Cold Mix Asphalt in the UK: A Decade of Site and Laboratory Experience. *J. Traffic Transp. Eng. Engl. Ed.* **2019**, *6*, 359–365, doi:10.1016/j.jtte.2019.05.002.
60. Bocci, E.; Graziani, A.; Bocci, M. Cold In-Place Recycling for a Base Layer of an Italian High-Traffic Highway. In *Proceedings of the 5th International Symposium on Asphalt Pavements & Environment (APE)*; Pasetto, M., Partl, M.N., Tebaldi, G., Eds.; Lecture Notes in Civil Engineering; Springer International Publishing: Cham, 2020; Vol. 48, pp. 313–322 ISBN 978-3-030-29778-7.

61. Tabaković, A.; McNally, C.; Fallon, E. Specification Development for Cold In-Situ Recycling of Asphalt. *Constr. Build. Mater.* **2016**, *102*, 318–328, doi:10.1016/j.conbuildmat.2015.10.154.
62. Hashemian, L.; Kavussi, A.; Aboalmaali, H.H. Application of Foam Bitumen in Cold Recycling and Hydrated Lime in Airport Pavement Strengthening. *Case Stud. Constr. Mater.* **2014**, *1*, 164–171, doi:10.1016/j.cscm.2014.08.002.
63. Chen, T.; Luan, Y.; Ma, T.; Zhu, J.; Huang, X.; Ma, S. Mechanical and Microstructural Characteristics of Different Interfaces in Cold Recycled Mixture Containing Cement and Asphalt Emulsion. *J. Clean. Prod.* **2020**, *258*, 120674, doi:10.1016/j.jclepro.2020.120674.
64. Bessa, I.S.; Almeida, L.R.; Vasconcelos, K.L.; Bernucci, L.L.B. Design of Cold Recycled Mixes with Asphalt Emulsion and Portland Cement. *Can. J. Civ. Eng.* **2016**, *43*, 773–782, doi:10.1139/cjce-2016-0111.
65. Valentin, J.; Čížková, Z.; Suda, J.; Batista, F.; Mollenhauer, K.; Simnofske, D. Stiffness Characterization of Cold Recycled Mixtures. *Transp. Res. Procedia* **2016**, *14*, 758–767, doi:10.1016/j.trpro.2016.05.065.
66. Ferjani, A.; Carter, A.; Vaillancourt, M.; Dardeau, A.; Gandi, A. Effect of Cement Content on Cracking Resistance of Full-Depth Reclamation Materials Using the Semicircular Bending Test. *Adv. Civ. Eng. Mater.* **2019**, *8*, 20190062, doi:10.1520/ACEM20190062.
67. Gao, L.; Ni, F.; Braham, A.; Luo, H. Mixed-Mode Cracking Behavior of Cold Recycled Mixes with Emulsion Using Arcan Configuration. *Constr. Build. Mater.* **2014**, *55*, 415–422, doi:10.1016/j.conbuildmat.2013.12.079.
68. Skotnicki, Ł.; Kuźniewski, J.; Szydło, A. Research on the Properties of Mineral–Cement Emulsion Mixtures Using Recycled Road Pavement Materials. *Materials* **2021**, *14*, 563, doi:10.3390/ma14030563.
69. Konieczna, K.; Pokorski, P.; Sorociak, W.; Radziszewski, P.; Żymelka, D.; Król, J. Study of the Stiffness of the Bitumen Emulsion Based Cold Recycling Mixes for Road Base Courses. *Materials* **2020**, *13*, 5473, doi:10.3390/ma13235473.
70. Dołżycki, B.; Jaczewski, M.; Szydłowski, C. The Impact of Long-Time Chemical Bonds in Mineral-Cement-Emulsion Mixtures on Stiffness Modulus. *Balt. J. Road Bridge Eng.* **2018**, *13*, 121–126, doi:10.7250/bjrbe.2018-13.406.
71. DOŁŻYCKI, B.; JACZEWSKI, M.; SZYDŁOWSKI, C. Analysis of Selected Mechanical Properties of Mineral-Cement-Emulsion Mixtures (MCE). *Roads Bridg. - Drogi Mosty* **2023**, *22*, 41–61, doi:10.7409/rabdim.023.003.
