

Warszawa, dnia 22 września 2024 r.

dr hab. inż. Michał Sarnowski, prof. uczelni
Instytut Dróg i Mostów
Wydział Inżynierii Lądowej
Politechnika Warszawska
Aleja Armii Ludowej 16, 00-637 Warszawa
tel. +48 22 234-56-71
e-mail: michal.sarnowski@pw.edu.pl

RECENZJA

rozprawy doktorskiej **mgr inż. Jakuba Krasowskiego**
pt. „**Wpływ dodatku modyfikatora polimerowego na właściwości fizykomechaniczne
recyklowanej mieszanki na zimno z emulsją asfaltową**”

Promotorem rozprawy doktorskiej jest dr hab. inż. Przemysław Buczyński, prof. PŚk.

1. Podstawa opracowania recenzji

Podstawą formalną do wykonania recenzji rozprawy doktorskiej jest pismo Pana Dyrektora Naukowego Dyscypliny Inżynieria Lądowa, Geodezja i Transport Politechniki Świętokrzyskiej prof. dr hab. inż. Jerzego Wawrzeńczyka z dnia 08.07.2024 r., realizującego Uchwałę Nr 14/2024 Rady Naukowej Dyscypliny Inżynieria Lądowa, Geodezja i Transport PŚk z dnia 05.06.2024 r. dotyczącą powołania recenzentów rozprawy doktorskiej Pana mgr inż. Jakuba Krasowskiego.

Podstawę prawną do wykonania recenzji stanowią obowiązujące przepisy Ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz. U. z 2023 r. poz. 742).

2. Podstawowe dane o kandydacie

Pan mgr inż. Jakub Krasowski uzyskał tytuł magistra w lipcu 2019 r. w Politechnice Świętokrzyskiej. Kandydat nie ubiegał się uprzednio o nadanie stopnia doktora.

Jest Doktorantem w Katedrze Inżynierii Komunikacyjnej na Wydziale Budownictwa i Architektury Politechniki Świętokrzyskiej. Do Jego osiągnięć związanych z pracą naukowo-badawczą należy zaliczyć współautorstwo pięciu publikacji naukowych, jednego patentu i jednego zgłoszenia patentowego.

W grudniu 2020 r. zajął pierwsze miejsce, w trzeciej edycji konkursu na najlepszą pracę dyplomową – obszar Budownictwo Drogowe i Mostowe, organizowanym przez Politechnikę Świętokrzyską oraz Kielecki Park Technologiczny. W listopadzie 2021 r. Pan mgr inż. Jakub Krasowski został nagrodzony w konkursie „Innowacje w drogownictwie” organizowanym przez Generalną Dyрекcję Dróg Krajowych i Autostrad za najlepszą pracę dyplomową magisterską, której wyniki mogą być zastosowane w drogownictwie. Jest również laureatem

wpłynęło dnia:

Data 2024 -09- 30

Podpis 

XII edycji ogólnopolskiego konkursu Student-Wynalazca i wyróżnionym w XIII edycji tego konkursu. W 2022 r. otrzymał srebrny medal na wystawie „Geneva Inventions 2022”.

3. Przedmiot recenzji

Zgodnie z art. 187 ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce, przedmiotem recenzji jest sprawdzenie czy praca stanowi oryginalne rozwiązanie problemu naukowego, czy prezentuje ogólną wiedzę teoretyczną kandydata w danej dyscyplinie naukowej oraz jego umiejętność samodzielnego prowadzenia pracy naukowej. Recenzowana rozprawa doktorska dotyczy problemu naukowego z zakresu budownictwa drogowego, mieści się więc w dziedzinie nauk inżynieryjno-technicznych, w dyscyplinie inżynieria lądowa, geodezja i transport.

4. Ocena aktualności wybranej tematyki, celu, tezy i zakresu pracy

Recenzowana rozprawa podejmuje problem analizy i oceny właściwości mieszanki mineralno-cementowo-emulsyjnej (MCE) z modyfikatorem polimerowym w postaci redyspergowalnego proszku polimerowego (RPP).

Jak Doktorant słusznie zauważył, w wyniku światowej destabilizacji geopolitycznej ostatnich lat, priorytetem stało się poszukiwanie rozwiązań energooszczędnych, minimalizujących czas przedsięwzięcia oraz prostych w wykonaniu. Choć dążenie to dotyczy każdej z branż, szczególnie jest ono widoczne w branży budowlanej, w tym infrastrukturalnej - o znaczeniu strategicznym. Budownictwo drogowe przeżywające od kilkunastu lat okres intensywnego rozwoju, znajduje się obecnie w dobie ograniczeń, przy stale wzrastającym obciążeniu ruchem. Dotyczy to zarówno ograniczeń kadrowych, jak również wydobycia i dostaw surowców oraz gotowych materiałów, a także ograniczeń związanych z ekologią. Należy zgodzić się z Doktorantem, który stwierdza, że technologią drogową, która wychodzi naprzeciw wspomnianym wyżej oczekiwaniom, oraz jest w stanie sprostać wielu ograniczeniom jest recykling głęboki materiałów na zimno. Technologia ta pozwala na wykonanie podbudowy drogowej przy zastosowaniu materiałów z rozbiórki zniszczonej nawierzchni drogi, spełniając tym samym światowy trend redukcji pozyskiwania nowych materiałów, minimalizacji kosztów oraz emisji CO₂ do atmosfery. Recykling głęboki materiałów na zimno może być realizowany w postaci podbudowy z mieszanki mineralno-cementowo-emulsyjnej (MCE) oraz mineralno-cementowej z asfaltem spienionym (MCAS). Chociaż technologie MCE i MCAS wpisują się w zasady zrównoważonego rozwoju, to jednak i one podlegają ograniczeniom związanym z dysproporcją w rozmieszczeniu krajowych zakładów produkcyjnych, oraz w dostępie do materiałów wykorzystywanych w tych mieszankach. Dotyczy to kluczowych składników, tj. cementu, lepiszcza asfaltowego i kruszyw łamanych. Kolejnym problemem związanym bezpośrednio z obciążoną ciężkim ruchem podbudową wykonaną w technologii MCE jest prawdopodobieństwo wystąpienia spękań zmęczeniowych w warstwie podbudowy, spowodowanych jej wysoką sztywnością lub małą kohezją poszczególnych składników. Może to skutkować propagacją tych spękań do warstw nawierzchni położonych wyżej, aż do warstwy ścieralnej. Zasadnym wydaje się więc poszukiwanie takich rozwiązań, które z jednej strony poprawią właściwości fizykomechaniczne wykonanej podbudowy, tak by posiadała ona odpowiednią odkształcalność przy zachowaniu trwałości eksploatacyjnej, a z drugiej strony spowodują zmniejszenie stosowania nowych materiałów, szczególnie cementu i emulsji asfaltowej. Na podstawie wcześniejszych doświadczeń własnych Doktorant uznał, że takie możliwości stwarza połączenie technologii recyklingu głębokiego na zimno z emulsją

