

dr hab. inż. Anna Chomicz-Kowalska, prof. PŚk
Katedra Inżynierii Komunikacyjnej
Wydział Budownictwa i Architektury
Politechnika Świętokrzyska
Al. Tysiąclecia P. P. 7, 25-314 Kielce
e-mail: akowalska@tu.kielce.pl

Kielce, 14.09.2024 r.

RECENZJA

rozprawy doktorskiej mgra inż. Michała Wróbla pt.:
„Odporność na działanie wody i mrozu mieszanek mineralno-asfaltowych
wytwarzanych w technologii asfaltu spienionego dodatkiem zeolitów”

1. Podstawa opracowania recenzji

Podstawą opracowania recenzji jest pismo Zastępcy Przewodniczącego ds. postępowań awansowych Rady Dyscypliny Naukowej Inżynieria Lądowa, Geodezja i Transport Politechniki Lubelskiej dr hab. inż. Tomasza Lipeckiego, prof. uczelni z dn. 4 lipca 2024 r. realizującego uchwałę nr 2024/IV/06 Rady Dyscypliny Naukowej Inżynieria Lądowa, Geodezja i Transport Politechniki Lubelskiej z dnia 26 czerwca 2024 r.

Podstawę prawną do przygotowania recenzji stanowią wymagania określone w art. 187 Ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz. U. z 2023 r. poz. 742, z późn. zm.).

2. Ocena rozprawy

2.1. Ogólna charakterystyka rozprawy

Przedłożona do recenzji rozprawa doktorska pt.: *„Odporność na działanie wody i mrozu mieszanek mineralno-asfaltowych wytwarzanych w technologii asfaltu spienionego dodatkiem zeolitów”* przygotowana została przez mgra inż. Michała Wróbla pod kierunkiem prof. dr hab. inż. Wojciecha Franusa.

Oceniana rozprawa ma charakter pracy badawczej, przedstawionej na 172 stronicach formatu A4. Na zasadniczą część pracy składają się kolejno spis treści (2 strony), opis stosowanych w rozprawie skrótów i symboli (2 strony) streszczenie w języku polskim i angielskim (łącznie 4 strony), przegląd literatury połączony z wprowadzeniem (40 stron), sformułowanie problemu naukowego oraz przedstawienie celów i zakresu pracy (3 strony), opis materiałów oraz metodyki badawczej zastosowanych w rozprawie (18 stron), wyniki badań własnych (44 strony), wnioski końcowe wraz ze wskazaniem kierunków przyszłych badań (2 strony) i bibliografia (17 stron). Na końcu pracy zamieszczono spis tabel, rysunków, fotografii oraz załączniki (łącznie 37 stron).

W ogólnej ocenie struktury rozprawy można stwierdzić, że podzielono ją na 6 rozdziałów z podrozdziałami, a niektóre z podrozdziałów zostały ponownie podzielone na podrozdziały stosownie do treści. **Pierwszy** rozdział stanowi przegląd literatury, którego częścią jest wprowadzenie (podrozdział 1.1) zawarte na dwóch stronach maszynopisu i zawierające dwa cytowania odnoszące się do dobrze znanych i ogólnych informacji na temat powszechności stosowania technologii mieszanek mineralno-asfaltowych oraz typowego dla niej zakresu temperatur technologicznych. Dla zachowania czytelności rozprawy korzystne byłoby wyłączenie wprowadzenia przed rozdział dotyczący analizy stanu wiedzy, szczególnie biorąc pod uwagę charakter powyżej opisanych cytowań. Po dokonaniu analizy stanu wiedzy sformułowano w **rozdziale drugim** problem naukowy, cele pracy i określono jej zakres. **Rozdział trzeci** pt. „Materiały stosowane w badaniach oraz metodyka badawcza” rozpoczyna część badawczą pracy, na którą składają się również **rozdział czwarty** pt. „Wyniki badań własnych” oraz **rozdział piąty** pt. „Wnioski końcowe oraz perspektywy badawcze”. Na część teoretyczną pracy poświęcono zatem 40 stron a na część badawczą 64 strony, tym samym można stwierdzić, że **podział treści w rozprawie odpowiada jej charakterowi**.

