

dr hab. inż. Wojciech Bańkowski, prof. IBDiM
Instytut Badawczy Dróg i Mostów
ul. Instytutowa 1
03-302 Warszawa
email: wojciech.bankowski@ibdim.edu.pl

Recenzja

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”.

1 Podstawa recenzji

Recenzja rozprawy została opracowana na podstawie uchwały Rady Naukowej Dyscypliny Inżynieria Lądowa, Geodezja i Transport Politechniki Świętokrzyskiej z dnia 12 lutego 2025 roku.

Promotorem rozprawy jest *dr hab. inż. Anna Chomicz-Kowalska, prof. PŚk*, a promotorem pomocniczym *dr inż. Mateusz Marek Iwański*.

Celem recenzji jest ocena przy rozprawa doktorska spełnia warunki określone w ustawie z dnia 20.07.2018 r. Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce.

2 Dane o Kandydacie

Tytuł magistra inżyniera na specjalności Budowa Dróg Doktorantka Karolina Janus uzyskała na Wydziale Budownictwa i Architektury Politechniki Świętokrzyskiej, na kierunku Budownictwo w roku 2019. Z przedstawionej dokumentacji nie wynika jakoby Kandydatka wcześniej ubiegała się o nadanie stopnia doktora. W roku 2019 Doktorantka rozpoczęła kształcenie w Szkole Doktorskiej Politechniki Świętokrzyskiej, w dyscyplinie Inżynieria Lądowa, Geodezja i Transport oraz rozpoczęła pracę w laboratorium w Katedrze Inżynierii Komunikacyjnej. W dokumentacji brak jest informacji o zajmowanych stanowiskach. Uczestniczyła natomiast w pracach Katedry w trzech projektach badawczych NCBiR oraz w ramach innych zleceń. Doktorantka zdobyła nagrody za swoje wynalazki, w tym medale na międzynarodowych wystawach w Genewie, Warszawie, Norymberdze i Chorwacji. Otrzymała również wyróżnienie Marszałka Województwa Świętokrzyskiego za osiągnięcia w dziedzinie innowacji. W trakcie studiów doktorskich Doktorantka została współautorem sześciu publikacji naukowych oraz była współautorką zgłoszeń patentowych i przyznanego patentu w Urzędzie Patentowym RP.

3 Treść i zakres rozprawy doktorskiej

Rozprawa jest przedstawiona na 255 stronach formatu A4. Zasadnicza część pracy składa się z 5 rozdziałów głównych z podrozdziałami i obejmuje 199 stron. Ponadto integralną częścią pracy stanowią:

- wykaz skrótów używanych w pracy,

- bibliografia obejmująca zestawienie 214 pozycji literatury oraz wykaz norm [32 pozycje],
- streszczenie w języku polskim i angielskim,
- załącznik z 46 tablicami prezentującymi wyniki szczegółowe analiz statystycznych,
- spisy tabel i rysunków.

Rozdział 1 „Wstęp” i zawiera wprowadzenie do rozprawy doktorskiej. Autorka wskazuje na rosnące wyzwania w zakresie technologii nawierzchni, podkreśla znaczenie rozwiązań zwiększających trwałość nawierzchni oraz redukcję wpływu na środowisko. Jednym z rozwiązań, które minimalizuje emisję gazów cieplarnianych, jest technologia WMA (Warm Mix Asphalt), która umożliwia wytwarzanie mieszanek mineralno-asfaltowych w obniżonych temperaturach. W zakresie poprawy trwałości podejmowane są próby stosowania zbrojeń rozproszonych. Rozwiązanie jest stosowane od dawna w betonach cementowych, ale ma również historię stosowania w mieszankach mineralno-asfaltowych. W rozprawie przeanalizowano wpływ różnych rodzajów lepiszcza i technologii na właściwości mieszanki. Badania obejmowały porównanie mieszanek WMA z zastosowaniem asfaltu spienionego i mieszanek na gorąco HMA (Hot Mix Asphalt) pod względem trwałości i parametrów mechanicznych. Analizowano również oddziaływanie włókien polimerowo-bazaltowych i aramidowych na właściwości asfaltu. Głównym celem pracy jest optymalizacja składu mieszanki wykonanej w technologii na ciepło pod względem rodzaju lepiszcza asfaltowego oraz rodzaju i ilości włókien do warstwy ścieralnej.