72. Dolzycki, B.; Jaczewski, M.; Szydłowski, C. The Long-Term Properties of Mineral-Cement-Emulsion Mixtures. *Constr. Build. Mater.* **2017**, *156*, 799–808, doi:10.1016/j.conbuildmat.2017.09.032.
73. Al-Mohammedawi, A.; Mollenhauer, K. A Study on the Influence of the Chemical Nature of Fillers on Rheological and Fatigue Behavior of Bitumen Emulsion Mastic. *Materials* **2020**, *13*, 4627, doi:10.3390/ma13204627.
74. Cheng, H.; Sun, L.; Liu, L.; Li, H. Fatigue Characteristics of In-Service Cold Recycling Mixture with Asphalt Emulsion and HMA Mixture. *Constr. Build. Mater.* **2018**, *192*, 704–714, doi:10.1016/j.conbuildmat.2018.10.171.
75. Dolzycki, B.; Szydłowski, C.; Jaczewski, M. The Influence of Combination of Binding Agents on Fatigue Properties of Deep Cold In-Place Recycled Mixtures in Indirect Tensile Fatigue Test (ITFT). *Constr. Build. Mater.* **2020**, *239*, 117825, doi:10.1016/j.conbuildmat.2019.117825.
76. Iwański, M.; Buczyński, P. Properties of the Recycled Base Course with Respect to the Road Binder Type. In Proceedings of the The 9th International Conference “Environmental Engineering 2014”; Vilnius Gediminas Technical University Press “Technika” 2014: Vilnius, Lithuania, 2014.
77. Mazurek, G.; Iwański, M.; Buczyński, P.; Horodecka, R. Influence of Innovative Three-Element Binder on Permanent Deformations in Recycled Mixtures with Emulsion and Foamed Bitumen. *Arch. Civ. Mech. Eng.* **2021**, *21*, 55, doi:10.1007/s43452-021-00192-9.

78. Kukielka, J.; Bańkowski, W. The Experimental Study of Mineral-Cement-Emulsion Mixtures with Rubber Powder Addition. *Constr. Build. Mater.* **2019**, *226*, 759–766, doi:10.1016/j.conbuildmat.2019.07.276.
79. Kukielka, J.; Bańkowski, W.; Mirski, K. Asphalt-Cement Concretes with Reclaimed Asphalt Pavement and Rubber Powder from Recycled Tire. *Materials* **2021**, *14*, 2412, doi:10.3390/ma14092412.
80. Pettinari, M.; Simone, A. Effect of Crumb Rubber Gradation on a Rubberized Cold Recycled Mixture for Road Pavements. *Mater. Des.* **2015**, *85*, 598–606, doi:10.1016/j.matdes.2015.06.139.
81. Pettinari, M.; Dondi, G.; Sangiorgi, C.; Hededal, O. The Effect of Cryogenic Crumb Rubber in Cold Recycled Mixes for Road Pavements. *Constr. Build. Mater.* **2014**, *63*, 249–256, doi:10.1016/j.conbuildmat.2014.04.060.
82. Dondi, G.; Tataranni, P.; Pettinari, M.; Sangiorgi, C.; Simone, A.; Vignali, V. Crumb Rubber in Cold Recycled Bituminous Mixes: Comparison between Traditional Crumb Rubber and Cryogenic Crumb Rubber. *Constr. Build. Mater.* **2014**, *68*, 370–375, doi:10.1016/j.conbuildmat.2014.06.093.
83. Liu, T.; Shi, J.; Busel, A.; Zhang, Q.; Busel, D.; Veranko, U.; Zankavich, V.; Shang, B.; Li, Z.; Wang, J.; et al. Optimization of the Epoxy Resin Water Dispersion for Modification of the RAP Cold Recycled Mixes. *IOP Conf. Ser. Earth Environ. Sci.* **2019**, *330*, 042029, doi:10.1088/1755-1315/330/4/042029.
84. Kukielka, J.; Sadowski, T. The Experimental Assessment of the Deformability of Cement and Cement-Asphalt Matrices with Rubber Powder Additive by Application of DIC System. *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.* **2018**, *416*, 012049, doi:10.1088/1757-899X/416/1/012049.
85. Kukielka, J. Mechanical Properties of Cement and Cement-Asphalt Matrices with Rubber Powder. *Bud. Archit.* **2017**, *16*, 053–063, doi:10.24358/Bud-Arch_17_163_06.