asfaltową, oraz modyfikacji składu mieszanki dostępnym na rynku modyfikatorem polimerowym w postaci redyspergowalnego proszku polimerowego (RPP). Na podkreślenie zasługuje fakt, że w wyniku przeprowadzonego obszernego przeglądu literatury Doktorant stwierdził, że żadna z dostępnych publikacji nie podejmuje tematyki mieszanki mineralno-cementowo-emulsyjnej z modyfikatorem polimerowym. Korzystny wpływ tego rodzaju modyfikacji jest natomiast znany w przypadku zaczynów, zapraw i betonów cementowych oraz lepiszczy asfaltowych. Sprawdzenie wpływu modyfikacji polimerem mieszanki MCE na jej właściwości fizyko mechaniczne należy więc uznać za właściwy kierunek rozwoju tej technologii. Mając to na uwadze, należy stwierdzić, że podjęty w rozprawie problem naukowy, stanowiący kontynuację krajowych badań i analiz nad recyklingiem głębokim na zimno z emulsją asfaltową, został prawidłowo zdefiniowany, jest aktualny i wpisuje się w nowoczesne, światowe podejście do projektowania i budowy dróg z uwzględnieniem zasad zrównoważonego rozwoju.

Rozważania podjęte w rozprawie doktorskiej były analizowane w kontekście jednego głównego, jasno sformułowanego celu badawczego, tj. oceny wpływu ilości modyfikatora polimerowego, w postaci redyspergowalnego proszku polimerowego (RPP), na właściwości fizyko mechaniczne mieszanki mineralno-cementowej z emulsją asfaltową (MCE).

Ponadto Doktorant sformułował pięć następujących celów szczegółowych:

- 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.

Cele szczegółowe sformułowano w sposób zrozumiały. Jedynie w przypadku IV celu można zadać pytanie, czy szczegółowe badania oraz analiza wyników badań powinny być celem samym w sobie, czy celem powinien być efekt tych badań? Ponadto cel ten powinien być uzupełniony o informację czego dotyczyć mają badania trwałości zmęczeniowej? Zdaniem recenzenta cel nr IV mógłby brzmieć następująco: „Ocena trwałości zmęczeniowej recyklowanej mieszanki na zimno po procesie optymalizacji.” Cele zrealizowano poprzez wybór odpowiedniego planu eksperymentu, analizę krajowej i zagranicznej literatury technicznej oraz analizę wyników badań laboratoryjnych przeprowadzonych w Politechnice Świętokrzyskiej. Optymalizacja składu mieszanek MCE w oparciu o wybrane ich właściwości pozwoliła na opracowanie propozycji nowych konstrukcji nawierzchni do Katalogu Typowych Konstrukcji Nawierzchni Podatnych i Półsztywnych (KTKNPiP).

Dysertacja zawiera zarówno rozważania teoretyczne, oparte na studiach literaturowych, jak i badania empiryczne w zakresie analizowanego problemu naukowego. Zakres badań oraz zastosowana nowoczesna aparatura badawcza są adekwatne do założonego celu. Wyniki badań zostały poddane analizie statystycznej w celu wykazania istotności ocenianych parametrów.

Doktorant sformułował trzy tezy badawcze:

- 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.**

Tezy sformułowane są w sposób jasny i zrozumiały. Zdaniem recenzenta I teza mogłaby być doprecyzowana w zakresie efektu jaki zostanie uzyskany po ograniczeniu składników, przy zastosowaniu proszku polimerowego. Możliwość ograniczenia ilości jakichkolwiek składników w danym kompozycie istnieje zawsze. Ważną kwestią jest natomiast jak to ograniczenie wpłynie na właściwości tego kompozytu. Doktorant prawidłowo uzupełnił tezę w treści pracy i podsumował w przedostatnim wniosku ogólnym stwierdzając, że „Dodatek modyfikatora polimerowego pozwala na redukcję ilości cementu oraz ilości emulsji asfaltowej, **przy uzyskaniu pożądaných parametrów mieszanki.**” W tezie nr II korzystnym byłoby rozwinięcie określenia „recyklowanej mieszanki” przez dodanie wyrażenia „na zimno” – analogicznie jak w pozostałych tezach. Mając na uwadze, że w pracy analizowano wpływ konkretnego modyfikatora polimerowego, tj. redyspergowalnego proszku polimerowego w postaci kopolimeru polietylenu i octanu winylu (EVA), zdaniem recenzenta korzystnym byłoby w poszczególnych tezach odwoływać się do tego właśnie modyfikatora. Pomimo powyższych uwag należy stwierdzić, że tezy są merytorycznie prawidłowe.

