

Warszawa, dnia 12 stycznia 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. Joanny Bartos**
pt. „**Wpływ dodatku WMA i wosku syntetycznego na właściwości lepiszczy drogowych**”

Promotorem rozprawy doktorskiej jest dr hab. inż. Anna Chomicz-Kowalska, prof. PŚk a promotorem pomocniczym - dr inż. Krzysztof Maciejewski.

1. Podstawa opracowania recenzji

Podstawą formalną do wykonania recenzji rozprawy doktorskiej jest pismo Pana Dyrektora Naukowego Rady Dyscypliny Inżynieria Lądowa, Geodezja i Transport Politechniki Świętokrzyskiej, prof. dr hab. inż. Jerzego Wawrzeńczyka z dnia 07.11.2023 r., realizującego uchwałę Rady Naukowej Dyscypliny Inżynieria Lądowa, Geodezja i Transport PŚk nr 27/2023 z dnia 25.10.2023 r. dotyczącą powołania recenzentów rozprawy doktorskiej Pani mgr inż. Joanny Bartos.

Podstawę prawną do wykonania recenzji stanowią obowiązujące w dniu wszczęcia przewodu doktorskiego przepisy ustawy z dnia 14 marca 2003 r. o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki oraz Rozporządzeniem Ministra Nauki i Szkolnictwa Wyższego z dnia 22 września 2011 r. w sprawie szczegółowego trybu przeprowadzania czynności w przewodach doktorskich, w postępowaniu habilitacyjnym oraz w postępowaniu o nadanie tytułu profesora (Dz. U. Nr 204 poz. 1200).

2. Przedmiot recenzji

Zgodnie z art. 13 ust. 1 ustawy z dnia 14 marca 2003 r. o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki, 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.

wpłynęło dnia:

Data 2024-01-23

Podpis 

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

Recenzowana rozprawa doktorska podejmuje problem oceny wpływu kombinacji wybranych dodatków do lepiszczy asfaltowych i obniżonych temperatur technologicznych na właściwości reologiczne i funkcjonalne lepiszczy w wysokich temperaturach technologicznych oraz w temperaturach eksploatacyjnych nawierzchni.

Jak Doktorantka słusznie zauważyła, obowiązujące obecnie wysokie wymagania ochrony środowiska powodują konieczność wdrażania proekologicznych rozwiązań na każdym etapie budowy nawierzchni drogowych. Dotyczy to szczególnie wytwarzania tradycyjnych mieszanek mineralno-asfaltowych w technologii „na gorąco” (HMA – Hot-Mix Asphalt), co jest związane z emisją do atmosfery gazów cieplarnianych i pyłów. Z tego względu coraz częściej stosowane są i stale rozwijane technologie produkcji mieszanek mineralno-asfaltowych „na ciepło” (WMA – Warm-Mix Asphalt) oraz „na półciepło” (HWMA – Half-Warm Mix Asphalt). Obniżenie temperatury wytwarzania mieszanek jest możliwe przez zastosowanie specjalnych płynnych lub stałych dodatków do lepiszczy i mieszanek mineralno-asfaltowych, przez spienianie asfaltu wodą lub stosowanie emulsji asfaltowych. Najczęściej stosowane są dodatki wosków syntetycznych i zeolity tj. dodatki uwodnionych glinokrzemianów występujących w postaci naturalnej oraz syntetycznej. Technologie WMA i HWMA spełniając ważny aspekt proekologiczny muszą jednak zapewnić osiągnięcie przynajmniej tych samych właściwości funkcjonalnych jakie spełniają mieszanki mineralno-asfaltowe produkowane w technologii „na gorąco”.

Doktorantka zwraca jednak uwagę na zjawisko pogorszenia się właściwości wysokotemperaturowych mieszanek wytwarzanych metodą „na ciepło” (WMA) w okresie bezpośrednio po oddaniu nawierzchni do eksploatacji. Jest to spowodowane zmniejszoną intensywnością starzenia lepiszcza asfaltowego oraz zmniejszoną absorpcją lepiszcza asfaltowego przez kruszywo w wyniku obniżenia temperatur technologicznych w metodzie WMA. Skutkiem tego następuje obniżenie odporności mieszanki mineralno-asfaltowej na powstawanie lepkoplastycznych deformacji trwałych i obniżenie sztywności mieszanki, co z kolei spowodowane jest zmniejszeniem sztywności lepiszcza asfaltowego oraz występowaniem w początkowym okresie eksploatacji większej zawartości tzw. „wolnego” lepiszcza w mieszance mineralno-asfaltowej.

Należy stwierdzić, że Doktorantka prawidłowo zidentyfikowała i zdefiniowała problem badawczy. W wyniku przeprowadzonej analizy literatury oraz dotychczasowych doświadczeń własnych wytypowała dwa dodatki, które mogą poprawiać odporność na deformacje trwałe mieszanek mineralno-asfaltowych wytwarzanych w technologii WMA, a stosowane łącznie mogą, na zasadzie synergii, wpływać na poprawę również innych właściwości mieszanek. Pomimo wskazanych, na podstawie przeprowadzonego studium literatury, pozytywnych wyników badań asfaltów modyfikowanych dodatkami organosilanowymi oraz woskami polietylenowymi (poliolefinowymi), temat ten nie jest nadal w pełni rozpoznany, szczególnie w aspekcie stosowania tych dodatków łącznie. Mając to na uwadze, należy stwierdzić, że podjęty

w rozprawie problem naukowy, stanowiący cenną kontynuację krajowych badań i analiz nad technologią WMA, w tym technologią asfaltu spienionego, jest aktualny i wpisuje się w nowoczesne, światowe podejście do projektowania dróg, z uwzględnieniem zasad budownictwa niskoemisyjnego.