Poniżej przedstawiono ogólną charakterystykę poszczególnych rozdziałów rozprawy doktorskiej. **Rozdział pierwszy**, jak wspomniano wcześniej, rozpoczyna wprowadzenie do tematyki podejmowanej przez doktoranta. Myślą przewodnią jest tutaj wzrost zainteresowania energo- i zasobooszczędnymi technologiami stosowanymi w budowie dróg oraz korzystne w tym aspekcie efekty popularyzacji technologii wytwarzania mieszanek mineralno-asfaltowych „na ciepło” (WMA, *warm mix-asphalt*). Wskazano również ogólnie wyzwania i problemy związane z wdrażaniem tego typu technologii. Następnie, rozpoczynając właściwy przegląd literatury doktorant przybliżył założenia technologii wytwarzania mieszanek mineralno-asfaltowych metodą „na ciepło”, rys historyczny i sposoby obniżania temperatur produkcji i wbudowania tych mieszanek – najwięcej uwagi poświęcono technologiom spieniania lepiszcza asfaltowego z wykorzystaniem wody bezpośrednio do niego dodawanej i z zastosowaniem pośrednich nośników wody (np. zeolitów). W zgodzie z tematem rozprawy dalsze, bardziej szczegółowe rozważania doktorant poświęcił właśnie zastosowaniu zeolitów do wytwarzania mieszanek WMA, charakterystyce zeolitów i możliwościom kształtowania ich właściwości funkcjonalnych, oraz pracom innych badaczy poświęconym zastosowaniu tego typu materiałów do wytwarzania mieszanek mineralno-asfaltowych metodą „na ciepło”. Odniesiono się również do badań dotyczących korzyści i ograniczeń tego typu rozwiązań. W dalszej części przeglądu literatury doktorant skupił się na zagadnieniach związanych z odpornością mieszanek mineralno-asfaltowych na działanie wody i mrozu, w tym tych wytwarzanych metodami „na ciepło”. Analizie poddano czynniki wpływające na wrażliwość mieszanek mineralno-asfaltowych na działanie wody i mrozu, sposoby poprawy trwałości w tym aspekcie a także metody badawcze służące ocenie odporności samych mieszanek mineralno-asfaltowych na działanie wody i mrozu jak i właściwości i zjawisk mających na nią wpływ. Dokonano również przeglądu literatury z zakresu dotychczas zrealizowanych badań nad wodo- i mrozoodpornością mieszanek mineralno-asfaltowych z lepiszczem asfaltowym spienionym zeolitami.

W **rozdziale drugim**, doktorant dokonał podsumowania przeglądu literatury prawidłowo identyfikując aktualne potrzeby badawcze w analizowanym obszarze i jednocześnie formułując problem naukowy. W dalszej części rozdziału sformułowano jeden główny oraz trzy szczegółowe cele pracy. Następnie, najpierw syntetycznie w postaci ośmiu punktów, przedstawiono zakres pracy obejmujący całość zrealizowanych w rozprawie prac, po czym opisano szczegółowo plan badań podzielony na następujące po sobie etapy. Plan badań zwizualizowano i doprecyzowano z wykorzystaniem schematu blokowego.

W **rozdziale trzecim** doktorant rozpoczyna część badawczą pracy przedstawiając materiały zastosowane w rozprawie. W podrozdziale 3.1.1 pn. „Asfalty” określono rodzaj zastosowanego w badaniach lepiszcza asfaltowego (asfalt drogowy 50/70 produkcji Orlen Asfalt) oraz przedstawiono zastosowane w badaniach procedury postępowania z próbkami do badań. W podrozdziale 3.1.2 wymieniono trzy rodzaje zeolitów syntetycznych zastosowanych w rozprawie różniących się rodzajem struktury (NaA, NaP1, NaX). W odniesieniu do sposobu wytworzenia zastosowanych zeolitów odwołano się do pracy autorstwa dr inż. Agnieszki Woszuk. W ocenie recenzenta, doktorant powinien przedstawić sposób wytwarzania materiałów zeolitowych. Podrozdziały 3.1.3 i 3.1.4 zawierają opis odpowiednio kruszyw stosowanych do zaprojektowania dwóch mieszanek mineralno-asfaltowych i trzech wykorzystanych w pracy środków adhezyjnych (dwa płynne i wapno hydratyzowane).

Podrozdział 3.2 zawiera opis metodyki badawczej. Przedstawiono metody badań właściwości zastosowanych zeolitów, podstawowych właściwości lepiszczy asfaltowych, właściwości spienionych lepiszczy asfaltowych wraz ze szczegółowym opisem postępowania z próbkami, projekt mieszanek mineralno-asfaltowych AC11S KR 3-4 i AC16W KR 3-4, szczegółowy opis procesu ich wytwarzania i opis badań mieszanek mineralno-asfaltowych. Opisano również zastosowane metody analizy statystycznej i wykorzystane oprogramowanie.

W **rozdziale czwartym** zawarto wyniki zrealizowanych badań własnych. W pierwszej kolejności doktorant przedstawił wyniki badań pozwalające scharakteryzować materiały stosowane w rozprawie, tj. lepiszcze asfaltowe (skład grupowy, penetracja, temperatura mięknięcia, lepkość dynamiczna), kruszywa (uziarnienie, gęstość), zeolity (potwierdzenie struktury, składu chemicznego, właściwości teksturalnych, uziarnienia i charakterystyki termicznej zsintezowanych materiałów). Następnie przedstawiono wyniki badań lepkości dynamicznej lepiszcza asfaltowego po wymieszaniu z trzema rodzajami zeolitów przed i po nasączeniu wodą, oraz wyniki oceny ekspansji i czasu półtrwania piany asfaltowej wytworzonej po wymieszaniu lepiszcza asfaltowego z dwoma rodzajami zeolitów (o strukturze NaA i NaP1). Wszystkie badania opisane w kolejnych rozdziałach realizowane były tylko z wykorzystaniem zeolitów o dwóch strukturach - NaA i NaP1. W podrozdziale 4.5 zaprezentowano wyniki oceny właściwości niskotemperaturowych asfaltów z dodatkiem zeolitów syntetycznych dokonanej na podstawie badań w reometrze belki zginanej lepiszczy niepoddanych starzeniu. Kolejną grupą przedstawionych wyników badań własnych były rezultaty badań właściwości powierzchniowych lepiszczy asfaltowych z wykorzystaniem goniometru optycznego metodą kropli leżącej. Wyniki badań kątów zwilżania posłużyły do wyznaczenia swobodnej energii powierzchniowej (SEP), jej składowych i parametrów