Przyjęty i zrealizowany w recenzowanej rozprawie doktorskiej obszar tematyczny badań i analiz, ma wysoką wartość poznawczą i pozwolił na prawidłową ocenę analizowanego problemu naukowego.

W kontekście przedstawionej w pracy unikalnej koncepcji modyfikacji mieszanki MCE proszkiem polimerowym RPP, z jednoczesnym ograniczeniem tradycyjnych materiałów wiążących, a także stanu wiedzy w zakresie efektów stosowania modyfikatorów polimerowych do asfaltów drogowych, mieszanek mineralno-asfaltowych oraz zapraw i betonów cementowych, wybrany przez Autora temat, sformułowane cele i tezy oraz przyjęty zakres pracy należy uznać za poprawne i uzasadnione. Na podkreślenie zasługuje kompleksowe podejście Doktoranta do realizowanego zagadnienia w zakresie badań laboratoryjnych i analiz wyników tych badań.

Należy stwierdzić, że założone cele, postawione tezy i podjęta tematyka badawcza są aktualne i interesujące pod względem naukowym, zatem wybór tematu oraz jego przedstawienie w rozprawie doktorskiej uznaję za merytorycznie uzasadnione.

Tytuł rozprawy należy uznać za właściwy. Alternatywnie można byłoby rozważyć użycie w tytule bezpośrednio nazwy dodatku, do którego odnoszą się tezy pracy. Tytuł mógłby w tym przypadku brzmieć: „Wpływ dodatku modyfikatora polimerowego EVA na właściwości fizyko mechaniczne recyklowanej mieszanki na zimno z emulsją asfaltową”.

5. Ocena rozprawy

5.1. Ogólna charakterystyka rozprawy

Opiniowana praca jest w formie książkowej i zawiera 133 strony. Zasadnicza część rozprawy składa się z 10 rozdziałów poprzedzonych spisem treści, oraz wykazem oznaczeń i skrótów użytych w pracy, co wspomaga przejrzystość analiz.

Po ostatnim rozdziale zawierającym wnioski i kierunki dalszych badań znajdują się streszczenia w języku polskim i angielskim oraz bibliografia. Z bibliografii nie wydzielono oddzielnego spisu dokumentów technicznych oraz norm, co znacznie poprawiłoby jej czytelność oraz ułatwiłoby ocenę źródeł literaturowych. Praca nie zawiera też spisu rysunków i tablic. Zdaniem recenzenta rozprawa doktorska powinna zawierać takie spisy. W poszczególnych rozdziałach zamieszczono 68 rysunków (liczonych zgodnie z ich numeracją) oraz 38 tablic. W bibliografii znalazło się 161 pozycji, na które składa się 121 publikacji naukowych, 13 dokumentów technicznych i 27 norm. Właściwy dobór bibliografii stanowi potwierdzenie wysokiej wartości merytorycznej części literaturowej rozprawy. Zdecydowana większość publikacji została opublikowana po roku 2010, co potwierdza aktualność cytowanych źródeł. Współautorem jednej pracy naukowej znajdującej się w wykazie jest Doktorant. Można byłoby oczekiwać nieco większej liczby publikacji autorstwa lub współautorstwa Doktoranta, potwierdzającej niewątpliwie duży Jego wkład w analizowany w niniejszej rozprawie problem naukowy. Wykaz literatury nie został uporządkowany alfabetycznie, według pierwszego autora, co niekorzystnie wpływa na jego czytelność. Ponadto w bibliografii nie wszystkie pozycje literaturowe prezentowane są w takiej samej formie. Przykładowo, pozycje [2] i [49] różnią się sposobem prezentacji autorów w porównaniu do pozostałych pozycji.

Streszczenie w języku polskim jest napisane w czytelny sposób i w zakresie merytorycznym odzwierciedla charakter rozprawy naukowej. Streszczenie w języku angielskim jest również przygotowane poprawnie.

We wstępie (rozdział 1) Autor krótko opisał problem naukowy i przedstawił tematykę pracy doktorskiej. Ogólnie zarysował wyzwania i ograniczenia rozwojowe w branży budowlanej związane z obecną sytuacją geopolityczną, a także zagadnienie dysproporcji pomiędzy poszczególnymi województwami w dostępie do surowców i zakładów produkujących materiały budowlane. Należy zgodzić się z Doktorantem, który stwierdza, że w budownictwie priorytetem stało się poszukiwanie rozwiązań energooszczędnych, minimalizujących czas przedsięwzięcia oraz prostych w wykonaniu, minimalizujących potrzebę zakupów nowych materiałów na rzecz recyklingu materiałów z rozbiórki, a w drogownictwie oczekiwania te spełnia technologia recyklingu głębokiego materiałów na zimno. Z kolei, przy stale wzrastającym natężeniu ruchu samochodowego, kluczowym parametrem uwzględnianym w doborze konstrukcji nawierzchni, jest trwałość zmęczeniowa układu warstw, w tym dolnych, rozciąganych warstw konstrukcji. W przypadku podbudów wykonywanych w technologii MCE zbyt wysoka sztywność lub mała kohezja składników może spowodować wystąpienie spękań tej warstwy. Recenzent zgadza się ze stwierdzeniem, że dzięki zastosowaniu modyfikacji składu materiałów możliwa jest poprawa ich właściwości oraz optymalizacja składu. Takie możliwości stwarza modyfikator polimerowy, który wykazał swoją skuteczność w przypadku betonów cementowych, czy mieszanek mineralno-asfaltowych. Z tego względu zasadnym wydaje się połączenie technologii recyklingu głębokiego na zimno z emulsją asfaltową, oraz modyfikacja składu mieszanki MCE dostępnym na rynku modyfikatorem polimerowym.

