

Dr hab. inż. Paweł Mieczkowski, prof. ZUT
Katedra Inżynierii Budowlanej i Komunikacyjnej
Wydział Budownictwa i Inżynierii Środowiska
Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny w Szczecinie

Tel. (91) 449 40 36
e-mail: pawel.mieczkowski@zut.edu.pl

Szczecin, 30 kwietnia 2025 r.

OPINIA

na temat rozprawy doktorskiej mgr inż. Karoliny Janus
pt. „**Optymalizacja składu betonu asfaltowego wytwarzanego w obniżonych temperaturach w technologii asfaltu spienionego ze zbrojeniem rozproszonym w aspekcie właściwości wysokotemperaturowych**”

wykonanej pod kierunkiem:

dr hab. inż. Anny Chomicz-Kowalskiej, prof. PŚk – promotora

dr. inż. Mateusza Marka Iwańskiego – promotora pomocniczego.

1. Podstawa opracowania recenzji

Podstawą formalną do wykonania recenzji rozprawy doktorskiej jest pismo Dyrektora Naukowego Dyscypliny Inżynieria Lądowa, Geodezja i Transport Politechniki Świętokrzyskiej, Pana prof. dr hab. inż. Jerzego Wawrzeńczyka z dnia 24.02.2025 r.

Prawną podstawę opracowania recenzji stanowią obowiązujące przepisy Ustawy z dnia 3 lipca 2018 r. Przepisy wprowadzające ustawę – Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz. U. poz. 1669) art. 14 ust. 1 pkt. 1, ust. 2 pkt 2 ustawy z dnia 14 marca 2003 r. o stopniach i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki (Dz. U. Nr 65, poz. 595, z późn. zm.) oraz Rozporządzenie Ministra Nauki i Szkolnictwa Wyższego z dnia 19 stycznia 2018 r. w sprawie szczegółowego trybu i warunków przeprowadzenia czynności w przewodzie doktorskim, w postępowaniu habilitacyjnym oraz w postępowaniu o nadanie tytułu profesora (Dz. U. z 2018 r. poz. 261).

Podstawę merytoryczną opracowania recenzji stanowi praca doktorska Pani mgr inż. Karoliny Janus pt. „**Optymalizacja składu betonu asfaltowego wytwarzanego w obniżonych temperaturach w technologii asfaltu spienionego ze zbrojeniem rozproszonym w aspekcie właściwości wysokotemperaturowych**”.

2. Podstawowe informacje o Doktorantce

Doktorantka, Karolina Janus, rozpoczęła w 2014 r. studia stacjonarne na Wydziale Budownictwa i Architektury Politechniki Świętokrzyskiej na kierunku Budownictwo. Tytuł inżyniera w specjalności

budownictwo ogólne uzyskała w 2018 r. W tym samym roku rozpoczęła kształcenie na studiach II stopnia, na kierunku Budowa Dróg, a stopień magistra (z wyróżnieniem) zdobyła w lipcu 2019 roku. Jesienią 2019 roku została przyjęta do Szkoły Doktorskiej Politechniki Świętokrzyskiej, w dyscyplinie Inżynieria Lądowa, Geodezja i Transport, którą ukończyła w 2024 r.

W czasie kształcenia w Szkole Doktorskiej Doktorantka dwukrotnie została laureatką konkursu Student-Wynalazca (2022-2023 r.). Na Międzynarodowej Wystawie Wynalazków w Genewie otrzymała srebrny (2022 r.) i brązowy (2023 r.) medal oraz nagrodę specjalną Uniwersytetu Króla Abdulaziza. Prezentowane przez Doktorantkę rozwiązania patentowe nagrodzono na Międzynarodowej Wystawie Wynalazków w Warszawie złotymi medalami (2022-2023 r.), a w 2024 roku otrzymała medal srebrny. W 2024 roku została również wyróżniona nagrodą Marszałka Województwa Świętokrzyskiego oraz uzyskała 2 brązowe medale na Wystawie Wynalazków w Norymberdze oraz Chorwacji.

Doktorantka brała czynny udział w 3 projektach badawczych NCBiR: Techmatstrateg, Techmatstrateg II oraz LIDER XIII oraz pracach zleconych na rzecz Katedry Inżynierii Komunikacyjnej.

W czasie kształcenia w Szkole Doktorskiej doktorantka była współautorem 6 publikacji naukowych, 3 zgłoszeń patentowych oraz współautorem przyznanego patentu w Urzędzie Patentowym Rzeczypospolitej Polskiej (2022 r.).

Doktorantka jest współautorem publikacji w renomowanych czasopismach, prezentowała Swoje osiągnięcia na konferencjach naukowo-technicznych. Do najważniejszych publikacji można zaliczyć:

- a) Chomicz-Kowalska A., Maciejewski K., Iwański M., Janus K.: Effects of zeolites and hydrated lime on volumetrics and moisture resistance of foamed warm mix asphalt concrete. *Bulletin of the polish academy of sciences*, 2021
- b) Janus K., Iwański M., Chomicz-Kowalska A., Durlej M., Maciejewski K.: Laboratory research on the effect of water foaming technology on basic properties and foamability of paving grade bitumen 50/70 and polymer modified bitumens (45/80-55, 45/80-80). *AIP Conference Proceedings Volume 2928*, 2023
- c) Durlej M., Iwański M., Janus K., Maciejewski K.: Evaluation of air void content in asphalt concrete with using water displacement methods and computed tomography . *AIP Conference Proceedings Volume 2928*, 2023
- d) Iwański M., Chomicz-Kowalska A., Maciejewski K., Janus K., Radziszewski P., Liphardt A., Michalec M., Góral K.: Stiffness Evaluation of Laboratory and Plant Produced Foamed Bitumen Warm Asphalt Mixtures with Fiber Reinforcement and Bio-Flux Additive. *Materials*, 2023
- e) Ramiączek P., Cielibała M., Skrzyniarz N., Janus K., Maciejewski K., Iwański M., Chomicz-Kowalska A.: Influence of the type of recycled asphalt pavement on the properties of the sma jena 16 stone mastic asphalt mixture. *Roads and Bridges – Drogi I Mosty*, 2023
- f) Iwański M., Durlej M., Janus K., Horodecka R.: The effect of synthetic wax and surface-active agent on the aging and low-temperature properties of 50/70 bitumen before and after foaming. *Roads and Bridges – Drogi I Mosty*, 2024.

3. Ocena rozprawy

3.1. Ogólna charakterystyka rozprawy

Przedstawiona do recenzji rozprawa doktorska ma charakter pracy badawczo-analitycznej. Została przedstawiona w formie papierowej na 255 stronach formatu A4. Składa się ze spisu treści, wykazu skrótów, wstępu, przeglądu literatury, celu, zakresu i tez pracy, części badawczej zakończonej wnioskami i planem dalszych prac, wykazu norm, bibliografii oraz streszczenia w j. polskim

i j. angielskim. Bibliografia łącznie ze spisem norm obejmuje 246 pozycji, w znaczącej części anglojęzycznych.