pochodnych. Ostatnie z przedstawionych w rozprawie badań lepiszczy asfaltowych dotyczyły oceny powinowactwa między kruszywem a lepiszczem z wykorzystaniem metody butelkowej. Analizowano tutaj również wpływ zastosowania środków adhezyjnych (dwóch w postaci płynnej i wapna hydratyzowanego). Ostatnia z przedstawionych grup badań dotyczyła oceny właściwości mieszanek mineralno-asfaltowych wytwarzanych z dwoma z analizowanych zeolitów (o strukturze NaA i NaP1) oraz trzema środkami adhezyjnymi. Badaniom poddano dwa rodzaje mieszanek mineralno-asfaltowych (przeznaczone do warstwy ścieralnej i wiążącej) a ocenianymi parametrami była zawartość wolnych przestrzeni w próbkach zagęszczanych ubijakiem Marshalla (2x75 uderzeń) a także wytrzymałość na pośrednie rozciąganie próbek Marshalla w stanie suchym, po jednym i po 50 cyklach zamrażania oraz wskaźniki ITSR po jednym i po 50 cyklach zamrażania. W podrozdziale 4.9 przedstawiono wyniki analiz korelacyjnych między parametrami związanymi ze swobodną energią powierzchniową lepiszczy asfaltowych a odpornością na działanie wody i mrozu odpowiednich mieszanek mineralno-asfaltowych.

W rozdziale piątym doktorant sformułował sześć wniosków odnoszących się bezpośrednio do zrealizowanych prac badawczych oraz cztery propozycje dalszych kierunków badań.

Podsumowując należy stwierdzić, że **układ i struktura recenzowanej rozprawy doktorskiej są prawidłowe.**

2.2. Temat i aktualność rozprawy

Temat rozprawy odpowiada podjętemu w niej problemowi naukowemu, celom, zrealizowanemu planowi badań i sformułowanym wnioskowi. Przedmiotem prac w zakresie przeglądu literatury i zrealizowanych badań oraz analiz była odporność na działanie wody i niskich temperatur mieszanek mineralno-asfaltowych wytwarzanych metodą „na ciepło” z wykorzystaniem zeolitów.

Doktorant dokonał przeglądu literatury w sposób wyczerpujący, wykorzystując łącznie 185 źródeł opublikowanych w języku polskim oraz publikacji zagranicznych. Większą część bibliografii stanowią artykuły naukowe z recenzowanych czasopism naukowych. Zdecydowana większość wykorzystanych źródeł ma charakter aktualny a przywołanie starszych prac jest dobrze uzasadnione. Właściwy dobór bibliografii potwierdza wysoką wartość merytoryczną części literaturowej rozprawy. Można stwierdzić, że doktorant **w prawidłowy sposób dokonał analizy aktualnego stanu wiedzy i prawidłowo korzystał z przywołanych źródeł literaturowych.**

Tytuł rozprawy należy uznać za sformułowany poprawnie, aczkolwiek dosyć ogólnie. Zakres zrealizowanych badań i analiz jest jednak bardzo szeroki obejmując stosowanie zeolitów o różnych strukturach, nienasączanych wodą i nasączanych, badania na lepiszczach asfaltowych oraz weryfikację wyników w badaniach mieszanek mineralno-asfaltowych, również z wykorzystaniem różnych środków adhezyjnych i metod badawczych. W związku z powyższym można stwierdzić, że **temat rozprawy został sformułowany prawidłowo.**

Jednym z największych wyzwań stojących przed przemysłem budowlanym, w tym również przemysłem drogowym jest minimalizacja wpływu inwestycji i działania przedsiębiorstw na środowisko. Cele w tym zakresie, dla których osiągnięcia wdrażane są m.in. polityki i strategię dekarbonizacyjne, są postawione bardzo wysoko (np. cel zerowej emisji netto – ang. „net zero”) i wymagają opracowania oraz wdrożenia na szeroką skalę innowacyjnych rozwiązań w całym łańcuchu funkcjonowania przedsiębiorstw, dostaw, produkcji materiałów, procesu budowlanego i utrzymania obiektów budowlanych. W zakresie technologii mieszanek mineralno-asfaltowych rozwiązania te obejmują m. in. stosowanie alternatywnych źródeł energii i paliw, lepszej kontroli procesu produkcji, alternatywnych lepiszczy asfaltowych, zwiększenia wykorzystania materiałów z recyklingu oraz – co jest bezpośrednio związane z przedmiotem niniejszej rozprawy – obniżenia temperatur produkcji mieszanek mineralno-asfaltowych i zapewnienia ich wysokiej trwałości.