Należy stwierdzić, że Autor właściwie uzasadnia we wstępie potrzebę podjęcia problemu naukowego i zarysowuje spodziewany efekt zastosowania modyfikatora polimerowego w technologii MCE.

W rozdziale 2 został określony cel główny, cele szczegółowe, zakres oraz tezy rozprawy doktorskiej. Jak wspomniano wcześniej, cele pracy należy uznać za właściwe. Rozdział zamyka krótki opis zakresu pracy zrealizowanej w poszczególnych 10 rozdziałach, który w prawidłowy sposób charakteryzuje przeprowadzone w rozprawie badania i analizy. Należy stwierdzić, że rozdział 2 stanowi prawidłowe wprowadzenie do zagadnień analizowanych w dalszej części rozprawy.

W rozdziale 3 (Przegląd literatury w zakresie rozwoju technologii modyfikacji kompozytów budowlanych) Doktorant przeanalizował literaturę techniczną w kontekście trzech zagadnień dotyczących modyfikacji polimerowej, tj.:

- modyfikacji kompozytów mineralno-cementowych,
- modyfikacji kompozytów mineralno-asfaltowych,
- próby modyfikacji mieszanek mineralno-cementowych z emulsją asfaltową.

Główne wnioski z tej analizy można podsumować w następujący sposób:

- modyfikator polimerowy w postaci kopolimeru octan winylu-etylen (EVA) reguluje czas wiązania zapraw cementowych oraz poprawia odporność materiału na rozciąganie i zginanie,
- kompozyt polimero-betonowy charakteryzuje się wyższą trwałością zmęczeniową, po kondycjonowaniu w różnym środowisku, w stosunku do tradycyjnych betonów cementowych,
- modyfikacja asfaltów drogowych polimerami (również kopolimerem EVA) poprawia ich właściwości lepkosprężyste, co przekłada się na poprawę właściwości mieszanek mineralno-asfaltowych z tymi lepiszczami, w tym odporności na zmęczenie i deformacje trwałe,
- spoiwo najistotniej wpływa na charakter pracy podbudowy drogowej, wykonanej w technologii recyklingu głębokiego na zimno,
- następuje poprawa właściwości fizycznych oraz mechanicznych mieszanki poddanej recyklingowi na zimno z asfaltem spienionym (MCAS) po modyfikacji z użyciem RPP, niezależnie od rodzaju zastosowanego proszku,
- w literaturze brak jest przykładów mieszanek mineralno-cementowych z emulsją asfaltową, modyfikowanych przy pomocy redyspergowalnych proszków polimerowych (RPP).

Ponadto, ważnym i słusznym wnioskiem sformułowanym na podstawie danych literaturowych oraz doświadczeń własnych Doktoranta jest stwierdzenie mówiące o tym, że z uwagi na występowanie naprężeń rozciągających w warstwie podbudowy, niezbędne jest ograniczenie sztywności mieszanki MCE, na rzecz większej jej elastyczności, co daje możliwość wystąpienia większego odkształcenia do momentu pęknięcia. Problemem jest zjawisko przeszywnienia podbudów z MCE, co skutkuje pojawieniem się spękań odbitych.

W części przeglądu literatury dotyczącej modyfikacji kompozytów mineralno-asfaltowych dość ogólnie omówiono wpływ kopolimeru etylenu i octanu winylu EVA na właściwości lepiszczy asfaltowych. Bardziej szczegółowo opisano natomiast elastomer SBS,

wraz z graficznym przedstawieniem formy budowy tego kopolimeru (rys. 3.4). Zdaniem recenzenta przegląd literatury powinien stanowić uzasadnienie nie tylko wyboru modyfikatora polimerowego, ale w szczególności wyboru kopolimeru EVA. Należy jednak stwierdzić, że wnioski z przeprowadzonego w pracy przeglądu literatury w sposób właściwy uzasadniają potrzebę rozpoznania mieszanek MCE z modyfikatorem polimerowym oraz optymalizacji jej składu. W podsumowaniu tego rozdziału została omówiona klasyfikacja mieszanek z uwagi na temperaturę produkcji (rys. 3.7) oraz opisano recykler do recyklingu głębokiego na zimno z wbudowanym zbiornikiem na modyfikator (rys. 3.8). Nasuwa się wątpliwość czy te informacje nie powinny znaleźć się wcześniej niż w podsumowaniu rozdziału, w którym nie omawiano tych zagadnień.

W rozdziale 4 (Plan eksperymentu oraz plan badań) Doktorant przeprowadził planowanie eksperymentu, w tym zdefiniował wielkości wejściowe, których kombinacja zawartości umożliwiła na późniejszym etapie optymalizację składu mieszanki MCE z modyfikatorem polimerowym RPP. Wykorzystanie do planowania eksperymentu planu frakcyjnego trójwartościowego Boxa-Behnkena należy uznać za właściwe, ze względu na możliwość redukcji zmiennych w stosunku do pełnego planu czynnikowego jakim jest plan typu 3^3 , otrzymując jednocześnie dużą koncentrację punktów w obszarze optymalnym. Prawdłowo przyjęto również wielkości wejściowe, tj. zawartość cementu portlandzkiego (CEM), emulsji asfaltowej (EMU) i modyfikatora polimerowego (RPP), a także zakres dozowania cementu i emulsji asfaltowej. Wyjaśnienia wymagają kryteria jakie zastosowano do wyboru zawartości proszku polimerowego od 0,5% do 3,5% (m/m). Pewną wątpliwość budzi również określanie kombinacji bez emulsji asfaltowej mianem „mieszanki MCE z brakiem emulsji asfaltowej”. Zdaniem recenzenta, tego rodzaju kompozyt nie jest już mieszanką cementowo-emulsyjną i powinien być nazywany inaczej, np. „mieszanką porównawczą bez emulsji asfaltowej”.