Opiniowana rozprawa dotyczy możliwości zastosowania w mieszankach mineralno-asfaltowych wytwarzanych w technologii WMA z asfaltem spienionym dodatku zbrojenia rozproszonego w postaci włókien aramidowych (AR) lub polimerowo-bazaltowych (P-B). Ma to na celu poprawę właściwości funkcjonalnych mieszanek WMA, szczególnie w zakresie wysokich temperatur. Jego zastosowanie powinno skutkować ograniczeniem podatności na deformacje trwałe oraz umożliwić, poprzez wzrost sztywności mieszanek, lepszy rozkład naprężeń (wywołanych obciążeniem od pojazdów samochodowych) na podłożu gruntowe. Doktorantka w sposób syntetyczny przedstawiła w części wprowadzającej stan wiedzy z zakresu spieniania lepiszczy asfaltowych, mieszanek wytwarzanych na ciepło oraz doświadczeń ze stosowania zbrojenia rozproszonego w mieszankach mineralno-asfaltowych. Przegląd literatury z zakresu oceny wpływu dodatków w postaci włókien do mieszanek mineralno-asfaltowych na ich właściwości wskazuje, że wyniki badań nie są jednoznaczne. Takim przykładem mogą być wyniki trwałości zmęczeniowej mieszanek z włóknami aramidowymi, które wskazują u jednych badaczy na spadek trwałości zmęczeniowej wraz ze wzrostem poziomu odkształceń (pozycja literatury [200]), natomiast u innych zgoda odmienna (pozycja literatury [204]).

W części badawczo-analitycznej zawarto informacje dotyczące planu badań. W jego zakresie były badania trzech lepiszczy asfaltowych (50/70, PmB 45/80-55, HiMA 45/80-80) oraz ocena ich charakterystyk spieniania, podstawowe badania zaprojektowanej mieszanki typu AC 11 S na warstwę ścieralną na ruch KR5-6 (zgodnie z WT-2:2014 – część I) oraz badania zaawansowane, ukierunkowane na właściwości wysokotemperaturowe mieszanek. Na podstawie uzyskanych wyników Doktorantka przeprowadziła proces optymalizacji składu i na jego podstawie określiła rodzaj i ilość zbrojenia rozproszonego w zależności od rodzaju zastosowanego lepiszcza oraz technologii wytwarzania (HMA, WMA). Pracę kończy podsumowanie wyników badań oraz wnioski końcowe.

Mogę stwierdzić, że podjęta tematyka badawcza jest aktualna i interesująca pod względem naukowym. Ważny jest również aspekt praktyczny poruszanych zagadnień (wynikający m.in. z aspektów środowiskowych), zatem wybór tematyki i jej przedstawienie w rozprawie doktorskiej uznaję za merytorycznie uzasadnione.

Rozdział 1 – Wstęp

Rozdział składa się z 2 stron maszynopisu. Wskazano w nim potrzebę ukierunkowania technologii drogowych na aspekty ochrony środowiska naturalnego. Jednym z działań mogą być mieszanki mineralno-asfaltowe wytwarzane na ciepło w technologii Warm Mix Asphalt (WMA), przy czym wymagają one poprawy cech wytrzymałościowych, np. poprzez zastosowanie zbrojenia rozproszonego.

Rozdział 2 – Przegląd literatury

Rozdział składa się z pięciu podrozdziałów głównych i został przedstawiony na 51 stronach maszynopisu. Poświęcono go analizie aktualnej wiedzy z zakresu mieszanek mineralno-asfaltowych w technologii na ciepło. Omówiono zagadnienia dotyczące technologii ich wytwarzania (w tym sposoby obniżania temperatur technologicznych ze szczególnym uwzględnieniem procesu spieniania asfaltu wodą), przedstawiono procedury starzenia krótkoterminowego mieszanek WMA, scharakteryzowano technologię zbrojenia rozproszonego z wyszczególnieniem rodzaju i właściwości włókien oraz ich zastosowaniami w technologii drogowej. Ponadto omówiono zagadnienia związane z właściwościami wysokotemperaturowymi lepiszczy asfaltowych oraz mieszanek z ich udziałem i wpływ wybranych włókien na parametry wysokotemperaturowe MMA. Rozdział kończy podsumowanie.

Rozdział 3 – Cel, zakres oraz tezy rozprawy doktorskiej

Rozdział został przedstawiony na 3 stronach maszynopisu. W pierwszym podrozdziale przedstawiono tezy rozprawy, w drugim cel pracy oraz zakres, w którym w sposób skrótowy zawarto najważniejsze elementy rozprawy.

Rozdział 4 – Część badawcza

Rozdział składa się z siedmiu podrozdziałów i zajmuje 131 stron maszynopisu. W części wprowadzającej przedstawiono plany badań dla etapów I-III (pierwszy podrozdział), omówiono metody badań lepiszczy asfaltowych oraz mieszanek mineralno-asfaltowych łącznie z procesem ich wytwarzania oraz przygotowania próbek badawczych w laboratorium (drugi podrozdział). Opis metod i przyjętych założeń powinien być w niektórych przypadkach bardziej szczegółowy, np. w zakresie oznaczenia zagęszczalności czy też zjawiska zmęczenia metodą IT-FT.

W kolejnym etapie opisano procedurę projektowania mieszanki mineralno-asfaltowej referencyjnej (trzeci podrozdział). Zdecydowano się na beton asfaltowych o uziarnieniu do 11 mm na warstwę ścieralną na ruch KR5-7. W tym etapie zaprojektowano skład mieszanki mineralnej (krzywa uziarnienia) oraz określono zawartość lepiszcza równą 5.4%. Dodatek adhezyjny (Wetfix Be) przyjęto na poziomie 0.3% (wag. w stosunku do masy asfaltu). Wykorzystano kruszywa pochodzące z dwóch rodzajów skały, tj. gąbro (grys 2/5, grys 4/8, grys 8/11) oraz wapien (wypełniacz, piasek 0/2, kruszywo drobne 0/4). Mieszanki wykonywano z udziałem trzech rodzajów lepiszczy asfaltowych, tj. asfaltem drogowym 50/70, modyfikowanym PmB 45/80-55 oraz wysokomodyfikowanym HiMA 45/80-80. Trzeba w tym miejscu zaznaczyć, że w dokumencie technicznym WT-2:2014 (część I) ten rodzaj mieszanki przewidziano wyłącznie na ruch KR5-6.

W następnej części przedstawiono wyniki badań z poszczególnych etapów, tj. etapu I (badania lepiszczy asfaltowych – rozdz. 4.4), etapu II (podstawowe badania MMA – rozdz. 4.5) oraz etapu III (zaawansowane badania MMA – rozdz. 4.6).

W zakresie etapu I oznaczono parametry, piany asfaltowej: ER (współczynnik ekspansji) i HL (czas półtrwania) dla każdego z asfaltów dla trzech poziomów dozowania wody i trzech temperatur spieniania. Ponadto oznaczono penetrację, temperaturę mięknięcia, temperaturę łamliwości wg Fraassa, lepkość dynamiczną oraz nawrót sprężysty wybranych trzech asfaltów przed i po ich spienieniu. Dodatkowo temperaturę łamliwości oznaczono po starzeniu wg RTFOT. Przeprowadzone badania pozwoliły określić optymalne parametry spieniania lepiszczy asfaltowych oraz wpływ procesu spieniania na ich właściwości. Wykazano istotny wpływ rodzaju lepiszcza oraz procesu spieniania na analizowane parametry. Najkorzystniejszymi charakteryzowało się lepiszcze wysokomodyfikowane HiMA 45/80-80, pozostałe asfalty spełniały wymagania w zakresie badanych parametrów.