Podjęte w rozprawie zagadnienia dotyczące wodo- i mrozoodporności – a szerzej patrząc na to zagadnienie – trwałości mieszanek mineralno-asfaltowych wytwarzanych w obniżonych temperaturach, w tym z wykorzystaniem zeolitów, są nieustająco przedmiotem zainteresowania nie tylko badaczy, ale również technologów i inwestorów na całym świecie. W świetle powyższego nie ulega wątpliwości, że **oceniana praca jest aktualna i cechuje ją wysoki poziom oryginalności.**

2.2. Problem naukowy, tezy i cel rozprawy

Na podstawie dokonanego przeglądu literatury doktorant stwierdził, że bardziej szczegółowego scharakteryzowania wymagają właściwości reologiczne lepiszczy asfaltowych spienionych zeolitami a także właściwości samych mieszanek mineralno-asfaltowych z tego rodzaju lepiszczem, szczególnie ich odporność na działanie wody i mrozu wskazując, że na kształtowanie się tego parametru mają wpływ złożone oddziaływania zarówno o charakterze fizycznym jak i chemicznym. Mając na uwadze powyższe należy stwierdzić, że prawidłowo określone zostały potrzeby badawcze a podjęty problem naukowy, stanowiący kontynuację krajowych badań nad zastosowaniem zeolitów do spieniania lepiszczy w technologii produkcji mieszanek WMA, jest aktualny i wpisuje się w światowe kierunki rozwoju proekologicznych technologii w budownictwie drogowym.

Bazując na wnioskach z przeglądu literatury sformułowano jeden ogólny cel pracy jako dokonanie analizy odporności na oddziaływanie wody i mrozu mieszanek mineralno-asfaltowych wytwarzanych w technologii „na ciepło” z wykorzystaniem zeolitów, który bezpośrednio koresponduje z tytułem rozprawy oraz trzy szczegółowe cele pracy o następującym brzmieniu:

- „ocena właściwości reologicznych i procesów adhezyjnych w asfaltach spienionych poprzez dodatek zeolitów”,
- „określenie wpływu płynnych środków adhezyjnych i wapna hydratyzowanego na przyczepność asfaltu do kruszywa oraz odporność na wodę i mróz mieszanek mineralno-asfaltowych”,

- „wyznaczenie korelacji pomiędzy odpornością na działanie wody i mrozu MMA a adhezją spienionego asfaltu wyznaczoną na podstawie energii powierzchniowej”.

W zaproponowanych celach badawczych brakuje odniesienia się do wpływu rodzaju kruszywa na zjawisko adhezji lepiszcza asfaltowego i odporność mieszanek mineralno-asfaltowych na działanie wody i mrozu. Na uznanie zasługuje uwzględnienie potrzeby weryfikacji wyników badań uzyskanych różnymi metodami i w różnej skali (badania swobodnej energii powierzchniowej i badania na mieszankach mineralno-asfaltowych) oraz wyznaczenie zależności między parametrami uzyskiwanymi w tych badaniach. **Zaproponowane cele badawcze odpowiadają przedstawionemu problemowi naukowemu i zostały sformułowane prawidłowo.**

W pracy nie sformułowano typowej hipotezy badawczej, a jedynie wymienione wcześniej cele pracy o otwartym charakterze. Cele te sprowadzają się do dokonania oceny i zbadania korelacji między wybranymi właściwościami i parametrami lepiszczy asfaltowych i mieszanek mineralno-asfaltowych. Z uwagi na eksploracyjny charakter rozprawy doktorskiej można uznać sformułowane cele za wystarczające, jednak na podstawie dokonanego przeglądu literatury można było dokonać próby sformułowania chociaż ogólnych, ale testowalnych hipotez stanowiących o wpływie - bądź jego braku - rodzaju zastosowanych zeolitów i środków adhezyjnych na parametry wodo- i mrozoodporności mieszanek mineralno-asfaltowych.

2.2. Program i zakres badań oraz analiz

Analizując wyniki zawarte w części badawczej można stwierdzić, że badania realizowane były w kolejności zgodnej z kolejnością ich przedstawienia w pracy, a uzyskiwane rezultaty wykorzystywane były do określenia zakresu prac w następnych etapach badań, co jest dowodem na eksploracyjny charakter rozprawy.

Formułując opis metodyki badawczej doktorant – słusznie – poświęcił dużo uwagi badaniom spienionych lepiszczy asfaltowych, które są wymagające z uwagi na znaczny wpływ czasu, temperatury i sposobu postępowania z próbkami na uzyskiwane wyniki z uwagi na dosłownie „ulotny” charakter piany asfaltowej. Przedstawione opisy wskazują na dobrą znajomość analizowanych zagadnień.