Zarówno przyjęty plan badań, jak i metody badawcze należy uznać za prawidłowe i odpowiednio uzasadnione. Pozwalają one na właściwą ocenę wpływu modyfikatora polimerowego na właściwości fizykomechaniczne recyklowanej mieszanki MCE z modyfikatorem polimerowym RPP oraz na przyjęcie optymalnego składu tej mieszanki.

W rozdziale 5 (Projekt składu mieszanki MCE) Doktorant przeprowadził szczegółową analizę wszystkich składników mineralnych oraz stosowanego spoiwa, lepiszcza i modyfikatora polimerowego, a następnie przedstawił procedurę projektowania składu mieszanki MCE z modyfikatorem RPP. Na podkreślenie zasługuje fakt, że Autor korzystając ze swoich doświadczeń zawodowych, w taki sposób dobrał proporcje mieszanki mineralnej, aby odwzorować warunki panujące w momencie przebudowy zdegradowanego odcinka drogi. Założone proporcje 50% destruktu asfaltowego (RAP) i 50% kruszywa doziarniającego należy uznać za właściwe. Zarówno materiały, jak i skład mieszanki MCE spełniają wymagania sformułowane w „Instrukcji projektowania i wbudowania mieszanek mineralno-cementowo-emulsyjnych (MCE)”.

W rozdziale 6 (Wyniki badań) Doktorant przeprowadził badania, a następnie opracował i przeanalizował wyniki badań zgodnie z planem badań przedstawionym w rozdziale 4. Ten kluczowy rozdział pracy można podzielić na 5 podstawowych części. **W części pierwszej** dotyczącej oceny wyników badań właściwości fizycznych wykazano, że wzrost zawartości modyfikatora RPP w składzie mieszanki MCE powoduje spadek wolnej przestrzeni i uszczelnienie mieszanki MCE, co prowadzi do korzystnej redukcji jej nasiąkliwości.

Część druga rozdziału dotyczy oceny wyników badań właściwości mechanicznych mieszank MCE. Na podstawie analizy wyników badań stwierdzono, że kopolimer RPP powoduje spadek wytrzymałości na pośrednie rozciąganie ITS mieszanki MCE, przy zawartości modyfikatora polimerowego w mieszance powyżej 2,0% (m/m). Za bardzo ważny wniosek należy uznać stwierdzenie, że istnieje również możliwość redukcji zawartości tradycyjnych spoiw w mieszance MCE, na rzecz modyfikatora polimerowego. Jak stwierdził Doktorant już na tym etapie badań pojawiła się szansa na zastąpienie emulsji asfaltowej mniejszą ilością modyfikatora RPP. Zjawisko to zostało potwierdzone w kolejnych etapach badań, również z wykorzystaniem analizy istotności wpływu poszczególnych czynników na ocenianą cechę. Wykazano, że wpływ modyfikatora polimerowego prowadzi do obniżenia modułu sztywności, co jest wynikiem korzystnym z punktu widzenia odporności na zmęczenie podbudowy MCE, a także daje możliwość zminimalizowania zawartości emulsji asfaltowej. **W trzeciej części** rozdziału 6 analizowano odporność mieszank MCE z modyfikatorem polimerowym na działanie czynników klimatycznych. Wykazano, że najkorzystniejszym wariantem modyfikacji jest dozowanie do mieszanki MCE do 2,0% modyfikatora RPP, co pozwala na uzyskanie wysokiej odporności na działanie wody TSR. Wzrost zawartości modyfikatora ponad 2,0% nieznacznie wpływa na wskaźnik ITSR odporności na działanie wody i mrozu, co Doktorant tłumaczy wymywaniem przez wodę cząstek polimeru z próbek MCE. Zdaniem recenzenta wyjaśnienie tego zjawiska jest logiczne i prawdopodobne, jednak wymagałoby pogłębionych badań. **Czwarta część** rozdziału dotyczy oceny wpływu modyfikatora polimerowego na odporność na pękanie mieszanki MCE, określonej metodą SCB. W części tej Doktorant sformułował jeden z najważniejszych wniosków rozprawy, w którym stwierdza, że wzrost ilości modyfikatora RPP powoduje większe odkształcenie podbudowy MCE. Dla pomiaru w temperaturze 0°C, zmiana zawartości modyfikatora z 0,5% do 2,0% prowadzi do wzrostu odkształcenia o 15%. Wzrost ilości modyfikatora RPP od 0,0% do 3,5% pozwala uzyskać odkształcenie wyższe o około 30%. Jest to bardzo korzystna cecha podbudów drogowych, zwłaszcza w przypadku niskich temperatur. Uzasadnione jest więc ograniczenie cementu na rzecz polimeru, co pozwoli zminimalizować ryzyko wystąpienia spękań odbitych w konstrukcji nawierzchni drogowej. Powyższe ważne wnioski zostały potwierdzone w obliczeniach odporności na pękanie K_{Ic} oraz wskaźnika pęknięć P. Wzrost zawartości modyfikatora RPP do poziomu 2,0% pozwala na redukcję ilości cementu w mieszance MCE, przy zachowaniu wysokiej odporności na pękanie, a powyżej 3,5% następuje zauważalny wzrost wskaźnika P. Interakcja cementu portlandzkiego oraz proszku polimerowego powoduje usieciowanie mieszanki MCE, co prowadzi do wzrostu kohezji składników, a tym samym większej odporności na pękanie. **W części piątej** badano właściwości reologiczne mieszank MCE z modyfikatorem polimerowym przez ocenę modułu dynamicznego (E^*) oraz kąta przesunięcia fazowego (ϕ), oznaczonych w teście DTC-CY. Wykazano, że składnikami mieszanki MCE, które istotnie wpływają na moduł dynamiczny E^* w temp. 13°C jest cement oraz modyfikator polimerowy. Stosowanie modyfikatora RPP w składzie mieszanki MCE w ilości 3,5% powoduje obniżenie modułu dynamicznego i zwiększenie kąta przesunięcia fazowego w porównaniu do mieszank MCE bez dodatku modyfikatora. W tej części pracy Doktorant stwierdza, że modyfikator polimerowy RPP, może stanowić regulator części lepkiej mieszank MCE. W ocenie recenzenta, przedstawione wyniki badań stanowią potwierdzenie tego wniosku. W podsumowaniu rozdziału 6 za najważniejszy wniosek należy uznać stwierdzenie: „uzyskane wyniki badań właściwości fizykomechanicznych mieszanki MCE z redyspergowalnym proszkiem polimerowym, potwierdzają pozytywne oddziaływanie RPP.” Dzieje się tak pomimo wykazania, że cement istotnie wpływa na właściwości mieszanki MCE.