Rozdział 2 pt. „Przegląd literatury” podzielony na kilka podrozdziałów. W rozdziale 2.1 pt. „Charakterystyka technologii wytwarzania mieszanek mineralno-asfaltowych” podzielonym na podrozdziały, przedstawiony jest ogólny przegląd dostępnych technologii w kontekście ich wpływu na trwałość nawierzchni oraz korzyści ekologiczne. Autorka przedstawia podział metod ze względu na temperaturę produkcji mma, tj. „na ciepło” (WMA), „na półciepło” (HWMA) oraz „na zimno” (CMA). Analizowane są takie rozwiązania jak asfalt spieniony i stosowanie dodatków WMA do mieszanek mineralno-asfaltowych. Najwięcej uwagi poświęcono technologii spieniania asfaltu wodą, w tym przedstawiając sam proces produkcyjny, jak i zagadnienia związane ze zdolnością asfaltu do spieniania, właściwościami spienionego lepiszcza oraz dobozem ilości wody. W ostatnim podrozdziale Autorka omawia również korzyści wynikające z redukcji temperatur technologicznych, takie jak zmniejszenie emisji gazów cieplarnianych, poprawa bezpieczeństwa pracowników oraz redukcja kosztów produkcji. W rozdziale 2.2 Autorka omawia procedury starzenia krótkoterminowego mieszanek WMA w warunkach laboratoryjnych. Kolejny rozdział 2.3 pt. „Charakterystyka technologii zbrojenia rozproszonych” zawiera przegląd stanu wiedzy w zakresie stosowania włókien wzmacniających w mieszankach mineralno-asfaltowych. Autorka omawia różne rodzaje wykorzystywanych włókien w tym celulozowych, azbestowych, mineralnych, stalowych, szklanych, polimerowych i węglowych. Wskazuje na dwa zasadnicze cele stosowania włókien: jako stabilizatora w mieszankach o nieciągłym uziarnieniu oraz w roli zbrojenia rozproszonych, kiedy wpływają one na właściwości mechaniczne mieszanek.

Autorka przedstawia krótką charakterystykę każdego z rodzaju włókien, wskazując przykłady korzyści z ich stosowania.

Rozdział 2.4 zatytułowany jest „Ocena właściwości wysokotemperaturowych lepiszczy asfaltowych i mieszanek mineralno-asfaltowych”. Na wstępie omówione są zagadnienia związane z zakresem temperaturowym pracy nawierzchni i obserwowanymi zmianami w związku z tzw. ociepleniem klimatu. W podrozdziale 2.4.1 Autorka szczegółowo omawia metody oceny właściwości wysokotemperaturowych tj. odporności na deformacje trwałe lepiszczy i mieszanek mineralno-asfaltowych. W kolejnym podrozdziale Autorka przedstawia przegląd doświadczeń światowych i krajowych z zakresie wpływu włókien na właściwości wysokotemperaturowe mma. Rozdział 2.5 stanowi podsumowanie przeglądu literatury dotyczącego technologii wytwarzania mieszanek mineralno-asfaltowych, ich właściwości wysokotemperaturowych oraz zastosowania zbrojenia rozproszonego. Wskazuje kluczowe wnioski z wcześniejszych analiz, podkreślając zalety i ograniczenia różnych rozwiązań. Autorka wskazuje, że niewiele jest doświadczeń z łączenia technologii WMA, a w szczególności asfaltu spienionego, ze stosowaniem zbrojenia rozproszonego.

Rozdział 3 przedstawia tezy, cel i zakres pracy. W rozdziale 3.1 Autorka podaje 3 tezy pracy:

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

Cel pracy określony jest w rozdziale 3.2 i jest wprost zbieżny z tytułem rozprawy doktorskiej. W ramach opisu zakresu pracy Autorka wskazuje jako podstawowe części pracy: przegląd literatury w zakresie tematyki pracy, opracowanie planu i metodyki badań, przeprowadzenie badań laboratoryjnych oraz analizę statystyczną wyników i optymalizację składu mieszanki betonu asfaltowego w zakresie doboru zbrojenia i rodzaju asfaltu. Rozdział 4 zatytułowana jest „Część badawcza” jest zasadniczą, najbardziej obszerną częścią pracy prezentującą osiągnięcia badawcze Autorki. W nawiązaniu do założonego celu pracy i postawionych tez Autorka opracowała szczegółowy plan badań (rozdział 4.1), z podziałem na kolejne etapy poczynając od badań lepiszczy, ustalenia parametrów spieniania, badań podstawowych właściwości mma, a na badaniach zaawansowanych kończąc. Uzupełnieniem planu badań jest przedstawienie metodyki badań w rozdziale 4.2.