86. Buczyński, P.; Iwański, M.; Mazurek, G.; Krasowski, J.; Krasowski, M. Effects of Portland Cement and Polymer Powder on the Properties of Cement-Bound Road Base Mixtures. *Materials* **2020**, *13*, 4253, doi:10.3390/ma13194253.
87. Buczyński, P.; Iwański, M. The Influence of a Polymer Powder on the Properties of a Cold-Recycled Mixture with Foamed Bitumen. *Materials* **2019**, *12*, 4244, doi:10.3390/ma12244244.
88. Bohatkiewicz, J.; Dębiński, M.; Marciniuk, M.; Cybulska, A. The Use of Renewable Energy Sources in a Road Lane on the Example of the Network of National Roads and Highways in Poland. *Energies* **2021**, *14*, 4660, doi:10.3390/en14154660.
89. Zaumanis, M.; Haritonovs, V.; Brenčis, G.; Smirnovs, J. Assessing the Potential and Possibilities for the Use of Warm Mix Asphalt in Latvia. *Constr. Sci.* **2012**, *13*, doi:10.2478/v10311-012-0008-8.
90. Kukielka, L. *Podstawy badań inżynierskich*; Wydaw. Naukowe PWN: Warszawa, 2002; ISBN 83-01-13749-5.
91. Piasta, Z.; Lenarcik, A. Applications of Statistical Multi-Criteria Optimisation in Design of Concretes. Optimization Methods for Material Design of Cement-Based Composites 1998.
92. Gadomska-Gajadhur, A.; Jańczewski, D.; Różycki, C.; Synoradzki, L.; Politechnika Warszawska; Oficyna Wydawnicza *Projektowanie procesów technologicznych: matematyczne metody planowania eksperymentów*; Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej: Warszawa, 2020; ISBN 978-83-8156-121-1.
93. Bogdan Dołycki Instrukcja Projektowania i Wbudowania Mieszanek Mineralno-Cementowo-Emulsyjnych (MCE) 2019.
94. Box-Behnken Design.
95. PN-EN 12697-8:2005 Mieszanki Mineralno-Asfaltowe -- Metody Badań Mieszanek Mineralno-Asfaltowych Na Gorąco -- Część 8: Oznaczanie Zawartości Wolnej Przestrzeni.
96. PN-S-04001/12 Drogi Samochodowe i Lotniskowe. Mieszanki Mineralno-Bitumiczne. Badania. Oznaczenie Nasiąkliwości.
97. PN-EN 12697-23 Mieszanki Mineralno-Asfaltowe -- Metody Badań -- Część 23: Oznaczanie Wytrzymałości Mieszanki Mineralno-Asfaltowej Na Rozciąganie Pośrednie.
98. Wirtgen *Cold Recycling Technology*; 2012;

99. PN-EN 12697-12 Mieszanki Mineralno-Asfaltowe -- Metody Badań -- Część 12: Określanie Wrażliwości Na Wodę Próbek Mineralno-Asfaltowych.
100. WT-2 Nawierzchnie Asfaltowe Na Drogach Krajowych. Mieszanki Mineralno-Asfaltowe 2014.
101. EN 12697-26 Bituminous Mixtures. Test Methods. Stiffness 2018.
102. PN-EN 12697-31 :2007 Mieszanki Mineralno-Asfaltowe -- Metody Badań Mieszanek Mineralno-Asfaltowych Na Gorąco -- Część 31: Próbkki Przygotowane w Prasie Żyratorowej.
103. PN-EN 12697-24 Mieszanki Mineralno-Asfaltowe -- Metody Badań Mieszanek Mineralno-Asfaltowych Na Gorąco -- Część 24: Odporność Na Zmęczenie.
104. 933-1 Tests for Geometrical Properties of Aggregates. Determination of Particle Size Distribution. Sieving Method.
105. EN 1097-6 Tests for Mechanical and Physical Properties of Aggregates. Determination of Particle Density and Water Absorption.
106. EN 933-4 Tests for Geometrical Properties of Aggregates. Determination of Particle Shape. Shape Index.
107. EN 933-3 Tests for Geometrical Properties of Aggregates. Determination of Particle Shape. Flakiness Index.
108. EN 933-5 Tests for Geometrical Properties of Aggregates. Determination of Percentage of Crushed and Broken Surfaces in Coarse Aggregate Particles.