W części dotyczącej badań podstawowych mieszanek mineralno-asfaltowych (etap II) przewidziano oznaczenie zawartości wolnych przestrzeni, odporności na deformacje trwałe oraz odporności na działanie wody i mrozu. Badania wykonano na mieszankach z udziałem trzech lepiszczy asfaltowych, zagęszczanych w trzech temperaturach (w technologii HMA oraz ze spienieniem asfaltu w temperaturze niższej o 15°C i o 30°C). Próbkę wykonywano bez udziału włókien (mieszanki referencyjne) oraz z zastosowaniem włókien aramidowych AR w ilości 0.05%, 0.1% i 0.2% oraz włókien polimerowo-bazaltowych w ilości 0.15%, 0.30% i 0.60%. Najniższe zawartości wolnej przestrzeni zaobserwowano w mieszankach z asfaltem 50/70, natomiast najwyższe w mieszankach z lepiszczem HiMA 45/80-80. Zwiększenie ilości zbrojenia rozproszonego skutkowało zwiększeniem zawartości wolnych przestrzeni przy zastosowaniu obu rodzajów włókien. Obniżenie temperatur zagęszczania

o 15°C nie wpłynęło znacząco na zawartość wolnych przestrzeni w stosunku mieszanek referencyjnych. Zwiększenie zawartości włókien oraz obniżenie temperatury zagęszczania skutkowało wzrostem PRD_{AIR} . Mieszanki z największą zawartością zbrojenia nie spełniły wymagań WT-2:2014. Zastosowanie włókien aramidowych nie miało wpływu na prędkość przyrostu koleiny WTS_{AIR} . Zmniejszenie tego parametru zaobserwowano w mieszankach z lepiszczem wysokomodyfikowanym oraz dodatkiem włókien polimerowo-bazaltowych, zagęszczanych w obniżonej temperaturze o 30°C. W odniesieniu do badań odporności na działanie wody i mrozu oraz wyników oznaczeń wytrzymałości na pośrednie rozciąganie stwierdzono, że największą wytrzymałością charakteryzowały się mieszanki w tradycyjnej technologii HMA, jednak nie zaobserwowano znaczącego wpływu technologii wytwarzania oraz dodatku zbrojenia rozproszonego na wartość analizowanego parametru.

W III etapie (badania zaawansowane MMA) wykonano oznaczenie: zagęszczalności z wykorzystaniem prasy żyratorowej wg PN-EN 12697-10, modułu sztywności metodą rozciągania pośredniego IT-CY w funkcji temperatury wg PN-EN 12697-26, zespolonego modułu sztywności i kąta przesunięcia fazowego wg AASHTO T342, odporności na zmęczenia w schemacie rozciągania pośredniego wg PN-EN 12697-24, modułu sztywności pełzania wg Zeszytu IBDiM nr 4. Badania wykonano dla mieszanek referencyjnych w technologii HMA, WMA-15°C oraz WMA-30°C, a w przypadku mieszanek z włóknami – w technologii HMA oraz WMA-30°C.

Zagęszczalność MMA oceniano na podstawie wskaźnika zagęszczalności K (nachylenie krzywej na półlogarytmicznym wykresie), wskaźnika stabilności MSI (pole powierzchni pod wykresem między 8 cyklem a zawartością wolnych przestrzeni równą 8%) oraz indeksu odporności MRI (pole powierzchni pod wykresem dla zawartości wolnych przestrzeni między 12% a 6%). Przyjęta wartość graniczna wskaźnika MSI ma odzwierciedlać 97-98% zagęszczenia mieszanki, natomiast indeks MRI służy do oceny zdolności mieszanki mineralno-asfaltowej do oporu przed dogęszczaniem. Warto w tym miejscu zadać pytanie, czy przyjęte zakresy wolnej przestrzeni dla MSI i MRI są właściwe? Ocenę zagęszczalności wykonano dla mieszanek referencyjnych oraz z udziałem włókien aramidowych i polimerowo-bazaltowych zgodnie z przyjętym planem badań. Wyznaczono ponadto analizę różnic ΔV_a próbek żyratorowych i wyciętych z nich rdzeni.

Moduł sztywności metodą pośredniego rozciągania IT-CY wyznaczano w trzech temperaturach (5°C, 15°C, 20°C) dla mieszanek referencyjnych oraz z udziałem włókien aramidowych i polimerowo-bazaltowych. Technologia WMA wpłynęła na obniżenie wartości modułów sztywności analizowanych mieszanek. W przypadku mieszanek referencyjnych najniższymi wartościami tego parametru we wszystkich temperaturach badania charakteryzowała się mieszanka WMA-30 z lepiszczami PmB 45/80-55 i HiMA 45/80-80. W przypadku mieszanek z włóknami aramidowymi największy wpływ na wartość modułu sztywności miał rodzaj zastosowanego lepiszcza (najniższe wartości uzyskano dla HiMA 45/80-80), wpływ włókien był stosunkowo niewielki, niezależnie od ich zawartości. W przypadku włókien polimerowo-bazaltowych zauważalny był ich wpływ na uzyskane wartości modułów w temperaturze 5°C i 20°C.

Zespolony moduł sztywności oznaczono dla pełnego zakresu częstotliwości w temperaturze 10°C na wykresach o skali liniowej i logarytmicznej (dla osi opisującej moduł). Dodatkowo przedstawiono wartości modułów dla częstotliwości 1 Hz i 10 Hz w temperaturze -10°C, 5°C, 20°C i 35°C. W temperaturze 35°C wpływ na wartość modułu mieszanek referencyjnych miał rodzaj lepiszcza i technologia wytwarzania, natomiast w niższych wyłącznie rodzaj lepiszcza. W przypadku mieszanek z włóknami krzywe wiodące zmieniały swój przebieg w zależności od rodzaju lepiszcza, a w niektórych przypadkach miała na to wpływ również zawartość i rodzaj włókien. Dodatkowo dla mieszanki referencyjnej wytworzonej w obniżonej temperaturze (WMA-30) na bazie asfaltu

HiMA 45/80-80 oraz mieszanek z włóknami przedstawiono wykres krzywych Blacka. W niskich temperaturach mieszanki zachowują się w podobny sposób, a różnice widoczne są w zakresie wysokich temperaturach. Dotyczy to głównie mieszanek z dodatkiem włókien aramidowych, które charakteryzują się wyższymi kątami przesunięcia fazowego w wysokich temperaturach. Szczegółowe analizy zespolonego modułu sztywności mieszanek z włóknami wykonane dla częstotliwości 1 Hz i 10 Hz w czterech temperaturach wykazały m.in., że:

- *dla włókien aramidowych*
 - mieszanki z dodatkiem włókien i asfaltem 50/70 charakteryzowały się najwyższymi modułami,
 - w temperaturze -10°C mieszanki z włóknami i asfaltem HiMA miały wyższe moduły niż mieszanki z asfaltem PmB 45/80-55, w pozostałych wyższe moduły uzyskiwano dla mieszanek z asfaltem PmB;
- *dla włókien polimerowo-bazaltowych*
 - w temperaturze -10°C i 5°C przy obu częstotliwościach mieszanki z lepiszczami modyfikowanymi PmB i dodatkiem 0,3% włókien wytwarzane w obniżonej temperaturze miały wyższe moduły niż mieszanki wytworzone w technologii HMA;
 - dodatek zbrojenia rozproszonego w postaci włókien powodował spadek wartości E^* w mieszkach z asfaltem drogowym 50/70 (wyjątek stanowiły mieszanki HMA w temperaturze badania 35°C);
 - w mieszkach z polimeroasfaltami (szczególnie PmB 45/80-55) można było zauważyć wzrost E^* po dodaniu włókien w ilości 0,15% lub 0,3% zależnie od temperatury i częstotliwości badania;
 - w przypadku mieszanek z włóknami zmiana częstotliwości miała największy wpływ na wartość modułu E^* w najwyższej temperaturze, tj. 35°C (bardziej korzystnymi właściwościami charakteryzowały się mieszanki z polimeroasfaltami, szczególnie wysokomodyfikowanym HiMA 45/80-80).