Doktorant podjął się analizy sformułowanego problemu badawczego w sposób kompleksowy, rozpoczynając swoje badania od oceny i potwierdzenia właściwości materiałów wejściowych (lepiszcza asfaltowego, zeolitów o różnych strukturach, kruszyw mineralnych), następnie dokonano oceny wpływu dodatku zeolitów na właściwości lepiszczy asfaltowych i zdolność do wytwarzania piany asfaltowej. Te informacje posłużyły określeniu wielkości dodatku zeolitów do lepiszczy asfaltowych stosowanych w dalszych badaniach.

W następnym etapie dokonano oceny właściwości niskotemperaturowych lepiszczy asfaltowych spienionych zeolitami oraz zrealizowano badania swobodnej energii powierzchniowej lepiszczy asfaltowych i określenia powiązanych z nią parametrów. Wykorzystano tutaj autorską metodę kondycjonowania próbek, nawiązującą do warunków,

w których kondycjonowane są mieszanki mineralno-asfaltowe w badaniu wrażliwości na działanie wody i mrozu, uwzględniającą oddziaływanie różnych temperatur i zredukowanego ciśnienia.

Przed przystąpieniem do badań wykorzystujących mieszanki mineralno-asfaltowe dokonano weryfikacji skuteczności środków adhezyjnych (płynnych i wapna hydratyzowanego) z użyciem metody butelkowej, a wyniki tych badań pozwoliły określić potrzebną zawartość tych dodatków w mieszankach. Cennym z naukowego punktu widzenia jest fakt, że zastosowane płynne środki adhezyjne różniły się składem chemicznym – zastosowano dodatek polifosforowy oraz aminowy, a ponadto analizowano wykorzystanie dodatku wapna hydratyzowanego i dwóch rodzajów kruszyw o zasadowym i kwaśnym charakterze (dolomit i granodioryt).

Ostatnim etapem badań było wykonanie dwóch rodzajów mieszanek mineralno-asfaltowych, różniących się przeznaczeniem (do warstwy ścieralnej oraz wiążącej) a przez to zawartością lepiszcza asfaltowego (odpowiednio: 5,6% i 4,6%) oraz uziarnieniem (odpowiednio: do 11 i 16 mm) a także rodzajem użytego w nich kruszywa (odpowiednio: przeważająco granodioryt i dolomit). Podkreślić należy zatem, że materiały wybrane do badań na tym etapie były spójne ze zrealizowanymi wcześniej pracami i pozwalały na powiązanie ze sobą właściwości uzyskanych podczas realizacji całej rozprawy. Znaczenie uzyskanych wyników w badaniach mieszanek mineralno-asfaltowych podnosi bardzo zbliżona zagęszczalność (zawartość wolnej przestrzeni) wykonanych zarobów w obrębie mieszanek danego rodzaju, niezależnie czy były to mieszanki referencyjne, czy wytwarzane metodą „na ciepło”. Odpowiednio zaprojektowany, spójny i przemyślany plan badań pozwolił doktorantowi powiązać ze sobą wyniki badań uzyskane w różnych skalach i etapach badań, co umożliwiło w ostatnim etapie realizacji rozprawy skwantyfikować je w postaci korelacji.

W ocenie tego aspektu rozprawy należy również wymienić kilka uwag, dotyczących zarówno samego programu badań jak i jego prezentacji. Pewne wątpliwości rodzi wykorzystanie wyników badań lepkości dynamicznej do eliminacji zeolitu o strukturze NaX z dalszych badań. Po pierwsze uzyskano bardzo małe różnice w wartościach lepkości dynamicznej analizowanych mieszanek lepiszcza asfaltowego z zeolitami. Niewielkie jest zatem prawdopodobieństwo, aby parametr ten mógł być użyteczny w prognozowaniu wpływu poszczególnych zeolitów na urabialność i zagęszczalność mieszanki mineralno-asfaltowej. Potwierdzają to wyniki analizy statystycznej (tabela 12), która nie wykazała istotnego wpływu zawartości zeolitów na ten parametr. Po drugie, w większości przypadków po dodaniu zeolitu uzyskano wzrost lepkości dynamicznej lepiszcza asfaltowego a nie jej spadek, co może ograniczać przydatność wykorzystania tych wyników w ocenie skuteczności zeolitów podczas produkcji mieszanki mineralno-asfaltowej metodą „na ciepło”. Warto zauważyć, że nawet w badaniach lepiszczy asfaltowych spienionych bezpośrednim dodatkiem wody, obserwowane zmniejszenie lepkości lepiszcza po spienieniu rzadko przekracza 10% i również nie koresponduje bezpośrednio z możliwą do uzyskania redukcją temperatury zagęszczania mieszanki mineralno-asfaltowej. Podsumowując można stwierdzić, że zaobserwowane przez doktoranta zmiany lepkości dynamicznej były wypadkową zwiększenia lepkości dynamicznej

lepiszcza na skutek dodania do niego ciała stałego o drobnym uziarnieniu (zeolitu) – obserwowaną również w przypadku dodania np. mączki wapiennej – oraz efektu spienienia lepiszcza zmniejszającego wartość tego parametru. Wobec powyższego, warto byłoby uwzględnić zeolit o strukturze NaX w badaniach spieniania i być może wyniki tych prób uznać za rozstrzygające przy eliminacji jednego z zeolitów.