109. EN 1367-1 Tests for Thermal and Weathering Properties of Aggregates. Determination of Resistance to Freezing and Thawing.
110. EN 1097-2 Tests for Mechanical and Physical Properties of Aggregates. Methods for the Determination of Resistance to Fragmentation.
111. EN 1097-1 Tests for Mechanical and Physical Properties of Aggregates. Determination of the Resistance to Wear (Micro-Deval).
112. EN 197-1 Cement. Composition, Specifications and Conformity Criteria for Common Cements 2012.
113. Lafarge Karta Produktu CEM I 42,5R.
114. EN 196-3 Methods of Testing Cement. Determination of Setting Times and Soundness.
115. 196-1 Methods of Testing Cement. Determination of Strength.
116. EN 196-6 Methods of Testing Cement. Determination of Fineness.
117. EN 13808 Bitumen and Bituminous Binders - Framework for Specifying Cationic Bituminous Emulsions.
118. Deklaracja Właściwości Użytkowych.
119. Piłat, J.; Radziszewski, P. *Nawierzchnie asfaltowe: podręcznik akademicki*; Wydawnictwa Komunikacji i Łączności: Warszawa, 2010; ISBN 978-83-206-1759-7.
120. AkzoNobel E ELOTEX Global Product Selection Guide 2014.
121. Cordin Arpagaus; Nina Schafroth; Marco Meur Laboratory Scale Spray-Drying of Lactose: A Review. **2010**.
122. Ohama, Y. *Handbook of Polymer-Modified Concrete and Mortars: Properties and Process Technology*; Noyes Publications: Park Ridge, N.J, 1995; ISBN 978-0-8155-1358-2.
123. EN 13286-2 Unbound and Hydraulically Bound Mixtures. Test Methods for Laboratory Reference Density and Water Content. Proctor Compaction. 2010.
124. EN 12697-30 Bituminous Mixtures. Test Methods. Specimen Preparation by Impact Compactor 2018.
125. EN 12697-44 Bituminous Mixtures -- Test Methods -- Part 44: Crack Propagation by Semi-Circular Bending Test.
126. Buczyński, P.; Iwański, M. Complex Modulus Change within the Linear Viscoelastic Region of the Mineral-Cement Mixture with Foamed Bitumen. *Constr. Build. Mater.* **2018**, *172*, 52–62, doi:10.1016/j.conbuildmat.2018.03.214.
127. Graziani, A.; Mignini, C.; Bocci, E.; Bocci, M. Complex Modulus Testing and Rheological Modeling of Cold-Recycled Mixtures. *J. Test. Eval.* **2020**, *48*, 20180905, doi:10.1520/JTE20180905.

128. Dołżycki, B.; Jaskuła, P. Review and Evaluation of Cold Recycling with Bitumen Emulsion and Cement for Rehabilitation of Old Pavements. *J. Traffic Transp. Eng. Engl. Ed.* **2019**, *6*, 311–323, doi:10.1016/j.jtte.2019.02.002.
129. Stefańczyk, B.; Mieczkowski, P. *Mieszanki mineralno-asfaltowe: wykonawstwo i badania*; Wydawnictwa Komunikacji i Łączności: Warszawa, 2009; ISBN 978-83-206-1676-7.
130. PN-EN 12697-8:2005 Mieszanki Mineralno-Asfaltowe -- Metody Badań Mieszanek Mineralno-Asfaltowych Na Gorąco -- Część 6: Oznaczanie Gęstości Objętościowej Próbek Mieszanki Mineralno-Asfaltowej.
131. PN-EN 12697-5:2010 Mieszanki Mineralno-Asfaltowe -- Metody Badań Mieszanek Mineralno-Asfaltowych Na Gorąco -- Część 5: Oznaczanie Gęstości.
132. PN-EN 12697-30 Mieszanki Mineralno-Asfaltowe -- Metody Badań Mieszanek Mineralno-Asfaltowych Na Gorąco -- Część 30: Przygotowanie Próbek Zagęszczonych Przez Ubijanie.
133. Graziani, A.; Iafelice, C.; Raschia, S.; Perraton, D.; Carter, A. A Procedure for Characterizing the Curing Process of Cold Recycled Bitumen Emulsion Mixtures. *Constr. Build. Mater.* **2018**, *173*, 754–762, doi:10.1016/j.conbuildmat.2018.04.091.