Wykonana analiza wariancji wykazała istotność statystyczną wszystkich efektów głównych oraz niektórych interakcji pomiędzy nimi w przypadku mieszanek z włóknami aramidowymi, natomiast dla mieszanek z włóknami polimerowo-bazaltowymi dotyczyła głównie rodzaju zastosowanego lepiszcza asfaltowego. W niższych temperaturach, tj. -10°C i 5°C , dodatkowo zawartość włókien polimerowo-bazaltowych oraz interakcja pomiędzy tymi czynnikami wykazały istotność statystyczną, podczas gdy technologia wytwarzania mieszanek okazała się wpływać na wartości zespolonego modułu sztywności poprzez interakcje z pozostałymi zmiennymi.

Ocena odporności na zjawisko zmęczenia metodą IT-FT została wykonana dla mieszanek referencyjnych oraz ze zbrojeniem rozproszonym w technologii HMA, WMA-15 i WMA-30. Zawartość włókien aramidowych w mieszkach określono na poziomie 0.05% i 0.1%, natomiast włókien polimerowo-bazaltowych 0.15% i 0.3%. Wartości odkształceń początkowych podawano dla trzech poziomów trwałości zmęczeniowej, równej 10 tys. cykli, 50 tys. cykli i 100 tys. cykli. Na podstawie badań stwierdzono, że w przypadku mieszanek referencyjnych wpływ na trwałość zmęczeniową miał rodzaj lepiszcza. Mieszanki z lepiszczem modyfikowanym charakteryzowały się wyższymi wartościami dopuszczalnych odkształceń dla każdego poziomu trwałości zmęczeniowej w stosunku do mieszanek z asfaltem 50/70. W przypadku mieszanek z włóknami aramidowymi i polimerowo-bazaltowymi wpływ na trwałość (dla każdego poziomu) miał rodzaj lepiszcza. Dodatkowo dla mieszanek z włóknami aramidowymi trwałości dla trwałości po 100 tys. cykli zauważalny był również dodatek zbrojenia. Nie stwierdzono wpływu technologii na trwałość mieszanek.

Moduł sztywności pełzania został wyznaczony dla mieszanek referencyjnych oraz dla mieszanek ze zbrojeniem rozproszonym na poziomie 0.05% i 0.1% (włókna aramidowe) oraz w ilości 0.15% i 0.3% (włókna polimerowo-bazaltowe). Oznaczano dwa parametry: moduł pełzania [MPa] oraz odprężenie [%]. W przypadku mieszanek referencyjnych wpływ na oba parametry miał rodzaj lepiszcza i technologia wytwarzania. Wyższymi modułami i większym odprężeniem charakteryzowały się mieszanki z asfaltami modyfikowanymi, szczególnie asfaltem HiMA. Na moduł pełzania mieszanek z włóknami aramidowymi miał wpływ rodzaj lepiszcza, zawartość włókien, technologia wytwarzania oraz interakcja zawartości włókien i technologii wytwarzania. W przypadku odprężenia zauważalny jest efekt zastosowanego lepiszcza i technologii wytwarzania oraz interakcja między lepiszczem i włóknami oraz lepiszczem i technologią wytwarzania. W przypadku mieszanek z włóknami polimerowo-bazaltowymi wpływ na oba parametry testu miał rodzaj asfaltu, zawartość włókien oraz technologia wytwarzania. Dodatkowo, w przypadku modułu pełzania był zauważalna interakcja pomiędzy wszystkimi efektami głównymi.

Część dotyczącą badań zaawansowanych (etap III) kończy podsumowanie zawierające najważniejsze wnioski.

Kolejny etap badań dotyczył optymalizacji składu mieszanek mineralno-asfaltowych w zakresie rodzaju i zawartości zbrojenia rozproszonego, zapewniających uzyskanie najkorzystniejszej kombinacji analizowanych parametrów. W analizach zostały uwzględnione mieszanki wytwarzane w technologii HMA i WMA-30°C. Zastosowano w tym celu metodę jednoczesnej optymalizacji wielu zmiennych z wykorzystaniem funkcji użyteczności. Optymalizację przeprowadzono w dwóch wariantach: wszechstronnej analizy parametrów MMA (PRD_{AIR}, WTS_{AIR}, ITSR, K, IT-CY 5°C, YT-CY 20°C, E* -10°C, E* 35°C, IT-FT 10 000, IT-FT 100 000) oraz właściwości wysokotemperaturowych MMA (PRD_{AIR}, WTS_{AIR}, E* 35°C, Mp).

Analiza dla pierwszego z wariantów wykazała, że:

- najlepszymi parametrami charakteryzowały się mieszanki z lepiszczem PmB 45/80-55 wytwarzane metodą „na gorąco”, a dodatek włókien korzystnie wpływał na ich właściwości;
- z mieszanek wytwarzanych metodą „na ciepło” w technologii WMA-30 najkorzystniejsze właściwości uzyskano stosując lepiszcze PmB 45/80-55 i 0,3% dodatku włókien P-B;
- dodatek zbrojenia rozproszonego w przypadku każdego z lepiszczy wpłynął na poprawę wskaźnika użyteczności (dla asfaltu 50/70 i PmB 45/80-55 efekt ten uzyskano przy zastosowaniu włókien P-B, dla HiMA 45/80-80 przy zastosowaniu włókien AR).

W przypadku analizy właściwości wysokotemperaturowych stwierdzono, że:

- na właściwości mieszanek mineralno-asfaltowych miały zarówno technologia ich wytwarzania, zastosowane lepiszcze asfaltowe jak i rodzaj i ilość zbrojenia rozproszonego;
- w większości najlepsze efekty uzyskiwano dla mieszanek wytwarzanych w technologii HMA, głównie z asfaltami modyfikowanymi;
- dodatek zbrojenia rozproszonego w przypadku każdego z lepiszczy wpłynął na poprawę wskaźnika użyteczności (najwyższe wartości indeksu użyteczności w każdym z analizowanych lepiszczy asfaltowych uzyskały mieszanki wytwarzane w technologii HMA z dodatkiem włókien aramidowych w ilości 0,1% oraz 0,15% włókien polimerowo-bazaltowych);
- bardziej korzystne okazało się zastosowanie włókien P-B w ilości 0,3% w mieszankach wytwarzanych w obniżonych temperaturach z polimeroasfaltem PmB i lepiszczem wysokomodyfikowanym HiMA.

Rozdział 5 – Wnioski końcowe i kierunki dalszych badań

Rozdział składa się z dwóch podrozdziałów i przedstawiono go na 3 stronach maszynopisu.