Wyniki badań właściwości niskotemperaturowych w reometrze belki zginanej zdają się być w niewielkim stopniu wykorzystane we wnioskowaniu na temat odporności na działanie wody i mrozu mieszanki mineralno-asfaltowej. Warto zwrócić uwagę na fakt, że bardziej sztywne lepiszcze w niskich temperaturach powinno być bardziej odporne na utratę kohezji z kruszywem. Trzeba również zauważyć, że uzyskane różnice w sztywnościach niskotemperaturowych między asfaltem bazowym i asfaltem z dodatkiem zeolitu NaP1 mieszczą się w granicach powtarzalności metody badawczej. Można zatem stwierdzić o braku negatywnego wpływu dodatku tego zeolitu na właściwości niskotemperaturowe lepiszcza w tym zakresie. Przy braku uwzględnienia procesu starzenia trudno odnosić się do obniżonych wartości dolnych temperatur krytycznych wg systemu Performance Grade (PG). Twierdzenie o wpływie dodatku zeolitu na odporność na deformacje trwałe jest nieuprawnione, ponieważ (1) wymagałoby porównania mieszanki asfaltu z zeolitem oraz z wypełniaczem mineralnym oraz (2) odnosi się do diametralnie innego zakresu temperatur eksploatacyjnych. Komplementarną w zakresie badań reologicznych mogłaby być ocena sztywności lepiszczy asfaltowych z wykorzystaniem reometru dynamicznego ścinania w temperaturach odpowiadających temperaturom kondycjonowania próbek w procedurze ITSr.

Inne uwagi w tym zakresie:

- w schemacie planu badawczego (rys. 17) nie uwzględniono badań spieniania lepiszcza asfaltowego zeolitami,
- nie umotywowano wykorzystania dolomitu oraz granodiorytu jako głównych składników mieszanek mineralno-asfaltowych oraz ich wykorzystania w badaniach na wcześniejszych etapach,
- w niektórych przypadkach brakuje jasnej informacji w planie badań dotyczącej liczby badanych próbek,
- nie sprecyzowano, czy w pracach opisanych po badaniach lepkości dynamicznej stosowano zeolity nasączone wodą czy nienasączone ani z jakiego powodu zrezygnowano z jednego z tych wariantów,
- w podpisach rysunków zawierających wyniki badań powinowactwa asfaltu i kruszywa stosowane są określenia „kruszywo kwaśne” i „kruszywo zasadowe” jednak nie ma to odzwierciedlenia w planie badań ani opisie stosowanych materiałów,
- w analizie wyników oznaczeń swobodnej energii powierzchniowej stosowane są nieprecyzyjne zapisy dot. badanych materiałów, np. „(...) kondycjonowane były w warunkach wody i obniżonego ciśnienia w zestawieniu z kruszywem kwaśnym” (doktorant nie wykonał takich badań, a bazował na parametrach SEP z literatury),
- w zakresie oceny korelacji (podrozdział 4.9) przedstawiono tylko wybrane rezultaty analizy statystycznej (z najsilniejszymi korelacjami o potwierdzonej istotności

statystycznej) – korzystne byłoby przedstawienie pełnej macierzy korelacji analizowanych parametrów.

Przedstawiony w pracy zakres badań oraz zastosowana nowoczesna aparatura badawcza są adekwatne do założonych celów a wyniki badań poddane zostały analizie statystycznej dla obiektywnej oceny wpływu analizowanych czynników.

Wymienione spostrzeżenia nie umniejszają znacząco zrealizowanym badaniom, które z uwagi na wieloskalowość i zastosowanie różnorodnych metod analiz, mają kompleksowy charakter i stanowią o dużej wiedzy i doświadczeniu doktoranta. W związku z powyższym **przedstawiony i zrealizowany plan badań można ocenić pozytywnie.**

2.3. Realizacja celu rozprawy oraz jej wkład do aktualnego stanu wiedzy

Doktorant zrealizował szeroki, dobrze zaprojektowany program badań służący ocenie wpływu zeolitów na odporność na działanie wody i mrozu mieszanek mineralno-asfaltowych wytwarzanych metodą „na ciepło” z wykorzystaniem zeolitów. W pracach doświadczalnych wykorzystano różne rodzaje mieszanek mineralno-asfaltowych, kruszyw, zeolity o różnych strukturach oraz środków adhezyjnych, co pozwala już dokonywać pewnych uogólnień co do uzyskanych zależności.

Zastosowanie odpowiednich metod badawczych, planowania eksperymentu i analizy uzyskanych wyników pozwoliło na dokonanie analizy ocenianych czynników na odporność na działanie wody i mrozu mieszanek mineralno-asfaltowych wytwarzanych metodą „na ciepło” z dodatkiem zeolitów, a ponadto dokonano oceny właściwości reologicznych lepiszczy asfaltowych z dodatkiem zeolitów, szczegółowo przeanalizowano procesy adhezyjne zachodzące w asfaltach spienionych poddanych różnym warunkom kondycjonowania, określono skuteczność stosowania różnego rodzaju środków adhezyjnych w badaniach powinowactwa między lepiszczem asfaltowym i kruszywem oraz w badaniach odporności mieszanek mineralno-asfaltowych na działanie wody i mrozu. Ponadto, zweryfikowano korelacje między odpornością na działanie wody i mrozu mieszanek mineralno-asfaltowych z dodatkiem zeolitów a wynikami badań kąta zwilżania lepiszczy asfaltowych.