134. Ferrotti, G.; Grilli, A.; Mignini, C.; Graziani, A. Comparing the Field and Laboratory Curing Behaviour of Cold Recycled Asphalt Mixtures for Binder Courses. *Materials* **2020**, *13*, 4697, doi:10.3390/ma13214697.
135. Dołżycki, B.; Jaczewski, M.; Szydłowski, C. The Influence of Cement Type on Early Properties of Cold In-Place Recycled Mixtures. In *Proceedings of the RILEM International Symposium on Bituminous Materials*; Di Benedetto, H., Baaj, H., Chailleux, E., Tebaldi, G., Sauzéat, C., Mangiafico, S., Eds.; RILEM Bookseries; Springer International Publishing: Cham, 2022; Vol. 27, pp. 1815–1821 ISBN 978-3-030-46454-7.
136. Miljković, M.; Dołżycki, B.; Jaczewski, M.; Szydłowski, C. Comparative Study of the Mechanical Behaviour of Bitumen- and Cement-Dominated Mixtures with Reclaimed Asphalt. In *Proceedings of the RILEM International Symposium on Bituminous Materials*; Di Benedetto, H., Baaj, H., Chailleux, E., Tebaldi, G., Sauzéat, C., Mangiafico, S., Eds.; RILEM Bookseries; Springer International Publishing: Cham, 2022; Vol. 27, pp. 413–419 ISBN 978-3-030-46454-7.
137. Raschia, S.; Chauhan, T.; Panwar, S.; Carter, A.; Graziani, A.; Perraton, D. Effect of Water and Cement Content on the Mechanical Properties of Cold Recycled Mixtures (CRM) with Bitumen Emulsion. In *Proceedings of the 5th International Symposium on Asphalt Pavements & Environment (APE)*; Pasetto, M., Partl, M.N., Tebaldi, G., Eds.; Lecture Notes in Civil Engineering; Springer International Publishing: Cham, 2020; Vol. 48, pp. 274–282 ISBN 978-3-030-29778-7.
138. Mazurek, G.; Buczyński, P.; Iwański, M.; Podsiadło, M. Thermal Analysis-Based Field Validation of the Deformation of a Recycled Base Course Made with Innovative Road Binder. *Materials* **2021**, *14*, 5925, doi:10.3390/ma14205925.
139. Dołżycki, B.; Jaczewski, M.; Szydłowski, C. The Impact of Long-Time Chemical Bonds in Mineral-Cement-Emulsion Mixtures on Stiffness Modulus. *Balt. J. Road Bridge Eng.* **2018**, *13*, 121–126, doi:10.7250/bjrbe.2018-13.406.
140. Wirtgen Group *Podręcznik Recyklingu Na Zimno*; Wirtgen GmbH, 2006;
141. Wirtgen *Cold Recycling Technology*; 2012;
142. PN-EN 12697-44 Mieszanki Mineralno-Asfaltowe -- Metody Badań -- Część 44: Propagacja Pęknięcia w Badaniu Zginania Próbki Półwalcowej 2019.
143. Khalid, H.A.; Monney, O.K. Moisture Damage Potential of Cold Asphalt. *Int. J. Pavement Eng.* **2009**, *10*, 311–318, doi:10.1080/10298430802169838.
144. Xia, Y.; Lin, J.; Chen, Z.; Cai, J.; Hong, J.; Zhu, X. Fatigue Cracking Evolution and Model of Cold Recycled Asphalt Mixtures during Different Curing Times. *Materials* **2022**, *15*, 4476, doi:10.3390/ma15134476.
145. Bohdan, D.; Jaczewski, M.; Szydłowski, C. Cold Recycled Mixtures for Binder Courses - Laboratory Evaluation of Mechanical Properties.; May 11 2022; pp. 355–361.
146. Błażejowski, K.; Tabor, Z.; Wójcik-Wiśniewska, M.; Zduńczyk, B.; Baranowska, W. Warstwy Przeciwspekaniowe z Asfaltem Wysokomodyfikowanym ORBITON HIMA. *Konf. „Nowoczesna Diagn. Naprawy Nawierzchni Drog.* **2018**, *Instytut Badawczy Dróg i Mostów.*

147. Godenzoni, C.; Graziani, A.; Perraton, D. Complex Modulus Characterisation of Cold-Recycled Mixtures with Foamed Bitumen and Different Contents of Reclaimed Asphalt. *Road Mater. Pavement Des.* **2017**, *18*, 130–150, doi:10.1080/14680629.2016.1142467.