W pierwszym podrozdziale Doktorantka, na podstawie uzyskanych wyników badań mieszanek mineralno-asfaltowych w technologii HMA i WMA z i bez dodatku zbrojenia rozproszonego w postaci włókien aramidowych i polimerowo-bazaltowych oraz w oparciu o analizę literatury technicznej zagranicznej i krajowej przedstawiła dwie grupy wniosków: ogólne i szczegółowe. Do najważniejszych ze względów aplikacyjnych wniosków ogólnych można zaliczyć:

- zbrojenie rozproszone w postaci włókien wpłynęło na poprawę parametrów wysokotemperaturowych mieszanek wytwarzanych w obniżonych temperaturach z udziałem lepiszczy modyfikowanych polimerem,
- zbrojenie rozproszone pogorszyło właściwości wysokotemperaturowe mieszanki na ciepło na bazie asfaltu 50/70,
- w technologii HMA poprawę parametrów wysokotemperaturowych uzyskano przez zastosowanie włókien aramidowych, natomiast w technologii WMA – włókien polimerowo-bazaltowych;
- korzystny efekt zbrojenia rozproszonego stwierdzono w badaniach odporności na działanie wody i mrozu, sztywności w niskich temperaturach oraz odporności na zmęczenie.

Doktorantka we wnioskach szczegółowych (13 wniosków) odniosła się uzyskanych wyników badań i analiz.

W drugim podrozdziale Doktorantka wskazała kierunki dalszych badań i analiz. Są one ukierunkowane na dalsze badania mieszanek w wyższych zakresach temperatur, możliwości zastosowania lepiszczy o większej sztywności czy też innych rodzajów włókien, zmęczenia przy kontrolowanym odkształceniu oraz możliwości zastosowania włókien do warstwy wiążącej w technologii WMA z asfaltem spienionym czy też granulatu asfaltowego w mieszankach zbrojonych włóknami do warstwy ścieralnej.

Wykaz norm

W rozprawie powołano się na 32 normy przedmiotowe, głównie europejskie. Dodatkowo zostało przywołanych 6 norm amerykańskich (ASTM, AASTHO) i jedno powołanie na wytyczne IBDiM.

Spis literatury

Bibliografia wykorzystana w pracy jest bardzo obszerna i obejmuje 214 pozycji. Są to głównie pozycje zwarte (monografie i artykuły), dokumenty i raporty techniczne oraz akty prawne. Warto w tym przypadku dodać, że Autorka powołuje się w dużej części na najnowsze pozycje literaturowe z zakresu tematycznego podjętego w rozprawie (52% pozycji opublikowanych w ostatnich 10 latach).

3.2. Aktualność tematu

Rozprawa doktorska mgr inż. Karoliny Janus dotyczy istotnego problemu z zakresu technologii drogowej, a doprecyzowując możliwości poprawy właściwości wysokotemperaturowych mieszanek mineralno-asfaltowych poprzez zastosowanie zbrojenia rozproszonego w postaci włókien aramidowych lub polimerowo-bazaltowych. Problem ten dotyczy przede wszystkim mieszanek mineralno-asfaltowych wytwarzanych w obniżonych temperaturach (WMA) z udziałem asfaltów spienionych.

Standardowe procesy wytwarzania mieszanek mineralno-asfaltowych w technologii na gorąco (HMA) bazują na stosunkowo wysokich temperaturach produkcji sięgających 160-190°C, a w przypadku asfaltów lanych nawet 240°C. Efektem tych procesów jest wzrost lepkości lepiszczy asfaltowych oraz

kohezji ich mieszaniny z wypełniaczem (mastyksów), co skutkuje wzrostem sztywności mieszanek mineralno-asfaltowych, a tym samym i poprawą ich odporności na oddziaływanie wysokich temperatur. Wzrost sztywności MMA, obok zwiększenia odporności na deformacje trwałe, pozwala również na lepsze rozłożenie naprężeń od ruchu drogowego na podłoże gruntowe, co zmniejsza wielkości odkształceń rozciągających w warstwach asfaltowych i ściskających w podłożu gruntowym. Obok zalet ta technologia ma również wady – usztywnienie lepszycza, głównie na skutek procesów utleniania, skutkuje obniżeniem ich odporności na oddziaływania niskich temperatur oraz zmęczenie. Odpowiedzią na ten problem mogą być mieszanki mineralno-asfaltowe wytwarzane w technologii WMA, które pozwalają na obniżenie temperatur produkcji i wbudowania o ok. 30°C. Efekt ten uzyskuje się poprzez dodanie do asfaltu środków chemicznych modyfikujących jego lepkość lub spienienie asfaltu w obecności wody, bądź też połączenie obu procesów. Mimo, że lepszycze asfaltowe w formie piany może być bardziej narażone podczas produkcji mieszanki mineralno-asfaltowej na agresywne oddziaływanie tlenu atmosferycznego i stosunkowo wysokiej temperatury, procesy starzeniowe są wyhamowywane na skutek obniżonych temperatur wytwarzania MMA czy też stabilizującą procesy cieplne parę wodną. W efekcie mieszanki mineralno-asfaltowe WMA uzyskują większą odporność na niskie temperatury, ale wzrasta ich podatność na oddziaływania obciążeń w wysokich temperaturach. Rozwiązanie problemu może stanowić zbrojenie rozproszone w postaci włókien, które z jednej strony mogą wpłynąć na usztywnienie lepszycza (większa powierzchnia właściwa składników mieszanki) – zwiększenie odporności na deformacje, z drugiej przejmować część naprężeń rozciągających, poprawiając odporność mieszanek na pękanie i zmęczenie.

W rozprawie Autorka podjęła się oceny wpływu zbrojenia rozproszonego w postaci włókien aramidowych i polimerowo-bazaltowych na właściwości fizyko-mechaniczne (ukierunkowane na cechy wysokotemperaturowe) mieszanek wytwarzanych w obniżonych temperaturach z udziałem asfaltu spienionego. Jest to technologia perspektywiczna, m.in. ze względu na ochronę środowiska naturalnego poprzez zmniejszenie wyziewów szkodliwych gazów do atmosfery. Badania wykonywano na mieszance mineralno-asfaltowej typu beton asfaltowy, przeznaczonej do warstwy ścieralnej na ruch KR5-KR6 (AS 11 S) z udziałem asfaltu 50/70, PmB 45/80-55 oraz HiMA 45/80-80. Warstwa ścieralna jest w największym stopniu narażona zarówno na oddziaływania obciążeń od ruchu pojazdów jak również czynników klimatyczno-pogodowych, w tym temperatury. Wpływ zbrojenia oceniano porównując uzyskiwane wartości z badań mieszanek wytwarzanych w technologii na ciepło z wynikami badań mieszanek standardowych (HMA). Takie podejście poszerza perspektywę i pozwala ocenić wpływ zbrojenia również na mieszanki wytwarzane w technologii na gorąco.

Reasumując, przedstawiona do oceny rozprawa doktorska dotyczy bardzo aktualnego problemu związanego możliwościami poprawy parametrów mieszanek wytwarzanych w technologii na ciepło z asfaltem spienionym poprzez zastosowanie zbrojenia rozproszonego w postaci włókien. Podjęty kierunek badań można uznać za właściwy i powinien on skutkować próbami technologicznymi w skali technicznej (wytworzenie mieszanki na Wytwórni Mas Bitumicznych) oraz przygotowaniem odcinka doświadczalnego. Niezbędny jest tutaj jednak Inwestor, który podjąłby ryzyko i poniósłby koszty wprowadzenia innowacyjnego rozwiązania materiałowego.