W rozdziale 4.3 przedstawiono proces projektowania mieszanki AC 11S, rozpoczynając od przedstawienia charakterystyki asfaltów, kruszyw i środka adhezyjnego. Mieszanka została zaprojektowana na zgodność z wymaganiami WT-2 2014 dla KR5-6. Autorka przedstawia skład i uziarnienia oraz wymagania, które będą testowane w II etapie badań. Kolejny rozdział 4.4 przedstawia badania lepiszczy asfaltowych. Na wstępie Autorka prezentuje badania piany asfaltowej w zakresie ekspansji maksymalnej i czasu półtrwania w funkcji rodzaju asfaltu, temperatury spieniania i ilości wody spieniającej (łącznie 27 wariantów). Przetstawione

powierzchnie odpowiedzi oraz analizy wariancji, które wskazały na istotny wpływ temperatury asfaltu i zawartości wody na parametry spieniania. Wnioski są zbieżne niezależnie od rodzaju asfaltu. W dalszym etapie Autorka przedstawia analizy w zakresie ustalenia optymalnych warunków spieniania, tj. temperatury spieniania lepiszcza i zawartości wody spieniającej. Stwierdzono, że temperatura zależy wprost od stopnia modyfikacji asfaltu. Zwrócono uwagę, iż asfalt HiMA wymaga nie tylko wyższej temperatury spieniania, ale również większej zawartości wody.

W dalszej części pracy w rozdziale 4.4.2 zaprezentowane są wyniki badań podstawowych parametrów asfaltów przewidziane w ramach I etapu tj. penetracji w 25°C, temperatury mięknięcia, temperatury łamliwości, nawrotu sprężystego przed oraz po procesie starzenia oraz lepkości dynamicznej w funkcji temperatury. Badania wykonano dla asfaltów niespionych i spionych. W ramach analizy wyników Autorka przeprowadziła analizy statystyczne: test wariancji ANOVA w celu oceny wpływu rodzaju asfaltu i procesu spienienia na daną właściwość oraz test Tukeya w celu określenia grup homogenicznych i istotności różnic między średnimi. Na podstawie analiz stwierdzono istotny wpływ rodzaju lepiszcza oraz procesu spieniania na analizowane właściwości. Wszystkie asfalty spełniały wymagania normowe, przy czym najkorzystniejszymi parametrami charakteryzowało się lepiszcze wysokomodyfikowane 45/80-80. Rodzaj asfaltu miał bardziej istotny wpływ na badany parametr niż proces spieniania, który wg Autorki nie wpływał „istotnie na pogorszenie ich właściwości”, co pozwoliło kontynuować badania na mma z tymi lepiszczami.

Rozdział 4.5 przedstawia wyniki badań mma w celu określenia wpływu rodzaju asfaltu, rodzaju i ilości włókien oraz technologii wytwarzania mma na podstawowe parametry zgodnie z WT-2 2014, tj. zawartość wolnych przestrzeni, odporność na koleinowanie i odporności na działanie wody i mrozu. Uzyskane wyniki porównano z wymaganiami technicznymi oraz przeprowadzono analizy statystyczne stosując metodykę jak w poprzednim rozdziale. Oceniając wpływ włókien aramidowych i bazaltowych na zawartość wolnych przestrzeni wnioski były zbieżne, stwierdzono istotny wpływ rodzaju lepiszcza, technologii wytwarzania i zawartości włókien. Ogólnie wzrost zawartości włókien i obniżanie temperatury wytwarzania pogarszały zagęszczalność mieszanki i w kilku przypadkach uzyskano wyniki przekraczające górną granicę dopuszczalnego przedziału. Analiza istotności różnic pozwoliła wskazać poziom zawartości włókien przy których następuje istotne pogorszenie zagęszczenia mieszanki. W zakresie odporności na deformacje trwałe ocenie podlegały dwie właściwości, tj. proporcjonalna głębokość koleiny i jej przyrost wyrażony w mm/1000 cykli. Podobnie jak w przypadku wolnych przestrzeni wyniki porównano z wymaganiami oraz poddano analizom statystycznym stosując ten sam schemat postępowania i metody analizy jak wcześniej.