Rozważania podjęte w rozprawie doktorskiej były analizowane w kontekście jednego, jasno sformułowanego celu badawczego, tj. oceny wpływu zastosowania dwóch dodatków na właściwości asfaltu drogowego oraz asfaltu modyfikowanego polimerami. Cel zrealizowano poprzez analizę i ocenę wyników badań laboratoryjnych przeprowadzonych w Politechnice Świętokrzyskiej. Realizacja tego celu umożliwiła optymalizację składu lepiszczy asfaltowych w oparciu o wybrane ich właściwości.

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.

Doktorantka sformułowała dwie tezy badawcze:

- **Obecność organosilanowego dodatku WMA wpływa na efekty zastosowania dodatku poprawiającego właściwości wysokotemperaturowe (wosku polietylenowego), również w aspekcie starzenia technologicznego i eksploatacyjnego asfaltu drogowego 50/70 i modyfikowanego polimerami 45/80-55.**
- **Zastosowanie z asfaltem drogowym 50/70 oraz modyfikowanym polimerami 45/80-55 jednocześnie dodatku organosilanowego WMA i wosku polietylenowego powoduje w wyniku synergii ich oddziaływania, poprawę właściwości tych lepiszczy.**

Merytorycznie tezy są prawidłowe i zrozumiałe.

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 przedstawionego w pracy stanu wiedzy w zakresie efektów stosowania różnych dodatków WMA do asfaltów drogowych i mieszanek mineralno-asfaltowych, wybrany przez Autorkę temat, sformułowany cel, postawione tezy o charakterze badawczym oraz przyjęty zakres pracy należy uznać za poprawne i uzasadnione. Na podkreślenie zasługuje kompleksowe podejście Doktorantki do realizowanego zagadnienia w zakresie badań laboratoryjnych i analiz wyników badań z wykorzystaniem narzędzi statystycznych. Należy również stwierdzić, że założony cel i podjęta tematyka badawcza są aktualne i interesujące pod względem naukowym, zatem wybór tematu oraz jego przedstawienie w rozprawie doktorskiej uznaje 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 WMA i wosku polietylenowego na właściwości lepiszczy drogowych”.

4. Ocena rozprawy

4.1. Ogólna charakterystyka rozprawy

Opiniowana praca jest w formie książkowej i zawiera 201 stron. Zasadnicza część rozprawy składa się z 5 rozdziałów poprzedzonych spisem treści, wykazem skrótów używanych w rozprawie oraz streszczeniem w języku polskim i angielskim.

Po ostatnim rozdziale zawierającym wnioski końcowe znajduje się bibliografia, spis norm, załącznik zawierający szczegółowe wyniki badań, a następnie spis tabel i rysunków. Po wnioskach końcowych nie został przygotowany rozdział „Kierunki dalszych badań”, co zdaniem recenzenta, miałooby korzystny wpływ na wartość merytoryczną pracy. W poszczególnych rozdziałach zamieszczono 54 tabele oraz 82 rysunki. Dodatkowo, w załączniku umieszczono 34 tabele. Bibliografia składa się z 243 publikacji naukowych. Uwzględniając fakt, że jedna norma omyłkowo została umieszczona w wykazie bibliograficznym (pozycja [216]), należy uznać, że właściwa ilość powołanych publikacji powinna wynosić 242. Właściwy dobór bibliografii stanowi potwierdzenie wysokiej wartości merytorycznej części literaturowej rozprawy. 147 publikacji zostało opublikowanych w roku 2010 lub później, co potwierdza aktualność cytowanych źródeł. W przypadku 6 pozycji literaturowych nie podano roku publikacji. Doktorantka nie jest współautorką żadnej z prac naukowych znajdujących się w wykazie. Można byłoby oczekiwać przynajmniej jednej publikacji autorstwa lub współautorstwa Doktorantki, potwierdzającej niewątpliwie Jej duży wkład w analizowany w niniejszej rozprawie problem naukowy, tym bardziej, że Doktorantka jest współautorką publikacji z tej tematyki w czasopismach *Structure & Environment* (2019) oraz *Materials* (2023). Być może nowsza publikacja ukazała się już po wydaniu rozprawy doktorskiej. Wykaz literatury nie został uporządkowany alfabetycznie, według pierwszego autora, tylko zgodnie z kolejnością cytowania w tekście, co powoduje, że jest on mniej czytelny. W powołaniach normatywnych zamieszczono 19 norm. W przypadku jednak normy PN-EN 12594 przywołano ją dwukrotnie, pod numerami [N13] i [N18], błędnie podając jej tytuł w pozycji [N13]. Mając to na uwadze należy przyjąć, że spis powołań normatywnych składa się z 18 norm.

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. Recenzent zaleca, aby polskie określenie: „asfalt modyfikowany polimerem” było tłumaczone na język angielski jako: „polymer-modified bitumen”, a nie „polymer-modified asphalt”.