3.3. Teza i cel naukowy

W rozprawie, w oparciu o studium literaturowe, Doktorantka napisała, że sformułowała dwie tezy po czym zamieszcza trzy odnoszące się do właściwości betonów asfaltowych stosowanych do warstw ścieralnych, tj.:

- I. Zastosowanie zbrojenia rozproszonego ma korzystny wpływ na właściwości wysokotemperaturowe betonu asfaltowego przeznaczonego do warstwy ścieralnej nawierzchni drogowej wytwarzanego metodą „na ciepło” z asfaltem spienionym;
- II. Efekty stosowania zbrojenia rozproszonego w tych mieszankach są zależne od rodzaju wykorzystanych włókien oraz rodzaju lepiszcza asfaltowego;
- III. Zastosowanie zbrojenia rozproszonego może mieć korzystny wpływ na trwałość betonu asfaltowego wytwarzanego w obniżonych temperaturach.

Przedstawione tezy wydają się racjonalne, przy czym w przypadku III tezy nie doprecyzowano przeznaczenia betonu asfaltowego (rodzaju warstwy) oraz nie zdefiniowano pojęcia „trwałość betonu asfaltowego”.

Przewodnim celem rozprawy było określenie wpływu składu mieszanki mineralno-asfaltowej ze zbrojeniem rozproszonym wytwarzanej metodą „na ciepło” WMA z asfaltem spienionym na jej właściwości, w tym szczególnie na właściwości wysokotemperaturowe. Analizowano wpływ dwóch rodzajów włókien, trzech rodzajów lepiszczy asfaltowych na właściwości betonu asfaltowego do warstwy ścieralnej w technologii WMA i standardowej HMA.

Rozwiązanie problemu naukowego zawartego w celu i tezach rozprawy wymagało przeprowadzenia przez Doktorantkę badań i analiz. Obejmowały one oznaczenia właściwości lepiszczy asfaltowych oraz mieszanek mineralno-asfaltowych. Rozważania na temat uzyskanych wyników z badań poparto szczegółową analizą statystyczną, co pozwoliło Doktorantce optymalizować skład betonu asfaltowego w zakresie ilości i rodzaju zastosowanego zbrojenia rozproszonego oraz rodzaju lepiszcza asfaltowego.

3.4. Ocena programu i zakresu badań oraz analiz

Program i zakres przeprowadzonych badań oraz analiz, ze względu na ich dobór, ilość oraz stopień zaawansowania, świadczy o dużym nakładzie pracy włożonej przez Doktorantkę oraz racjonalnym podejściu do rozwiązania problemu naukowego. Uzyskane wyniki badań i analiz wskazują, że podjęta tematyka oprócz walorów naukowych, ma możliwości wdrożenia w skali technicznej. Plan badań opisano w rozdz. 4.1 rozprawy. Sposób przedstawienia jest czytelny, co ułatwia jego ocenę, ale również podejście do analizowanej problematyki.

Zrealizowane w rozprawie badania i analizy Doktorantka podzieliła na trzy etapy.

Pierwszy etap obejmował badania lepiszczy asfaltowych (drogowego 50/70, PmB 45/80-55, HiMA 45/80-80), wykonane przed i po ich spienieniu. Ocenie poddano charakterystyki spieniania lepiszczy asfaltowych w aspekcie ilości wody spieniającej oraz temperatury lepiszcza, co pozwoliło ustalić optymalne parametry procesu spieniania na potrzeby wytwarzania mieszanek mineralno-asfaltowych. W zakresie badań wykonano oznaczenia penetracji, temperatury mięknięcia wg PiK, temperatury łamliwości wg Fraassa, lepkości dynamicznej oraz nawrotu sprężystego. Wyniki badań zostały przedstawione w rozdz. 4.4.1 (badania piany asfaltowej) oraz w rozdz. 4.4.2 (badania lepiszczy). W zakresie wykonanych oznaczeń lepiszczy pojawiło się badanie nawrotu sprężystego po RTFOT, o czym w programie badań nie wspomniano. Można w tym miejscu zadać pytanie, dlaczego wykonano wyłącznie badanie nawrotu po RTFOT. Co było podstawą takiego podejścia? Zdaniem recenzenta warto również się zastanowić nad badaniem kompatybilności (stabilności) asfaltów modyfikowanych w teście tubowym.

Drugi etap obejmował badania podstawowe mieszanek mineralno-asfaltowych AC 11 S (wg WT-2:2014 – część I) przeznaczonych na warstwę ścieralną na obciążenie ruchem kategorii KR 5-6 w technologii HMA (standardowej) i WMA z asfaltem 50/70, PmB 45/80-55 i HiMA 45/80-80 bez zbrojenia rozproszonego (referencyjne) oraz z ich zmienną zawartością w postaci włókien

aramidowych (w ilości 0.15%, 0.3% i 0.6%) i polimerowo-bazaltowych (0.05%, 0.1%, 0.2%). Mieszanki w technologii „na ciepło” zostały wytworzone z dodatkiem asfaltu spienionego o parametrach ustalonych w pierwszym etapie badań. Mieszanki WMA wytwarzano w temperaturze o 15°C niższej niż mieszanki HMA, a temperatury zagęszczania obniżono o 15°C (WMA-15) i 30°C (WMA-30) względem technologii HMA. W części badawczej wykonano oznaczenia zawartości wolnych przestrzeni, odporności na deformacje trwałe oraz wrażliwości na działanie wody i mrozu. Wyniki i analizy z przeprowadzonych oznaczeń z tego etapu przedstawiono w rozdz. 4.5.

Wyniki badań (wartości średnie) przedstawiono na wykresach kolumnowych. Warto się zastanowić, czy ich przedstawienie na wykresach x-y (x – zawartość włókien) nie byłoby bardziej przejrzyste i czytelne.

Trzeci etap obejmował wykonanie badań zaawansowanych, do których Doktorantka zaliczyła: oznaczenie zagęszczalności w prasie żyratorowej, sztywności metodą rozciągania pośredniego IT-CY w funkcji temperatury, zespolonego modułu sztywności i kąta przesunięcia fazowego, odporności na zmęczenie w schemacie rozciągania pośredniego IT-FT oraz modułu sztywności pełzania. Badania wykonano dla mieszanek spełniających wymagania WT-2 2014, wytypowanych na podstawie wyników badań etapu II. Wykonano badania dla mieszanek referencyjnych w technologii HMA, WMA-15°C oraz WMA-30°C. Analizę wpływu zbrojenia rozproszonego wykonano dla wszystkich analizowanych lepiszczy asfaltowych w technologii HMA i WMA-30°C z dodatkiem włókien aramidowych i polimerowo-bazaltowych. Pewne zastrzeżenia można mieć odnośnie przyjętych parametrów do oceny zagęszczalności mieszanek mineralno-asfaltowych w prasie żyratorowej, a dokładnie ich adekwatności w stosunku do mieszanki o stosunkowo niewielkiej zawartości wolnej przestrzeni (wg WT-2:2014 – część I w zakresie od 2% do 4%). Nasuwa się również uwaga odnośnie oznaczenia trwałości zmęczeniowej metoda IT-FT – sposób przedstawienie wyników oraz opis metodyki badań powinien być bardziej szczegółowy.