Spośród zrealizowanych prac badawczych i dokonanych analiz, do najważniejszych osiągnięć rozprawy należy zaliczyć:

- opracowanie autorskiej metody kondycjonowania próbek lepiszczy asfaltowych służących ocenie składowych i parametrów pochodnych swobodnej energii powierzchniowej,
- potwierdzenie istnienia niektórych związków korelacyjnych pomiędzy parametrami swobodnej energii powierzchniowej lepiszczy z dodatkiem zeolitów a wynikami uzyskanymi w badaniach mieszanek mineralno-asfaltowych (wskaźnik ITSR po jednym i 50 cyklach zamrażania) oraz zastosowanie autorskiej metody kondycjonowania próbek w badaniach kąta zwilżania lepiszczy asfaltowych.

Co prawda, z uwagi m.in. na zrealizowanie badań z jednym tylko lepiszczem asfaltowym i dwoma kruszywami, uzyskane związki nie są wystarczające do modelowania

parametru wodo- i mrozoodporności w szerszym zakresie, to są one dobrym punktem wyjścia do przyszłych badań zarówno doktoranta jak i innych badaczy. Być może zastosowanie bardziej zaawansowanych metod statystycznych pozwoli w przyszłości doktorantowi uzyskać dodatkową wiedzę z uzyskanego zbioru danych.

Uzyskane wyniki stanowią znaczący wkład do aktualnego stanu wiedzy z zakresu technologii mieszanek mineralno-asfaltowych i obrazują one ograniczenia aktualnie dostępnych metod badawczych. Na wyniki badań lepkości dynamicznej istotny wpływ miała obecność samego dodatku zeolitu w charakterze wypełniacza – ciała stałego – jak również i efekt spieniania lepiszcza co w efekcie skutkowało rezultatami, których istotności statystycznej nie udało się potwierdzić. Z kolei w przypadku wyników badań powinowactwa kruszywa i lepiszcza asfaltowego metodą butelkową uzyskano wyniki, które częściowo nie znalazły potwierdzenia w badaniach mieszanek mineralno-asfaltowych. Powodem tego był zapewne wpływ różnego poziomu odporności na ścieranie analizowanych kruszyw – dolomitu i granodiorytu.

Doktorant sformułował również bardzo ciekawe kierunki dalszych badań, spośród których na szczególną uwagę zasługują badania w zakresie oceny skuteczności alternatywnych środków adhezyjnych oraz prace nad stosowaniem destruktu asfaltowego w połączeniu z obniżeniem temperatur technologicznych mieszanek mineralno-asfaltowych z zeolitami.

Inne uwagi w zakresie realizacji celu rozprawy obejmują:

- przedstawione wnioski końcowe mają charakter bardzo ogólny, korzystnie byłoby przedstawić je w formie wniosków ogólnych i szczegółowych,
- wniosek o brzmieniu „możliwe jest wykonanie mieszanki mineralno-asfaltowej w technologii asfaltu spienionego poprzez dodatek zeolitów w obniżonych temperaturach technologicznych zarówno z zastosowaniem kruszyw kwaśnych jak i zasadowych” jest oczywisty i jest potwierdzony komercyjnym wykorzystaniem zeolitów w wytwarzaniu mieszanek mineralno-asfaltowych,
- nie wszystkie cele postawione w rozprawie mają pełne odzwierciedlenie we wnioskach (np. pierwszy cel szczegółowy),
- bardzo ogólnie sformułowano kierunki dalszych badań dotyczące rozwoju uproszczonych metod określania mrozoodporności mieszanek mineralno-asfaltowych oraz badań asfaltów spienionych pod kątem innych właściwości reologicznych.

Podsumowując, uzyskana w trakcie realizacji rozprawy doktorskiej nowa wiedza ma dużą wartość poznawczą oraz cechy aplikacyjne, będąc cenną nie tylko dla badaczy, ale również praktyków. Można stwierdzić, że postawione w rozprawie doktorskiej cele zostały zrealizowane i stanowi ona istotny wkład w rozwój dyscypliny naukowej Inżynieria lądowa, geodezja i transport.