We wstępie (rozdział 1) Autorka krótko opisała problem naukowy i przedstawiła tematykę pracy doktorskiej. Ogólnie zarysowała zagadnienie produkcji mieszanek mineralno-asfaltowych w technologiach „na gorąco” (HMA), „na ciepło” (WMA) i „na półciepło” (HWMA) oraz odniosła się do problemu zmniejszenia zużycia energii oraz emisji szkodliwych substancji do atmosfery przez wprowadzanie nowoczesnych rozwiązań materiałowo-technologicznych w budownictwie drogowym. Doktorantka stwierdza, że wytworzenie mieszanki w technologii HMA jest procesem bardzo energochłonnym, podczas którego dochodzi do emisji szkodliwych gazów cieplarnianych, co w konsekwencji powoduje „ogromne straty dla środowiska”. Zdaniem recenzenta, tak jednoznaczne stwierdzenie powinno być potwierdzone odniesieniem do źródła literaturowego, w którym opisano na czym polegają „ogromne straty dla środowiska” spowodowane produkcją mieszanek mineralno-asfaltowych

w technologii „na gorąco”. Być może jednak stwierdzenie to miało się odnosić do globalnej (sumarycznej) emisji gazów cieplarnianych, której źródłem jest różnorodna działalność człowieka, w tym również np. produkcja cementu, odbywająca się w temperaturze prawie 10 razy wyższej niż produkcja mieszanek metodą HMA.

Następnie Doktorantka sformułowała dwie tezy o charakterze badawczym, określające zarazem cel i zakres rozprawy. Sformułowany w dalszej części rozdziału cel badawczy należy uznać za właściwy i uzasadniony. Rozdział zamyka opis zakresu badań, w którym wymieniono badania podstawowe oraz zaawansowane reologiczne badania dwóch rodzajów lepiszczy, mające na celu określenie ich właściwości funkcjonalnych i zmian składu chemicznego w aspekcie starzenia krótko- i długoterminowego. W części wymienionych badań następuje bezpośrednie przywołanie norm (np. PN-EN 1426), a w części tylko odwołanie do spisu norm (np. [N6]). Opis powinien być usystematyzowany w tym zakresie.

Ważną część zakresu pracy stanowi optymalizacja składu lepiszczy asfaltowych, o której nie wspomniano w tym rozdziale, ograniczając się jedynie do zagadnienia wpływu dwóch dodatków na właściwości analizowanych lepiszczy. Z tego względu opis zakresu pracy jest zbyt ogólny.

W rozdziale 2 (Przegląd literatury) ogólnie scharakteryzowano lepiszcza asfaltowe współcześnie stosowane w drogownictwie, dodatki polimerowe do tych lepiszczy oraz wybrane właściwości funkcjonalne lepiszczy i mieszanek mineralno-asfaltowych. Szerzej opisane zostało zagadnienie wpływu starzenia krótko- i długoterminowego na właściwości asfaltów oraz wybrane metody badań lepiszczy asfaltowych. W drugiej części rozdziału szczegółowo opisano technologie wytwarzania mieszanek mineralno-asfaltowych o obniżonych temperaturach technologicznych, począwszy od mieszanek wytwarzanych w technologii „na gorąco”, a skończywszy na mieszankach wytwarzanych „na zimno”. Szerzej opisano technologię WMA, zwracając ponownie uwagę na występujące problemy z właściwościami wysokotemperaturowymi.

W części rozdziału charakteryzującej dodatki stosowane w technologiach WMA wskazano na możliwość poprawy odporności na deformacje trwałe mieszanek mineralno-asfaltowych przez modyfikację asfaltu powszechnie stosowanymi dodatkami, takimi jak np. Sasobit, czy Licomont BS 100. Zwrócono natomiast uwagę na możliwe pogorszenie się właściwości niskotemperaturowych mieszanek mineralno-asfaltowych w technologii WMA po zastosowaniu wosków, które w niższych temperaturach użytkowych mogą usztywnić asfalt. Nasuwa się więc pytanie, dlaczego w celu eliminacji problemów związanych z właściwościami wysokotemperaturowymi nie można zastosować znanych i przetestowanych wcześniej dodatków, a skupić się np. na poprawie właściwości niskotemperaturowych? Recenzent, podtrzymując wyrażoną wcześniej opinię o słuszności postawionych tez, zwraca jednak uwagę, na konieczność odpowiedniego uzasadnienia podjętego problemu naukowego, w oparciu o studia literaturowe. Tego rodzaju uzasadnienie zostało jednak przedstawione w ostatniej części rozdziału. Również na początku rozdziału 3 Autorka stwierdza, że obecna literatura nie podaje ani jednego przykładu jednoczesnego połączenia wosku Titan z dodatkiem WMA Zycotherm, co dodatkowo uzasadnia potrzebę sprawdzenia wpływu ich ewentualnego współdziałania na właściwości asfaltu/mieszanki w technologii „na ciepło”.

W dalszej części rozdziału 2 szeroko opisano dwa przedmiotowe dodatki, tj. wosk polietylenowy o handlowej nazwie Titan 7205 oraz dodatek silanowy Zycotherm. Pierwszy

mający na celu poprawę urabialności mieszanki mineralno-asfaltowej w określonej temperaturze produkcji i zagęszczania. Na podstawie analizy literatury Doktorantka stwierdza, że dodatek wosku polietylenowego poprawia właściwości sprężyste lepiszcza, a szczególnie lepiszcza modyfikowanego polimerem SBS, co uzasadnia jego wybór jako dodatku poprawiającego właściwości wysokotemperaturowe lepiszczy w technologii WMA. Dodatek ten może jednak wpłynąć na niekorzystny wzrost temperatury łamliwości lepiszcza, skutkujący pojawieniem się spękań niskotemperaturowych. Mając to na uwadze należy stwierdzić, że uwzględnienie w planie badań oceny właściwości niskotemperaturowych lepiszczy (temperatura łamliwości wg Fraassa oraz sztywność pełzania w reometrze zginanej belki BBR) są w pełni uzasadnione. Ważnym stwierdzeniem potwierdzającym słuszność wyboru tego dodatku jest wniosek mówiący o tym, że wosk polietylenowy powoduje zmianę typu lepiszcza, formując go w substancję typu żel, co obniża wrażliwość temperaturową asfaltu w zakresie temperatur użytkowych. Zdaniem recenzenta, szczegółowa charakterystyka dodatków znajdująca się w załącznikach (tab. Z.1. i Z.2.) powinna być umieszczona w rozdziale 2, w części opisującej te dodatki.