Do zakresu i planu badań należy również zaliczyć etap projektowania mieszanki mineralno-asfaltowej oraz proces optymalizacji składu w zależności od technologii wytwarzania, rodzaju lepiszcza, zawartości i rodzaju zbrojenia rozproszonego, zarówno ze względu na wszystkie przebadane cechy jak również ukierunkowane na właściwości wysokotemperaturowe.

Warto w tym miejscu również zauważyć, że uzyskane z przeprowadzonych badań wyniki zostały poddane szczegółowej analizie statystycznej w zakresie istotności wpływu poszczególnych czynników, co pozwoliło na przeprowadzenia analiz i wyciągnięcie odpowiednich wniosków.

Podsumowując można uznać, że przyjęty program w zakresie badań laboratoryjnych oraz przeprowadzonych analiz jest właściwy, a uzyskane wyniki z oznaczeń i obliczeń zapewniają realizację postawionych w pracy celów. Na pochwałę zasługuje część dotycząca analiz statystycznych, która pozwala w sposób racjonalny ocenić uzyskane wyniki badań.

3.5. Struktura rozprawy, język i redakcja pracy

Strukturę pracy można uznać za właściwą. Część teoretyczna zawiera najważniejsze treści związane z dokonaniem światowymi i krajowymi w zakresie tematyki rozprawy doktorskiej, w części badawczej przedstawiono informacje odnośnie materiału badawczego, metod przeprowadzanych oznaczeń oraz analizy wyników. Część badawczo-analityczną (rozdz. 4) stanowi ponad 65% części zasadniczej pracy i można ją podzielić (oddzielne rozdziały) na część teoretyczną (metodyka badań), badawczą oraz dotyczącą optymalizacji.

W rozprawie zamieszczono wszystkie niezbędne elementy, począwszy od spisu treści, wykazu oznaczeń i skrótów, części właściwej pracy, streszczenia (w j. polskim i j. angielskim), kończąc na bibliografii.

Pod względem edytorskim rozprawa jest napisana poprawnie, język techniczny odpowiada tematyce i poruszonym zagadnieniom. W tekście można dopatrzyć się błędów czy usterek redakcyjnych, głównie interpunkcyjnych, ale ich znaczenie na ogólny ogład pracy jest znikome, np.:

- na str. 36 (15 wers od góry) powołano się na tabelę 3.5 (powinno być tabelę 2.5);
- str. 38 „W przypadku wszystkich rodzajów mieszanek zanotowano wzrost stabilności mma przy dozowaniu włókien polipropylenowych, w gdy stosowane były tylko one wynosił on do 18% w stosunku do mieszanek kontrolnych oraz zwiększyła się zawartość wolnych przestrzeni”;
- opisy tabel i rysunków nie powinno się kończyć kropkami,
- str. 53 „... analizę stabilności wg. Marshalla...”,
- w tekście pracy pojawiają się błędy interpunkcyjne oraz składniowe, np. „Również wzrost świadomości ekologicznej społeczeństwa wpływa aspekty technologii produkcji materiałów drogowych” – str. 8,;
- rysunki zamieszczone w pracy powinny być opisane w j. polskim.

Część graficzna pracy jest estetyczna, znaczącą większość rysunków wykonano ze starannością, w sposób czytelny i przejrzysty. Pojawiają się pojedyncze rysunki, których czytelność jest ograniczona.

4. Uwagi krytyczne i dyskusyjne, pytania do pracy

Po zapoznaniu się z treścią rozprawy zwrócono uwagę na pewne zagadnienia, które wymagają doprecyzowania, a w niektórych przypadkach również odniesienia się do nich przez Doktorantkę. Do uwag merytorycznych zaliczono:

1. Doktorantka w części dotyczącej przeglądu literatury skupiła się m.in. na opisie wpływu włókien różnego rodzaju na właściwości mieszanek mineralno-asfaltowych. Jest to jak najbardziej zasadne w odniesieniu do tematu rozprawy. Ta część zdaniem recenzenta powinna być poszerzona o aspekt związany z jednorodnością mieszanek, a dokładnie rozprowadzeniem włókien w jednostce objętości analizowanych mieszanek; co może mieć bardzo duże znaczenie. Co zdaniem Doktorantki może mieć wpływ na właściwe rozproszenie włókien w mieszance?
2. W etapie pierwszym przeprowadzono badania lepiszczy asfaltowych przed i po ich spienieniu. Wpływ procesu starzenia uwzględniono wyłącznie w badaniu temperatury łamliwości wg Fraassa. Jaki zdaniem Doktorantki był wpływ technologii (spienianie, niespienie) na pozostałe parametry po starzeniu zastosowanych lepiszczy asfaltowych, np. lepkość, która jest jednym z czynników wpływających na zagęszczalność MMA? W przypadku asfaltów modyfikowanych jednym z podstawowych oznaczeń jest ich kompatybilność badana w teście tubowym. Czy Doktorantka przeprowadziła tego rodzaju badania?
3. Na str. 62 Doktorantka zaliczyła do grupy badań etapu III oznaczenie zagęszczalności, modułu sztywności IT-CY, zespolonego modułu sztywności i kąta przesunięcia fazowego, odporności na zmęczenie i modułu sztywności pełzania, klasyfikując je jako zaawansowane badania w zakresie właściwości wysokotemperaturowych (str. 62)? Czy wszystkie z nich można zaliczyć do badań właściwości wysokotemperaturowych?
4. W rozdz. 4.2.4 opisano metody oznaczenia zagęszczalności próbek w prasie żyrotorowej. Wyznaczono wskaźnik stabilności MSI pomiędzy 8 cyklem a zawartością wolnych przestrzeni równą 8% oraz wskaźnik MRI dla zakresu wolnej przestrzeni od 6% do 12%. Czy przedstawione metody są właściwe dla mieszanek do warstwy ścieralnej o stosunkowo małej zawartości wolnej przestrzeni (do 4%), a tym samym i wyciągnięte na ich podstawie wnioski?

5. Na str. 168 jest napisane: „W 100 cyklu określano wartość odkształcenia początkowego charakterystycznego dla zadawanego naprężenia rozciągającego. Na tej podstawie dokonano regresji uzyskanych wyników i określono krzywą zmęczeniową dla każdej analizowanej mieszanki”. Dla jakich zakresów naprężeń rozciągających wykonano to oznaczenie? Czy Doktorantka może przedstawić przykładowe wykresy z krzywymi zmęczeniowymi?