148. Barco Carrión, A.J. del; Lo Presti, D.; Pouget, S.; Airey, G.; Chailleux, E. Linear Viscoelastic Properties of High Reclaimed Asphalt Content Mixes with Biobinders. *Road Mater. Pavement Des.* **2017**, *18*, 241–251, doi:10.1080/14680629.2017.1304253.
149. Król, J.B.; Kowalski, K.J.; Radziszewski, P.; Sarnowski, M. Rheological Behaviour of N-Alkane Modified Bitumen in Aspect of Warm Mix Asphalt Technology. *Constr. Build. Mater.* **2015**, *93*, 703–710, doi:10.1016/j.conbuildmat.2015.06.033.
150. Rowe, G.; Sharrock, M. Alternate Shift Factor Relationship for Describing Temperature Dependency of Viscoelastic Behavior of Asphalt Materials. *Transp. Res. Rec. J. Transp. Res. Board* **2011**, *2207*, 125–135, doi:10.3141/2207-16.
151. PN-EN 12697-26 Mieszanki Mineralno-Asfaltowe -- Metody Badań Mieszanek Mineralno-Asfaltowych Na Gorąco -- Część 26: Sztywność.
152. Gandi, A.; Carter, A.; Singh, D. Rheological Behavior of Cold Recycled Asphalt Materials with Different Contents of Recycled Asphalt Pavements. *Innov. Infrastruct. Solut.* **2017**, *2*, 45, doi:10.1007/s41062-017-0094-3.
153. Witczak, M.; Root, R. Summary of Complex Modulus Laboratory Test Procedures and Results. In *Fatigue and Dynamic Testing of Bituminous Mixtures*; Puzinauskas, V., Ed.; ASTM International: 100 Barr Harbor Drive, PO Box C700, West Conshohocken, PA 19428-2959, 1974; pp. 67-67–28 ISBN 978-0-8031-0342-9.
154. Rowe, G.M.; Baumgardner, G.L.; Rossiter, W.; Wallace, T.; Dean, S.W. Evaluation of the Rheological Properties and Master Curve Development for Bituminous Binders Used in Roofing. *J. ASTM Int.* **2007**, *4*, 101016, doi:10.1520/JAI101016.
155. Witczak, M.; Root, R. Summary of Complex Modulus Laboratory Test Procedures and Results. In *Fatigue and Dynamic Testing of Bituminous Mixtures*; Puzinauskas, V., Ed.; ASTM International: 100 Barr Harbor Drive, PO Box C700, West Conshohocken, PA 19428-2959, 1974; pp. 67-67–28 ISBN 978-0-8031-0342-9.
156. Mazurek, G.; Iwański, M. Modelling of Asphalt Concrete Stiffness in the Linear Viscoelastic Region. *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.* **2017**, *245*, 032029, doi:10.1088/1757-899X/245/3/032029.
157. Yusoff, N.I.Md.; Airey, G.D.; Hainin, M.R. Predictability of Complex Modulus Using Rheological Models. *Asian J. Sci. Res.* **2010**, *3*, 18–30, doi:10.3923/ajsr.2010.18.30.
158. Lazić, Ž.R. *Design of Experiments in Chemical Engineering: A Practical Guide*; Wiley-VCH: Weinheim ; [Germany], 2004; ISBN 3-527-31142-4.
159. Montgomery, D.C. *Design and Analysis of Experiments*; Eighth edition.; John Wiley & Sons, Inc: Hoboken, NJ, 2013; ISBN 978-1-118-14692-7.
160. Dołżycki, B. Polish Experience with Cold In-Place Recycling. *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.* **2017**, *236*, 012089, doi:10.1088/1757-899X/236/1/012089.
161. Judycki, J.; Jaskuła, P.; Pszczoła, M.; Ryś, D.; Jaczewski, M.; Alenowicz, J.; Dołżycki, B.; Stienss, M.; Wydawnictwa Komunikacji i Łączności *Analizy i projektowanie konstrukcji nawierzchni podatnych i półsztywnych*; Wydawnictwa Komunikacji i Łączności: Warszawa, 2014; ISBN 978-83-206-1928-7.