W ostatniej części rozdziału 2 dość ogólnie opisano wpływ technologii WMA na właściwości mieszanek mineralno-asfaltowych. Mając na uwadze, że fragment ten stanowi potwierdzenie zasadności wyboru problemu naukowego, można byłoby oczekiwać przedstawienia bardziej obszernych i szczegółowych wyników badań, które w jednoznaczny sposób wykazują pogorszenie się właściwości wysokotemperaturowych mieszanek mineralno-asfaltowych w technologii WMA. Doktorantka powołuje się na kilka publikacji, które analizują wpływ stosowania obniżonej temperatury wytwarzania mieszanek i zastosowania spieniania lepiszcza lub płynnych dodatków na zmniejszenie sztywności lepiszczy, w konsekwencji zmniejszenia stopnia ich starzenia technologicznego i eksploatacyjnego, w porównaniu z technologią „na gorąco”. Zdaniem recenzenta, opis wniosków z tych prac mógłby być poprzedzony konkretnymi wynikami badań, wraz z ich oceną.

Pomimo sformułowania pewnych uwag krytycznych, należy stwierdzić, że rozdział 2 stanowi prawidłowe wprowadzenie do zagadnień analizowanych w dalszej części rozprawy, a problem naukowy oraz powód wyboru do badań dwóch dodatków związanych z technologią WMA, są właściwie uzasadnione.

W rozdziale 3 (Plan i metodyka badań) Doktorantka szczegółowo przedstawiła plan badań oraz badane materiały, w tym kombinacje użytych dodatków o różnych zawartościach, z uwzględnieniem procesów starzeniowych. Należy stwierdzić, że prawidłowo przyjęto zakres dozowania dodatków, wykraczający poza zakres zalecany przez ich producentów. Wyjaśnienia wymaga kwestia przyjętego kroku dozowania dodatków. Przy założeniu, że krok dozowania dodatku Titan wynosi 0,5%, a dodatku Zycotherm 0,075%, czy nie należało przyjąć również pominiętej zawartości odpowiednio: 1,5% dodatku Titan i 0,225% dodatku Zycotherm? Na uwagę zasługuje kompleksowe podejście przez Doktorantkę do zagadnienia oceny wpływu starzenia technologicznego lepiszczy, przyjmując zróżnicowane temperatury badania metodą RTFOT – po 3 temperatury na każdy rodzaj lepiszcza asfaltowego.

W rozdziale 3 w prawidłowy sposób opisano metodykę badań, z uwzględnieniem ogólnej charakterystyki metod statystycznych zastosowanych w pracy do analizy wyników badań.

W rozdziale 4 (Wyniki badań) Doktorantka przeprowadziła badania, a następnie opracowała i przeanalizowała wyniki badań zgodnie z planem badań przedstawionym w rozdziale 3. Tę kluczową część pracy można podzielić na kilka części. Pierwsza część dotyczy oceny wpływu stosowanych dwóch rodzajów dodatków na podstawowe właściwości lepiszczy asfaltowych, tj. penetracji w 25°C, temperatury mięknięcia wg PiK, temperatury łamliwości wg Fraassa oraz lepkości dynamicznej w 3 temperaturach. W celu wykazania istotności statystycznej wpływu ilości wosku poliolefinowego i dodatku organosilanowego na zmianę poszczególnych właściwości lepiszczy, przeprowadzono wieloczynnikową analizę wariancji (ANOVA). Na podstawie analizy wyników badań stwierdzono, że dodatek wosku polietylenowego (Titan) istotnie zmniejszył penetrację asfaltu 50/70 i polimeroasfaltu 45/80-55, co jest wynikiem korzystnym ze względu na właściwości wysokotemperaturowe. Dozowanie obydwu dodatków w różnych zawartościach i kombinacjach skutkowało podwyższeniem temperatury mięknięcia lepiszczy, zmieniając ich konsystencję na mniej plastyczną. Zastosowanie dwóch dodatków równocześnie powoduje jednak niekorzystny wzrost temperatury łamliwości asfaltu drogowego 50/70, a w przypadku polimeroasfaltu wzrost temperatury łamliwości był spowodowany obecnością dodatku organosilanowego WMA (Zycotherm).