Do uwag szczegółowych zaliczono:

1. Na str. 31 jest Doktorantka napisała, że wprowadzenie rozwiązań materiałowo-technologicznych WMA w technologii produkcji mieszanek mineralno-asfaltowych skutkuje znaczącą redukcją zużycia energii, powołując się na literaturę [122]. Wielu badaczy stwierdziło, że różnica w **całkowitym** zużyciu energii przy produkcji mieszanek HMA i WMA jest znacznie mniejsza i oszacowano ją na poziomie 5-13%.
2. Co Doktorantka rozumie przez zapis: „Wartości zakresu dozowania wody spieniającej zostały ustalone na podstawie własnych doświadczeń, jak i innych badaczy [205], [206], zawierając się w zakresie od 155°C do 185°C” (str. 67)?
3. W rozdz. 4.1.2 napisano, że badania będą prowadzone na mieszance AC 11 S przeznaczonej na warstwę ścieralną na ruch KR5-7. Wg WT-2:2014 (część I) tego rodzaju mieszanka może być stosowana wyłącznie na ruch KR5-6.
4. W rozdz. 4.2.2 przedstawiono metody zagęszczania próbek? Dla jakich założonych gęstości objętościowych zagęszczano próbki prostopadłościenną w zagęszczarce płytowej w zależności od technologii, rodzaju asfaltu i temperatury?
5. Na str. 77 opisano badanie zagęszczalności oraz parametry je opisujące. W celu lepszego zobrazowania wybranych parametrów powinno się to również przedstawić w formie graficznej.
6. Na str. 101 jest napisane: „Na podstawie wykonanych badań zaobserwowano spadek temperatury łamliwości w przypadku zastosowania lepiszczy niespionych oraz poddanych procesowi spieniania wraz ze zmianą rodzaju asfaltu: najwyższą wartość posiadało lepiszcze drogowe 50/70, najniższą lepiszcze wysokomodyfikowane 45/80-55” – ten zapis jest dość niefortunny, szczególnie w odniesieniu do jego pierwszej części. Zapis w postaci: „Proces spieniania lepiszczy asfaltowych (50/70 i HiMA 45/80-80) skutkował wzrostem temperatury łamliwości...” byłby bardziej zrozumiały. Jest również błąd w nazewnictwie asfaltu wysokomodyfikowanego (45/80-55).
7. Na str. 133 jest pojawiły się dwa stwierdzenia: „Jednocześnie, mieszanki te wykazały również najlepszą oporność mma w fazie oddziaływania ruchu samochodowego, dzięki czemu są bardziej odporne na powstawanie kolein. Na podstawie powyższej analizy stwierdzić można, że obniżenie temperatury i zastosowanie lepiszcza w formie spienionej korzystnie wpływa na oporność mieszanek na powstawanie deformacji trwałych w okresie eksploatacji nawierzchni”. Czy na podstawie uzyskanych wartości indeksu odporności MRI, wyznaczonego z pola powierzchni po wykresie zawartości wolnych przestrzeni między 6% i 12%, można wysnuć taki wniosek? Dla jakiego zakresu wolnych przestrzeni powinien być wyznaczony indeks MRI w przypadku mieszanki typu beton asfaltowych do warstwy ścieralnej? Czy podwyższona odporność na deformacje trwałe mieszanek zagęszczanych w obniżonych temperaturach (-30°C) została potwierdzona w testach koleinowania? Uwagi te odnoszą się również do badań mieszanek z udziałem włókien.
8. Na str. 140 przedstawiono metodę wyznaczenia ΔV_a . Co charakteryzuje parametr V_{a-c} ? Czy jest on tożsamy z V_{gr} ?

5. Ocena końcowa

Przedstawioną do recenzji pracę, mimo uwag głównie dyskusyjnych, oceniam bardzo pozytywnie. Dotyczy to zarówno jej strony naukowej jak i formalnej, które nie budzą większych zastrzeżeń. Należy podkreślić znaczny nakład pracy Doktorantki związany z zakresem przeprowadzonych badań i analiz.

Autorka rozprawy wykazała się wiedzą teoretyczną z zakresu inżynierii lądowej, dużą pracowitością, umiejętnościami związanymi z obsługą wysoce specjalistycznej aparatury badawczej i dojrzałością w zakresie wyciąganych wniosków i przeprowadzonych analiz. Świadczy to o jej uzdolnieniach do samodzielnej pracy naukowej i rozwiązywania trudnych zagadnień badawczych i analitycznych.

Sformułowane przez Autorkę tezy rozprawy znalazły swoje potwierdzenie w wynikach badań, popartych analizami. Cel rozprawy, którym było określenie wpływu składu mieszanki mineralno-asfaltowej ze zbrojeniem rozproszonym wytwarzanej metodą „na ciepło” WMA (ang. Warm Mix Asphalt) z asfaltem spienionym na jej właściwości, w tym szczególnie na właściwości wysokotemperaturowe można uznać za zrealizowane.

Oceniana rozprawa wnosi istotny wkład w rozwój dyscypliny inżynieria lądowa, geodezja i transport, a precyzując możliwości wykorzystania zbrojenia rozproszonego w postaci włókien aramidowych i polimerowo-bazaltowych w mieszankach mineralno-asfaltowych w technologii WMA z asfaltem spienionym celem poprawy ich właściwości, szczególnie w zakresie wysokich temperatur. Warto również zwrócić uwagę, że badania z udziałem zbrojenia rozproszonego wykonano również na mieszankach wykonanych w standardowej technologii tj. na gorąco, co poszerza pogląd na możliwości wykorzystania tego rodzaju dodatków w technologii drogowej. Efekty pracy mogą zostać wykorzystane w praktyce wykonawczej i przynieść znaczące korzyści głównie Zarządom dróg, m.in. dzięki podwyższonej parametrom mieszanek mineralno-asfaltowych.

Rozprawa stanowi oryginalne rozwiązanie problemu naukowego, a do osiągnięć potwierdzających to można zaliczyć:

- zastosowanie w mieszankach na ciepło z asfaltem spienionym zbrojenia rozproszonego w postaci włókien aramidowych oraz polimerowo-bazaltowych;
- wykonanie badań potwierdzających przydatność zbrojenia rozproszonego w mieszankach mineralno-asfaltowych na ciepło i na gorąco w aspekcie poprawy ich właściwości funkcjonalnych,
- przeprowadzenie procesu optymalizacji składu mieszanek na ciepło oraz na gorąco ze względu na ich parametry eksploatacyjne, w tym wysokotemperaturowe.
- potwierdzenie możliwości wykorzystania nowej generacji lepiszczy (wysokomodyfikowanych HiMA) w technologii WMA z asfaltem spienionym.

W podsumowaniu, odnosząc się do powyższych stwierdzeń, wnioskuję o wyróżnienie recenzowanej rozprawy doktorskiej.

W związku z powyższym uważam, że praca doktorska Pani mgr inż. Karoliny Janus spełnia wszystkie warunki określone w Ustawie z dnia 3 lipca 2018 r. Przepisy wprowadzające ustawę - Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz. U. poz. 1669) art. 14 ust. 1 pkt. 1, ust. 2 pkt 2 ustawy z dnia 14 marca 2003 r. o stopniach i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki (Dz. U. Nr 65, poz. 595, z późn. Zm.) oraz Rozporządzeniu Ministra Nauki i Szkolnictwa Wyższego z dnia 19 stycznia 2018 r. w sprawie szczegółowego trybu i warunków przeprowadzenia czynności w przewodzie doktorskim, w postępowaniu habilitacyjnym oraz w postępowaniu o nadanie tytułu profesora (Dz. U. z 2018 r. poz. 261) i wnoszę o przyjęcie rozprawy doktorskiej oraz dopuszczenie jej do publicznej obrony.

*Recenzja zgodna z wymogami
funkcyjnymi*

DYREKTOR NAUKOWY DISCYPLINY
Inżynieria Lądowa, Geodezja i Transport

prof. dr hab. inż. Jerzy Wawrzeńczyk