Stosowanie modyfikatora w postaci redyspergowalnego proszku polimerowego w większym stopniu wpływa na właściwości lepkosprężyste mieszanki MCE niż emulsja asfaltowa. Ponadto, obecność modyfikatora polimerowego 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. Należy stwierdzić, że przedstawione w tym rozdziale wyniki badań i ich ocena stanowią potwierdzenie tych wniosków. Doktorant analizuje wszystkie parametry ze zrozumieniem istoty ocenianych zjawisk i w każdej części rozdziału formułuje interesujące i ważne wnioski dotyczące wyników badań. Jest to bardzo cenny element rozprawy.

W rozdziale 7 (Optymalizacja składu mieszanki MCE) zastosowano analizę wielokryterialną w celu znalezienia optymalnego rozwiązania, które zapewni korzystne właściwości mieszanki MCE, a tym samym podbudowy drogowej. Przyjęto 7 parametrów do optymalizacji mieszanki MCE w zakresie udziału procentowego poszczególnych materiałów wiążących. Zdaniem recenzenta parametry te dobrano właściwie i prawidłowo uzasadniono ich wybór. W wyniku przeprowadzonej analizy wielokryterialnej wytypowano dwie mieszanki MCE, które dla zadanych kryteriów optymalizacji wykazały bardzo podobne oraz równocześnie korzystne właściwości. Pierwszą z mieszanek, bez udziału modyfikatora RPP, oznaczono symbolem tradycyjnym MCE, a drugą, z 2,0% zawartością RPP oznaczono symbolem MCP. Recenzent zgadza się z wnioskiem podsumowującym przeprowadzony proces optymalizacyjny, który Doktorant sformułował w następujący sposób: **„potwierdza się możliwość minimalizacji ilości tradycyjnych spoiw na rzecz modyfikatora polimerowego RPP. Istnieje również szansa na całkowite wyeliminowanie emulsji asfaltowej z recyklowanej mieszanki MCE.”**

W rozdziale 8 (Moduł sztywności oraz trwałość zmęczeniowa mieszanek MCE i MCP) Doktorant przeprowadził badania modułu sztywności w teście czteropunktowego zginania belki pryzmatycznej i wyznaczył trwałość zmęczeniową mieszanek MCE i MCP wytypowanych w procesie optymalizacji. Za najważniejszy wniosek badawczy tej części pracy należy uznać stwierdzenie, że modyfikator polimerowy RPP znacznie poprawia trwałość zmęczeniową recyklowanej mieszanki MCP w porównaniu do mieszanki MCE. Przykładowo, przy zadanym odkształceniu 180 $\mu\epsilon$ trwałość zmęczeniowa mieszanki z modyfikatorem polimerowym MCP osiągnęła ponad 700 tysięcy cykli obciążenia, do momentu spadku o 50% początkowej wartości modułu sztywności, wyznaczonej po 100 cyklach obciążenia. Mieszanka MCE w warstwie traci swą trwałość zmęczeniową już po 11 tysiącach cykli obciążenia.

W rozdziale 9 (Propozycja typowych układów warstw konstrukcyjnych nawierzchni z podbudową MCP) wykonano obliczenia, pozwalające na określenie typowych układów warstw konstrukcji z recyklowaną podbudową z dodatkiem modyfikatora polimerowego, dla kategorii ruchu KR5-KR7. Badania wykonano z uwzględnieniem dwóch kryteriów zmęczeniowych opracowanych w ramach metody AASHTO 2004 – kryterium spękań zmęczeniowych warstw asfaltowych i kryterium zmęczeniowe ze względu na deformacje trwałe konstrukcji nawierzchni. Analiza wyników obliczeń wskazuje na 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. Należy stwierdzić, że zaproponowane konstrukcje nawierzchni mogą stanowić uzupełnienie obecnych wytycznych *Katalogu Typowych Konstrukcji Nawierzchni Podatnych i Półsztywnych* (KTKNPiP 2014) o konstrukcje typu E dla wszystkich kategorii ruchu.