W przypadku obydwu rodzajów włókien Autorka zaobserwowała, że dodatek włókien wpływa istotnie na proporcjonalną głębokość koleiny jedynie przy najwyższych zawartościach i jest to wpływ negatywny. W analizie przyrostu koleiny wpływ technologii i włókien jest praktycznie nieznaczący poza obserwacjami w zakresie mieszanki z asfaltem HIMA i włóknem bazaltowym w najniższej temperaturze zagęszczania. Wszystkie mieszanki z dodatkiem zbrojenia rozproszanego charakteryzowały się nieznacznym wzrostem proporcjonalnej głębokości

koleiny wraz z obniżaniem temperatur technologicznych. Zastosowanie włókien aramidowych nie miało wpływu na tempo przyrostu koleiny, natomiast w mieszankach z lepiszczem wysokomodyfikowanym oraz dodatkiem włókien polimerowo-bazaltowych i obniżeniem temperatury technologicznej o 30°C zauważono zmniejszenie tego parametru. W kolejnym podrozdziale 4.5.3 Autorka przedstawia wyniki badania odporności na działanie wody i mrozu wg wskaźnika ITSr oraz wytrzymałości ITS próbek mokrych i suchych. W zakresie wymagań stwierdzono, że przy najwyższych zawartościach włókien wymagania ITSr nie jest spełnione lub jest na granicy wymagania (AR). Wyniki wytrzymałości zostały poddane analizom statystycznym wg przyjętej wcześniej metodyki. Najlepsze wyniki uzyskała mieszanka z asfaltem typu HiMA i nie zaobserwowano znaczącego wpływu technologii wytwarzania oraz dodatku zbrojenia rozproszonego na wartość analizowanego parametru.

W odniesieniu do badań odporności na działanie wody i mrozu oraz wyników oznaczeń wytrzymałości na rozciąganie pośrednie stwierdzono, że największą wytrzymałością charakteryzowały się mieszanki w tradycyjnej technologii HMA. Porównywalne wyniki z mieszanką referencyjną uzyskały próbki z mniejszą zawartością włókien bez względu na temperaturę wytwarzania. Dodatek włókien aramidowych nie wpłynął istotnie na zmianę wytrzymałości na pośrednie rozciąganie, a w przypadku włókien polimerowo-bazaltowych i zawartości do 0,3% w mieszankach z lepiszczem wysokomodyfikowanym poprawiło wartość analizowanego parametru. Mieszanki z dodatkiem włókien polimerowo-bazaltowych wytwarzane w obniżonych temperaturach uzyskały korzystniejsze wyniki parametru ITSr w odniesieniu do mieszanek wytwarzanych „na gorąco” niż mieszanki z dodatkiem włókien aramidowych. Analiza wyników w etapie II pozwoliła Autorce wykluczyć z badań w kolejnym etapie mieszanek o najwyższych zawartościach włókien z uwagi na niespełnienie wymagań technicznych. Autorka zdecydowała również, że w etapie III pominięty zostanie wariant o temperaturach technologicznych obniżonych o 15°C z uwagi na ograniczony efekt takiej redukcji. Wspomniany kolejny etap badań omówiony jest w rozdziale 4.6 pt. „Etap III – badania zaawansowane mieszanek mineralno-asfaltowych”. Zgodnie z przyjętym planem zakres badań obejmował badania zagęszczalności, sztywności metodą rozciągania pośredniego, zespolonego modułu sztywności, odporności na zmęczenie oraz modułu sztywności pełzania oraz analizy statystyczne wieloczynnikowe w celu określenia interakcji między poszczególnymi zmiennymi. Ocena zagęszczalności wykonana została w badaniu w prasie żyrotorowej i poprowadzona została w dwóch częściach. W pierwszej analizie poddano wpływ technologii (temperatury wytwarzania) na parametry zagęszczalności mieszanek z trzema lepiszczami. Analizie poddano wskaźnik zagęszczalności K, wskaźnik stabilności zagęszczonych próbek MSI oraz indeks odporności MRI. Stwierdzono, że najgorszą zagęszczalność charakteryzowały się mieszanki z asfaltem HiMA, a technologia wytwarzania nie wpłynęła w znaczący sposób na ten parametr. Wykazano korzystny wpływ technologii WMA na odporność na deformacje trwałe w trakcie eksploatacji. Kolejna część analizy uwzględniała parametry zagęszczalności mieszanek w zależności rodzaju i ilości zastosowanych włókien oraz z uwzględnieniem dwóch technologii tj. HMA i WMA-30°C. Przeprowadzone analizy obszerne i szczegółowe, natomiast można ogólnie podsumować, iż

obniżanie temperatur technologicznych i dodatek włókien powoduje wzrost wskaźników MSI i MRI, natomiast nie wpływa znacząco na wskaźnik zagęszczalności. W dalszej części badań przeprowadzono analizę rozkładu wolnych przestrzeni poprzez porównanie wartości w próbkach żyatorowych i mniejszych rdzeni z nich wyciętych, co również potwierdziło wpływ analizowanych czynników na tę cechę.