Ważnym parametrem reologicznym będącym miarą właściwości wysokotemperaturowych lepiszczy asfaltowych jest wyrażenie $G^*/\sin(\delta)$ wyznaczony na podstawie zespolonego modułu ścinania i kąta przesunięcia fazowego określonych w badaniu reometrem DSR. Parametr pozwala na wyznaczenie górnej temperatury krytycznej UCT (Upper Critical Temperature), zgodnie z metodyką SHRP/SUPERPAVE. Korzystnie najwyższe wartości parametru $G^*/\sin(\delta)$ wykazało lepiszcze 50/70 przed i po starzeniu RTFOT przy dozowaniu osobno 0,3% dodatku organosilanu oraz 2% dodatku wosku poliolefinowego. W przypadku polimeroasfaltu 45/80-55, przed i po starzeniu RTFOT, najwyższy wzrost wartości parametru $G^*/\sin(\delta)$ zanotowano pod dodaniem 0,3% organosilanu. Obydwa dodatki stosowane osobno lub w kombinacjach wpływają jednak istotnie na zmianę wyrażenia $G^*/\sin(\delta)$.

Analizując zmiany górnego rodzaju funkcjonalnego PG (w tym temperatury krytycznej UCT) zauważono, że w przypadku obydwu analizowanych lepiszczy, zarówno przed, jak i po starzeniu RTFOT, indywidualny dodatek organosilanu nie powoduje zmiany PG. Dopiero dozuując dodatek wosku polietylenowego, indywidualnie lub w kombinacji z dodatkiem organosilanu, następuje zmiana górnego PG.

Na podstawie badań trwałości zmęczeniowej lepiszczy metodą liniowego zwiększania amplitudy LAS (Linear Amplitude Sweep), przy różnych wartościach odkształcenia, Doktorantka wykazała, w przypadku analizowanych lepiszczy, istotność statystyczną efektów głównych związanych z zawartością obydwu modyfikatorów. Bardzo korzystne wyniki uzyskano przy kombinacji modyfikatorów. Na podstawie analizy wyników badań funkcjonalnych metodą cyklicznego pełzania z odprężeniem MSCR lepiszczy poddanych kompleksowemu procesowi starzenia krótkoterminowego RTFOT w różnych temperaturach, Doktorantka potwierdziła, że w przypadku asfaltu 50/70 najkorzystniejszą kombinacją obu dodatków jest stosunek 0,075% organosilanu i 1% wosku poliolefinowego, a w przypadku lepiszcza 45/80-55 najkorzystniejsze wyniki wykazały aż 3 kombinacje tych dodatków. Badanie to jest bardzo ważne ze względu na analizowany problem naukowy, tj. poprawę odporności lepiszczy na deformacje trwałe. Zdaniem recenzenta w analizie wyników badań nie wykorzystano w pełni potencjału, który zawarty jest w sekwencyjnej symulacji starzenia

krótkoterminowego w różnych temperaturach. Duża ilość otrzymanych wyników badań została dodatkowo zinterpretowana w części optymalizacyjnej rozprawy.

Badania modułu sztywności pełzania S oraz parametru $-m$ zmiany sztywności pełzania w reometrze zginanej belki BBR należy uznać za ważną i cenną część programu badań, ze względu na sygnalizowaną w części literaturowej możliwość pogorszenia właściwości niskotemperaturowych lepiszczy z dodatkami stosowanymi w technologii WMA. Ogólnie można stwierdzić, że analizowane lepiszcza po starzeniu eksploatacyjnym RTFOT+PAV zawierające różne zawartości organosilanu i wosku poliolefinowego wykazały brak lub niewielkie pogorszenie właściwości niskotemperaturowych (dolnej temperatury krytycznej) i w większym stopniu pogorszenie to dotyczy asfaltu drogowego 50/70. Nie wystąpiło pogorszenie tych właściwości w przypadku polimeroasfaltu zawierającego różne kombinacje obydwu dodatków. Wnioski te mogłyby być dodatkowo poparte przez wyznaczenie dolnego rodzaju funkcjonalnego PG lepiszczy.

Ważną częścią rozprawy jest oznaczenie struktury związków chemicznych występujących w analizowanych lepiszczach, w dodatkach organosilanu i wosku polietylenowego oraz w lepiszczach modyfikowanych tymi dodatkami, na podstawie spektroskopowej analizy widm tych związków metodą FT-IR. Wykazano istotność statystyczną wpływu obu dodatków na wartości indeksów karbonylowego i sulfotlenkowego lepiszczy, z uwzględnieniem procesów starzenia krótko- i długoterminowego. W podsumowaniu badań Doktorantka jednak stwierdziła, że przeprowadzone analizy poszczególnych parametrów nie dają jednoznacznych wyników. Natomiast większe wartości indeksów karbonylowych i sulfotlenkowych powinny skutkować zwiększoną sztywnością lepiszczy w wysokiej i niskiej temperaturze, ale nie jest to zawsze zauważalne. Oznacza to, że analiza spektroskopowa struktury chemicznej lepiszczy modyfikowanych niestety nie pozwoliła na wyjaśnienie przyczyn, stwierdzonych na wcześniejszym etapie badań, zależności.

Ostatnią, bardzo cenną część rozdziału 4 stanowi optymalizacja składu lepiszczy asfaltowych. W celu określono zawartości dodatków organosilanowego i wosku polietylenowego, która będzie skutkowała najbardziej korzystnymi właściwościami funkcjonalnymi obu lepiszczy, przeprowadzono wielowymiarową optymalizację z wykorzystaniem funkcji użyteczności cząstkowej. Należy stwierdzić, że prawidłowo wybrano parametry do optymalizacji, nie ograniczając ich jedynie do właściwości wysokotemperaturowych. Przyjęcie jednakowych wag tych parametrów, jako mających taki sam wkład w rezultat obliczeń, jest również właściwe. Za najważniejszy wniosek z części optymalizacyjnej wyników badań, sformułowany przez Doktorantkę, należy uznać stwierdzenie, że dla lepiszcza 50/70 optymalną zawartością dodatków okazała się kombinacja 0,075% organosilanu + 1% wosku polietylenowego, a dla lepiszcza 45/80-55 kombinacja dodatków 0,15% organosilanu + 2% wosku poliolefinowego. Przy tych rodzajach modyfikacji lepiszczy otrzymano najwyższe wartości użyteczności (DI). Jest to bardzo ważny wniosek, który w przyszłości powinien zostać ostatecznie potwierdzony w badaniach właściwości mieszanek mineralno-asfaltowych produkowanych w technologii WMA, jako kontynuacja prac badawczych.