Rozdziały 6, 7 i 8 jako zasadnicza i najważniejsza część rozprawy, zawierają obszerny zakres badań i analiz. Z tego względu w rozdziałach tych można sformułować kilka uwag krytycznych.

- Przedstawione w rozdziale 6 tablice 6.1 i 6.2 stanowią powtórzenie tablicy 4.3 z rozdziału 4. Czy takie powtórzenie jest uzasadnione?
- W rozdziale 6, podczas oceny wyników badań poszczególnych właściwości, tylko część wyników została opisana modelem matematycznym w postaci wielomianu drugiego stopnia. Takie zestawienie modeli znajduje się dopiero w tablicy 6.13 na stronie 92. Zdaniem recenzenta ocena poszczególnych właściwości powinna być przedstawiona w sposób jednolity w każdym podrozdziale.
- We wstępie rozdziału 7.2 Doktorant stwierdza: „Zdefiniowano wartości parametrów, które podkreślą wodo- i mrozoodporność mieszanki MCE.” Podobne stwierdzenie występuje na stronie 103, wiersz 6 od dołu. Zdaniem recenzenta żaden ze zdefiniowanych parametrów nie jest miarą mrozoodporności tej mieszanki.

W rozdziale 10 (Wnioski oraz kierunki dalszych badań) odpowiadając na sformułowane na wstępie cele badawcze i postawione tezy, Doktorant sformułował 8 wniosków ogólnych, 11 wniosków szczegółowych, oraz przedstawił 2 kierunki dalszych badań. Sformułowanie wniosków ogólnych zapewnia przejrzystość rozdziału i pozwala łatwo zorientować się w podsumowaniu tak obszernego zakresu badań. Można stwierdzić, że przedostatni wniosek ogólny stanowi potwierdzenie tezy nr I, wnioski trzeci, piąty i ósmy (ostatni) stanowią potwierdzenie tezy nr II, a wnioski czwarty i piąty potwierdzają tezę nr III. Wnioski szczegółowe skonstruowane są poprawnie i zostały sformułowane na podstawie przeprowadzonych przez Doktoranta interesujących, oryginalnych badań, które właściwie opisano w pracy.

Opracowanie kierunków dalszych badań należy uznać za właściwe postępowanie. Kierunki sformułowane są w sposób ogólny i zdaniem recenzenta mogłyby być bardziej doprecyzowane. Prezentują niemniej dużą wiedzę Doktoranta w przedmiotowej tematyce i w pozytywnym tego słowa znaczeniu, wykraczają poza zakres ocenianej rozprawy.

5.2. Struktura, język i redakcja rozprawy

Struktura rozprawy jest prawidłowa. Praca napisana jest dość poprawnym i przejrzystym językiem, bez stosowania skrótów myślowych. Występują jednak błędy redakcyjne i stylistyczne. Poniżej przedstawiono kilka ich przykładów:

- rozdział 2.2 nosi tytuł: „**Główne** tezy rozprawy doktorskiej” – zdaniem recenzenta, określenie „główne” sugeruje, że postawiono również tezy szczegółowe, a ponieważ nie stosuje się hierarchii tez, tytuł powinien brzmieć: „Tezy rozprawy doktorskiej”;
- na str. 10, wiersz 20 od dołu jest: „Kolejno dokonana analizy trwałości zmęczeniowej proponowanych rozwiązań.” – zdanie wymaga korekty stylistycznej;
- w rozdziale 2.3, str. 11, wiersz 9 od dołu, w streszczeniu rozdziału 8 Doktorant stwierdza: „Badania stanowią solidne potwierdzenie stosowania modyfikacji w mieszankach MCE.” – zdaniem recenzenta stwierdzenie to jest stylistycznie niewłaściwe i powinno ono brzmieć: „Wyniki badań stanowią solidne potwierdzenie skuteczności stosowania modyfikacji polimerowej mieszanek MCE.”
- w nagłówku Tablicy 4.2 napisano: „Kod Mieszanki **MCEP**”. Skrót ten nie był wcześniej wprowadzony i również nie występuje w spisie oznaczeń i skrótów;

- na str. 32, nad rys. 3.8 jest: „Działania producentów maszyn również potwierdzają znacznie oraz konieczność wdrożenia modyfikacji do sieci drogowej.” – zdanie wymaga korekty stylistycznej;
- na str. 33, wiersz 3 od góry jest: „**Doskonale** spisują się w zaprawach czy betonach cementowych.” – zdaniem recenzenta zdanie to mogłoby brzmieć: „Wykazują korzystne właściwości w zaprawach czy betonach cementowych.”;
- w legendzie rysunku 6.9, str. 56 zastosowano oznaczenia próbek inne niż założono w pracy;
- na str. 67, rozdział 6.3.2, wiersz 6 od góry jest: „Z uwagi na zalecany poziom 80% odporności na działanie wody, dla wody i mrozu (kondycjonowanie w ujemnych temperaturach) przyjęto 70%.” – zdanie wymaga korekty stylistycznej;
- na str. 75, wiersz 5 od dołu, nad rys. 6.25 jest: „Istotny jest odpowiedni dobór ilości spoiw w mieszance MCE oraz optymalizacja jego składu.” – powinno być: „Istotny jest odpowiedni dobór ilości spoiw **i lepiszcza** w mieszance MCE oraz optymalizacja **jej** składu.”
- na str. 88, wiersz 6 od dołu, nad rys. 6.34 jest: „Wzrost ilości RPP powoduje wzrost kąta przesunięcia fazowego, potwierdza to zmian (rys.6.34a) oraz (6.34d).” – zdanie wymaga korekty stylistycznej;
- na str. 101, wiersz 4 od dołu jest: „Kolejno w wysokiej temperaturze pomiaru, jak 50°C.” – zdanie wymaga korekty stylistycznej.