2.4. Uwagi redakcyjne

Recenzowana praca napisana jest poprawnym językiem technicznym. Część rysunkowa w pracy jest estetyczna i przejrzysta, wizualizacja danych w rozdziale obejmującym wyniki badań własnych wykonana została z dużą starannością i szczegółowością. Rysunki przedstawione w rozdziale obejmującym przegląd literatury, zaczerpnięte z innych prac naukowych zostały przedstawione w sposób czytelny. W pracy zanotowano błędy redakcyjne, które nie mają znaczącego wpływu na merytoryczny aspekt rozprawy. Poniżej przedstawiono wybrane z nich:

- 1) tytuł podrozdziału 1.4.1 powinien brzmieć „Czynniki wpływające na wodoodporność mieszanek mineralno-asfaltowych” - ten szerszy zakres znajduje odzwierciedlenie w treści samego podrozdziału, w tytule rozprawy („Odporność na działanie wody i mrozu mieszanek (...)”) oraz zakresie planu badawczego,
- 2) p. 1.4.2, pierwszy akapit, 6 linijka: słowo „Dodatki” powinno rozpoczynać się małą literą,
- 3) p. 1.4.2, drugi akapit, zamiast „wiele badań” powinno być „wiele metod badawczych”,
- 4) p. 1.4.2, trzeci akapit, skrótowiec „Aashto” powinien być napisany wielkimi literami, a przecinek po słowach „na bazie” należy usunąć,
- 5) cytowania wymaga źródło, z którego zaczerpnięto parametry SEP dla kruszyw zasadowych i kwaśnych (w podpisie tabeli 4),
- 6) str. 102, definicją słowa „optymalny” jest wg SJP „najlepszy z możliwych w określonych warunkach”, zatem nie powinno się używać sformułowań w rodzaju „najoptymalniejszy”,
- 7) nie opisano co przedstawiają słupki błędów na wykresach (np. w podrozdziale 4.8),
- 8) p. 3.1.1 i w innych miejscach pracy: brak odstępu między wartością a jednostką miary w zapisie np.: „5kg”,
- 9) podpis rysunku 6 str. 21 „klinoptiolitu” powinno być „klinoptylolitu”,
- 10) błędy w zapisie: „tekstualne”, powinno być „teksturalne”,
- 11) zróżnicowany styl zapisu jednostki °C, czasami stawiane odstępy po wartości temperatury,
- 12) w tabelach (np. tab. 7, tab.15), na wykresach (np. rys. 40, rys. 48) oraz w tekście pracy jako znak dziesiętny występuje kropka zamiast przecinka,
- 13) powtórzenia, np.: str. 19 ostatni wiersz: „mieszanek mieszanek”; str. 32 wiersz 2: „ich częstotliwości ich”, str. 48 wiersz 9: „mieć będzie mieć”,
- 14) str. 105, zakresy wymaganych zawartości wolnej przestrzeni w mieszanekach do warstwy wiążącej wymagają weryfikacji; w tekście pracy str. 105 wiersz 9 podano „od 3% do 5%”, na rysunku 55 „Vm min=3%, Vm max =6%”,
- 15) „krótko terminowo” powinno być łącznie str. 93 wiersz 5,
- 16) wartości lepkości na rysunkach 34, 35, 36 i 37 nie są zgodne z wartościami podawanymi w tekście pracy – błędnie podane jednostki miary,

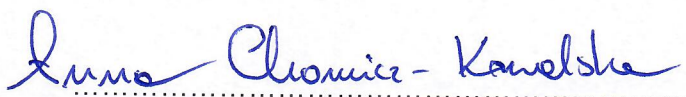
17) str. 43 wiersz 14: „asfaltów z asfaltem zwykłym” powinno być „mieszanek z asfaltem zwykłym”,

18) str. 78 wiersz 11: „sybstratach” powinno być „substratach”.

3. Wniosek końcowy

Autor rozprawy wykazał się rzetelnością, **wysokim poziomem wiedzy teoretycznej i umiejętnościami praktycznymi**, które pozwoliły mu **samodzielnie zrealizować założone w niniejszej pracy naukowej cele**. Rozprawa doktorska mgra inż. Michała Wróbla zawiera **cenne wartości poznawcze i aplikacyjne**. Sformułowane w recenzji **uwagi krytyczne nie obniżają w sposób istotny wartości naukowej rozprawy**. Uzyskane przez doktoranta oryginalne wyniki badań eksperymentalnych pozwoliły zrealizować cele rozprawy, **stanowiąc tym samym oryginalne rozwiązanie prawidłowo zdefiniowanego problemu naukowego**. Niniejszą rozprawę doktorską należy uznać za istotny wkład do stanu wiedzy w zakresie dyscypliny naukowej Inżynieria lądowa, geodezja i transport.

Wobec powyższego wyrażam przekonanie, że rozprawa doktorska mgra inż. Michała Wróbla pt.: „Odporność na działanie wody i mrozu mieszanek mineralno-asfaltowych wytwarzanych w technologii asfaltu spienionego dodatkiem zeolitów” **spełnia wszystkie wymagania stawiane pracom doktorskim** zgodnie z Ustawą Prawo o szkolnictwie wyższymi i nauce z dnia 20 lipca 2018 r. (Dz. U. z 2023 r. poz. 742, z późn. zm.). W związku z tym, **stawiam wniosek o dopuszczenie rozprawy doktorskiej mgra inż. Michała Wróbla do publicznej obrony**.



dr hab. inż. Anna Chomicz-Kowalska, prof. PŚk