W rozdziale 5 (Wnioski końcowe) uzasadniając postawione we wstępie rozprawy tezy, Doktorantka sformułowała 7 wniosków ogólnych oraz 8 wniosków szczegółowych.

Sformułowanie wniosków ogólnych zapewnia przejrzystość rozdziału i pozwala łatwo zorientować się w podsumowaniu tak obszernego zakresu badań.

W ramach pierwszego wniosku ogólnego Doktorantka stwierdziła: „obecność organosilanowego dodatku WMA wpływa na efekty zastosowania dodatku poprawiającego właściwości wysokotemperaturowe”. Ten ważny wniosek odnosi się bezpośrednio do pierwszej tezy, nie nawiązując jednak do zawartego w niej aspektu starzenia. Zagadnienie starzenia zostało ujęte we wniosku piątym.

Należy zaznaczyć, że dopiero w szóstym i siódmym wniosku pojawia się informacja o korzystnym wpływie wykazanych efektów na właściwości analizowanych lepiszczy.

Szósty wniosek, który brzmi: „charakter obserwowanych zmian właściwości lepiszczy asfaltowych był zależny od dozowania obu dodatków i w wielu przypadkach pozwalał uzyskać właściwości bardziej pożądane niż w przypadku lepiszczy bazowych” stanowi zasadniczo potwierdzenie drugiej tezy, choć jest to wniosek bardzo ogólny.

Należy jednak stwierdzić, że wnioski ogólne są sformułowane poprawnie i rozpatrywane łącznie stanowią potwierdzenie obydwu tez.

Zdaniem recenzenta wnioski mogłyby w większym stopniu odnosić się do problemu naukowego sformułowanego kilkakrotnie w rozprawie, dotyczącego pogorszenia się właściwości wysokotemperaturowych mieszanek mineralno-asfaltowych, po zastosowaniu niektórych dodatków WMA, w okresie bezpośrednio po oddaniu nawierzchni do eksploatacji. Takie odniesienia, choć nie bezpośrednio, znajdują się we wnioskach szczegółowych, np. we wniosku drugim i trzecim. Za bardzo ważny należy uznać ostatni wniosek szczegółowy, który dotyczy zoptymalizowanej zawartości dodatków w obu lepiszczach. Wniosek ten ma duży potencjał praktyczny.

Pomimo pewnych uwag krytycznych należy stwierdzić, że wszystkie wnioski są poprawne i zostały sformułowane na podstawie przeprowadzonych przez Doktorantkę interesujących i oryginalnych badań.

Brak opracowania akapitu/podrozdziału dotyczącego kierunków dalszych badań sugeruje, że problem badawczy został rozwiązany, z czym trudno się zgodzić. Naturalną kontynuację stanowiłoby badanie wpływu zastosowania lepiszczy z dodatkami o zoptymalizowanych zawartościach, na właściwości mieszanek mineralno-asfaltowych w technologii „na ciepło”, szczególnie w kontekście odporności na lepkoplastyczne deformacje trwałe.

4.2. Struktura, język i redakcja rozprawy

Struktura rozprawy jest prawidłowa. Praca napisana jest dość poprawnym i przejrzystym językiem, bez stosowania skrótów myślowych. Występują jedynie pojedyncze drobne błędy redakcyjne i stylistyczne.

Poniżej przedstawiono dwa ich przykłady:

- zdanie na str. 11: „Początek szerokiego zainteresowania na świecie technologią na ciepło WMA uznaje się około 20 lat temu, kiedy opublikowano raporty badawcze Prowella i Hurleya [13].”
- zdanie na str. 21: „Cykliczna próba pełzania z odprężeniem (MSCR) jest badaniem opisującym wysokotemperaturowe właściwości asfaltów i służy do określania właściwości wysokotemperaturowych lepiszcza w zakresie wysokich temperatur eksploatacji nawierzchni.”

4.3. Uwagi i pytania recenzenta do pracy

Po zapoznaniu się z treścią poszczególnych rozdziałów zostały zgłoszone następujące uwagi krytyczne:

- w różnych miejscach rozprawy, np. w Streszczeniu oraz na str. 13, 29, 51, 52, reometr DSR jest określany mianem: „reometr bezpośredniego ścinania”; recenzent zaleca stosowanie nomenklatury normowej, stosowanej również w wielu publikacjach, pochodzącej z tłumaczenia wersji angielskiej: „Dynamic Shear Rheometer” – „reometr dynamicznego ścinania”; skrót ten prawidłowo został opisany w „Wykazie skrótów używanych w rozprawie”;
- str. 30 wiersz 7 od dołu – w równaniu wykresu przedstawiającego zależność procentowego odkształcenia sprężystego od nieodwracalnej części modułu podatności błędnie opisano krzywą przedstawioną na rys. 2.5. – jest: $y=29,317 \cdot x^{0,2633}$, powinno być: $=29,371 \cdot x^{-0,2633}$;
- str. 32 w punkcie pt. „Test liniowego zwiększania amplitudy – LAS” metoda LAS nazywana jest również „testem liniowego przemiatania amplitudą – LAS” – zdaniem recenzenta powinna być stosowana nazwa zgodna z nomenklaturą branżową, tj. jak podano w tytule punktu;
- str. 32 wzór (2.8) zbyt ogólnie opisano parametry A i B wzoru trwałości zmęczeniowej lepiszcza (N_f), nie podając opisujących ich równań; objaśniając parametr A błędnie opisano: „obliczane wg równania na podstawie: częstotliwości, poziomu zmęczenia w chwili zmęczenie próbki...” - powinno być: „... w chwili zniszczenia próbki...”; opisując parametr B nieprecyzyjnie opisano: „obliczane wg równania na podstawie: częstotliwości – moduły ścinania” – powinno być: „...nachylenia wykresu częstotliwość-moduł ścinania”;
- str. 43 wiersz 9 od dołu – jest: „Zauważono również, że spada temperatura łamliwości, wynik ten pokazuje, że lepiszcze z tym dodatkiem jest podatne na spękania niskotemperaturowe.”; powinno być: „Zauważono również, że wzrasta temperatura łamliwości,”;
- str. 45 pierwsze zdanie – jest: „... z wykorzystaniem metody adhezji lepiszcza.” - nie podano nazwy tej metody;
- str. 53 pierwsze zdanie podrozdziału 3.2. – nieprawidłowo przywołano normę PN-EN 12594 jak dokument zawierający załącznik krajowy NA określający wymagania dla asfaltów drogowych – powinna być powołana norma PN-EN 12591 [N12];
- str. 84 pierwszy wiersz od góry – jest: „W odniesieniu do temperatury łamliwości ...”, powinno być: „W odniesieniu do trwałości zmęczeniowej ...”;
- str. 128 pierwsze zdanie podrozdziału 4.6.1. – jest: „W poniższym rozdziale oceniono skutki starzenia laboratoryjnego i eksploatacyjnego (...) przy użyciu stłumionego całkowitego współczynnika odbicia ...”; powinno być: „... starzenia technologicznego i eksploatacyjnego (...) przy użyciu osłabionego całkowitego współczynnika odbicia ...”;
- str. 133/134 – zdanie: „Na wykresach (rys. 4.51) przedstawiono lepiszcza 50/70 i 45/80-55: niepoddane procesowi starzenia ...”; powinno być: „Na wykresie (rys. 4.51) przedstawiono lepiszcza 50/70: niepoddane procesowi starzenia ...”.

Na przedstawione poniżej kwestie recenzent oczekuje odpowiedzi.

- 1) Recenzent prosi o wyjaśnienie dlaczego dodatek organosilanu stosowany indywidualnie, z jednej strony powoduje największy wzrost parametru $G^*/\sin(\delta)$, a z drugiej strony, nie wpływa na zmianę górnego rodzaju funkcjonalnego PG lepiszczy?

- 2) W publikacjach dotyczących stosowania procedury LAS (np. Wesołowska M., Ryś D., Roads and Bridges - Drogi i Mosty 17 (2018) 317 - 336) wskazuje się, że dokładniejszą ocenę jakości asfaltu można otrzymać na podstawie analizy wyników badania trwałości zmęczeniowej uwzględniającego kilka różnych wartości temperatury (np. z zakresu 10-30°C), niż na podstawie badania lepiszcza przeprowadzonego w jednej temperaturze. Wykazano, że przebieg zmian trwałości zmęczeniowej lepiszczy w zależności od temperatury badania wskazuje korzystne właściwości modyfikacji asfaltów (w tym również asfaltów 50/70 i 45/80-55) na poprawę trwałości zmęczeniowej w wyższych temperaturach (20-30°C). W niższych temperaturach badania – bliskich temperaturze ekwiwalentnej, przyjmowanej do projektowania nawierzchni w Polsce z przedziału między 10-15°C, trwałość zmęczeniowa lepiszczy jest najniższa, a wpływ modyfikacji na poprawę trwałości mniejszy. Czy mając na uwadze powyższe, nie byłoby uzasadnione przeprowadzenie badań według procedury LAS w kilku temperaturach, a nie tylko w jednej temperaturze 15°C?
- 3) Str. 44, zdanie nad rys. 2.10.: „Temperatura technologiczna podczas produkcji asfaltu wynosi od 150°C do 230°C w zależności od rodzaju lepiszcza i mieszanki mineralno-asfaltowej, natomiast po dodaniu dodatku Zycotherm temperaturę tą można zmniejszyć o około 20°C [177].” Jaki proces technologiczny Doktorantka ma na myśli pisząc o „temperaturze technologicznej podczas produkcji asfaltu”?
- 4) Str. 45, wiersz 13 od dołu – niezrozumiałe zdanie: „Sformułowano następujące wnioski, że dozowanie Zycotherm powoduje, że wartości stabilności mieszanek Marshalla.” Proszę o prawidłowe sformułowanie tego zdania.
- 5) Str. 47, wiersz 2 od góry – zdanie: „W przypadku badania koleinowania TSR zauważono...” – na czym polega badanie koleinowania tą metodą?
- 6) Str. 50, wiersz 12 od góry – zdanie: „Obecna literatura nie podaje ani jednego przykładu jednoczesnego połączenia wosku Titan z dodatkiem WMA Zycotherm, a jednocześnie zastosowanie dodatku WMA i wosku poliolefinowego istotnie wpływa na właściwości lepiszczy asfaltowych.” Na jakiej podstawie sformułowano na tym etapie rozprawy stwierdzenie o istotności działania łącznego obydwu dodatków, przy założeniu, że źródła literaturowe nic o tym nie mówią?
- 7) W rozprawie używana jest nazwa metody badania MSCR jako: „badanie wielokrotnego pełzania i nawrotu”. Czy rozwinięcie tłumaczenia nazwy metody MSCR nie powinno jednak brzmieć zgodnie z terminologią stosowaną w normie PN-EN 16659 oraz publikacji, np. Król J., Matraszek K.: „Właściwości wysokotemperaturowe lepiszczy asfaltowych w badaniu cyklicznego pełzania z odprężeniem (MSCR)”, opublikowanej w miesięczniku Drogownictwo 10/2012? Podobnie parametr R, określany w rozprawie mianem „nawrót sprężysty”, czy nie powinien być określany, zgodnie z w/w źródłem, jako „średnie procentowe odkształcenie sprężyste”?
- 8) Analizę wyników badań ograniczono do opisu istotności wpływu poszczególnych czynników na właściwości lepiszczy, oraz wskazania rodzajów modyfikacji, w przypadku których otrzymano najbardziej korzystne wyniki badań. W znacznie mniejszym stopniu podejmowano próby wyjaśnienia wykazanych zjawisk, szczególnie synergii obydwu dodatków, odwołując się do składu chemicznego modyfikatorów i składu grupowego lepiszczy bazowych, w kontekście procesów starzeniowych oraz metody produkcji WMA. Recenzent prosi o ustosunkowanie się Doktorantki do tej kwestii.
- 9) Na str. 132, w drugim zdaniu od góry Doktorantka stwierdziła: „Natomiast dodatek B powodował wzrost indeksu karbonylowego powodując niekorzystny efekt.” Proszę o wyjaśnienie o jaki efekt chodzi?