5.3. Uwagi i pytania recenzenta do pracy

Po zapoznaniu się z treścią poszczególnych rozdziałów zostały zgłoszone uwagi krytyczne. Na przedstawione poniżej kwestie recenzent oczekuje odpowiedzi.

- 1) W rozprawie podkreślano niejednokrotnie potrzebę rozwoju technologii w kierunku zmniejszenia kosztów. Czy postulowane w pracy całkowite lub częściowe zastąpienie emulsji asfaltowej proszkiem polimerowym APP w postaci kopolimeru EVA jest ekonomicznie uzasadnione? W pracy nie przeprowadzono takiej analizy.
- 2) Zdaniem recenzenta, wnioski z przeglądu literatury w większym stopniu powinny uzasadniać wybór modyfikatora polimerowego w postaci redyspergowalnego proszku polimerowego etylen-octan winylu (EVA) do modyfikacji mieszanki MCE. Z analizy literatury jednoznacznie powinno wynikać, że tego rodzaju modyfikator może w większym stopniu poprawić dane właściwości fizykomechaniczne podbudowy wykonanej z mieszanki MCE niż, np. kopolimer styren-butadien-styren (SBS). Recenzent prosi o ustosunkowanie się Doktoranta do tej kwestii.
- 3) Jakimi kryteriami kierował się Doktorant określając zakres zawartości od 0,5% do 3,5% (m/m) proszku polimerowego RPP do modyfikacji mieszanki MCE?
- 4) W rozdziale 6.5, na str. 85 Doktorant stwierdza, że wzrost udziału proszku polimerowego oraz emulsji asfaltowej obniża wartość modułu dynamicznego, co w rezultacie może prowadzić do podatności na deformacje w warstwie podbudowy. Czy w związku z tym nie byłoby uzasadnione rozszerzenie planu badań o ocenę odporności na deformacje trwałe mieszanki MCE z tym modyfikatorem?
- 5) Na str. 35 rozprawy, w uzasadnieniu przyjętego planu Boxa-Behnkena, Doktorant stwierdza, że „zaletą tego typu planu eksperymentu jest wykluczenie występowania jednocześnie wszystkich wartości ekstremalnych, (...)”. Recenzent prosi o wyjaśnienie

z jakim niekorzystnym zjawiskiem mogłoby wiązać się wystąpienie w/w kombinacji wartości?

- 6) Na str. 35 rozprawy Doktorant stwierdza, że w wyniku zastosowanego planu eksperymentu Boxa-Behnkena nastąpiła redukcja pełnego planu czynnikowego z 27. do 15 kombinacji. Doktorant nie wyjaśnił jednak w jaki sposób uwzględniono w badaniach kombinację odpowiadającą środkowemu punktowi dziedziny eksperymentu, tj. sytuacji, w której zmienne niezależne występują na trzech średnich poziomach (0,0; 0,0; 0,0)?
- 7) W badaniach modułu sztywności metodą belki 4-o punktowo zginanej Doktorant przyjął średni moduł sztywności mieszanki MCP w temp. 13°C na poziomie 6100 MPa (tablica 8.1). Przy jakich założeniach ta wartość została określona?

6. Wniosek końcowy

Pan mgr inż. Jakub Krasowski przeprowadził samodzielne badania w zakresie analizowanego zagadnienia, zarówno na etapie realizacji części teoretycznej, jak i analitycznej. Posługując się przyjętą metodyką badawczą zrealizował założony program badań i osiągnął zakładane cele, wykazując umiejętność samodzielnego prowadzenia pracy naukowej i formułowania wniosków. Opiniowaną pracę oceniam bardzo wysoko. Dotyczy to zarówno jej strony naukowej jak i formalnej, które nie budzą większych zastrzeżeń. Rezultaty pracy, oprócz wartości naukowej mają też duży potencjał praktyczny i aplikacyjny. Dodatkowo należy podkreślić duży nakład pracy Autora związany z zakresem przeprowadzonych badań i analiz.

Sformułowane w niniejszej opinii uwagi krytyczne nie obniżają w sposób istotny wartości merytorycznej pracy, w związku z tym stwierdzam, że postawione w rozprawie tezy i zdefiniowane cele zostały osiągnięte i wyrażam przekonanie, że rozprawa doktorska mgr inż. Jakuba Krasowskiego, pt.: „**Wpływ dodatku modyfikatora polimerowego na właściwości fizykomechaniczne recyklowanej mieszanki na zimno z emulsją asfaltową**” spełnia wszystkie warunki oraz wymagania stawiane pracom doktorskim określone w art. 187 ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz. U. z 2023 r. poz. 742), stanowiąc oryginalne rozwiązanie problemu naukowego. W związku z tym, stawiam wniosek o dopuszczenie rozprawy doktorskiej mgr inż. Jakuba Krasowskiego do publicznej obrony w dyscyplinie inżynieria lądowa, geodezja i transport.

Ponadto, wobec bardzo wysokiej wartości merytorycznej pracy, składam wniosek o wyróżnienie rozprawy doktorskiej przez Radę Naukową Dyscypliny Inżynieria Lądowa, Geodezja i Transport Politechniki Świętokrzyskiej.

Uzasadnienie wniosku znajduje się w załączeniu.

Michał Sarnowski

Recenzja przygotowana zgodnie z umową

DYREKTOR NAUKOWY DISCYPLINY
Inżynieria Lądowa, Geodezja i Transport

prof. dr hab. inż. Jerzy Wawrzeńczyk