- 10) W podsumowaniu badań spektroskopowych FT-IR lepiszczy i dodatków Doktorantka stwierdziła, że przeprowadzone analizy poszczególnych parametrów nie dają jednoznacznych wyników. Natomiast większe wartości indeksów karbonylowych i sulfotlenkowych powinny skutkować zwiększoną sztywnością lepiszczy w wysokiej i niskiej temperaturze, ale nie jest to zawsze zauważalne. Zdaniem recenzenta, korzystnym byłoby dodatkowe wyjaśnienie, czy istnieje zauważalny związek pomiędzy stwierdzonymi na wcześniejszym etapie badań zależnościami, a zależnościami wykazanymi w badaniu spektroskopowym? Recenzent prosi o takie uszczegółowienie wniosków.
- 11) Przeprowadzone w pracy analizy wyników badań oraz wnioski końcowe nie odnoszą się do spodziewanych właściwości mieszanek mineralno-asfaltowych w technologii WMA, zawierających lepiszcza z optymalną zawartością dodatku organosilanowego oraz wosku polietylenowego, ograniczając się jedynie do opisu zmian właściwości lepiszczy. Czy zdaniem Doktorantki, takie nawiązania nie nadawałyby pracy charakteru bardziej aplikacyjnego?
- 12) Zdaniem recenzenta, wnioski końcowe nie określają jednoznacznie w jakim stopniu został rozwiązany sformułowany na wstępie problem naukowy. Brak części opisującej kierunki dalszych badań sugeruje, że problem ten został rozwiązany całkowicie i nie wymaga ich kontynuowania. Recenzent prosi o odniesienie się Doktorantki do tego zagadnienia.

5. Wniosek końcowy

Pani mgr inż. Joanna Bartos przeprowadziła samodzielne badania w zakresie analizowanego zagadnienia, zarówno na etapie realizacji części teoretycznej, jak i analitycznej. Posługując się przyjętą metodyką badawczą zrealizowała założony program badań, osiągnęła zakładane cele i ostatecznie udowodniła postawione tezy, wykazując umiejętność samodzielnego prowadzenia pracy naukowej i formułowania wniosków. Opiniowaną pracę oceniam wysoko. Dotyczy to zarówno jej strony naukowej jak i formalnej, które nie budzą większych zastrzeżeń. Rezultaty pracy, oprócz wartości naukowej mają też znaczny potencjał praktyczny i aplikacyjny. Dodatkowo należy podkreślić duży nakład pracy Autorki 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 cele zostały osiągnięte i wyrażam przekonanie, że rozprawa doktorska mgr inż. Joanny Bartos, pt.: „**Wpływ dodatku WMA i wosku syntetycznego na właściwości lepiszczy drogowych**” spełnia wszystkie warunki oraz wymagania stawiane pracom doktorskim określone w art. 13 ust. 1 ustawy z dnia 14 marca 2003 r. o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki, stanowiąc oryginalne rozwiązanie problemu naukowego. W związku z tym, stawiam wniosek o dopuszczenie rozprawy doktorskiej mgr inż. Joanny Bartos do publicznej obrony w dyscyplinie inżynieria lądowa, geodezja i transport.

Michał Sarnowski

Recenzja przygotowana zgodnie z wymogami

DYREKTOR NAUKOWY DYSCYPLINY
Inżynieria Lądowa, Geodezja i Transport

prof. dr hab. inż. Jerzy Wawrzeńczyk