W rozdziale 4.6.2 przedstawiono badania wpływu ilości i rodzaju włókien w mma na sztywność metodą rozciągania pośredniego IT-CY w funkcji temperatury. Ponownie ocena prowadzona była etapami, w pierwszym oceniano wpływ technologii, a w drugim technologii i dodatku włókien. Badania prowadzone były w trzech temperaturach, tj. 5, 15 i 20°C. Wykazano, iż stosowanie asfaltów modyfikowanych i stopień ich modyfikacji istotnie wpływa na obniżenie sztywności mieszanki, niezależnie od temperatury i technologii. Wpływ rodzaju lepiszcza jest istotnie większy niż wpływ dodatku włókien w ujęciu ich rodzaju i ilości. Porównując wpływ włókien, większe oddziaływanie stwierdzono w przypadku włókien polimerowo-bazaltowych niż aramidowych. W kolejnym rozdziale przeprowadzono badania wpływu ilości i rodzaju włókien w mma na zespolony moduł sztywności w zakresie temperatury od -10 do +35°C i częstotliwości od 0,1 do 25 Hz. Autorka opracowała krzywe wiodące modułu sztywności oraz przeprowadziła analizy statystyczne modułu sztywności w wybranych warunkach badania. Analiza krzywych wiodących polegała głównie na porównywaniu położenia krzywych wiodących w niskich i wysokich częstotliwościach. W pierwszym przypadku za korzystniejsze uznawano mieszanki o wyższej sztywności, jako potencjalnie bardziej odporne na koleinowanie. W wysokich częstotliwościach, które reprezentują zachowanie w niskiej temperaturze, preferowane są mieszanki o mniejszej sztywności. Przyjmując taką interpretację wykazano korzystniejsze właściwości mieszanek z asfaltem modyfikowanym. Wpływ technologii rozumianej jako warunki temperaturowe wytwarzania był mniej jednoznaczny i potwierdziły to również analizy statystyczne. Dalszy etap analiz obejmował analizy rozszerzone o wpływ rodzaju i ilości zbrojenia. Wnioski z analiz są bardzo złożone, natomiast ogólnie Autorka wskazała na korzystny wpływ włókien polimerowo-bazaltowych na właściwości w wysokich temperaturze mieszanek WMA z asfaltem modyfikowanym, natomiast włókna aramidowe wpłynęły korzystnie na właściwości mieszanki z asfaltem 50/70. Kolejny rozdział prezentuje wyniki badania zmęczenia metodą IT-FT w trybie kontrolowanych naprężeń w temperaturze 10°C. Prezentacja wyników i ich analiza sprowadziła się do podania wartości odkształcenia początkowego ϵ_0 odpowiadających trwałości zmęczeniowej na poziomie 10 tys., 50 tys. i 100 tys. cykli. Analizy statystyczne podobnie były prowadzone wg takiej samej metodyki jak w rozdziałach poprzednich, na wstępie oceniając wpływ technologii i rodzaju asfaltu, a w drugiej rozszerzając zakres o wpływ zbrojenia rozproszonego. Analiza wyników potwierdziła ogólnie znaną zależność o korzystnym wpływie modyfikacji asfaltów. Istotne jest natomiast, iż Autorka wykazała korzystny wpływ dodatku włókien i brak istotnego wpływu technologii. W ostatnim rozdziale etapu III Autorka przedstawia wyniki badania pełzania statycznego, zakres badań i analiz jak we wcześniejszych analizach. Ogólnie badania potwierdziły korzystny wpływ asfaltów modyfikowanych. Autorka zwróciła również uwagę na korzystny wpływ technologii WMA, szczególnie w mieszankach z

asfaltem modyfikowanym. Nie stwierdziła natomiast korzyści w zakresie modułu pełzania z zastosowania włókien i zwiększania ich zawartości. Kolejny rozdział pracy 4.7 zatytułowany jest „Optymalizacja składu mieszanek mineralno-asfaltowych i jest ściśle związany z tytułem pracy. Jego celem jest optymalizacja w celu określenia rodzaju i zawartości zbrojenia rozproszonego w składzie mieszanek mineralno-asfaltowych, które zapewni uzyskanie najkorzystniejszej kombinacji właściwości mieszanki. W analizach zastosowano metodę jednoczesnej optymalizacji wielu zmiennych z wykorzystaniem tzw. funkcji użyteczności. Analiza przeprowadzona została dwuetapowo – najpierw dla wszystkich zbadanych właściwości (analiza nazwana jako analiza wszechstronna) i analiza w zakresie właściwości wysokotemperaturowych. Funkcje użyteczności pozwoliły Autorce na dokonania standaryzacji średnich wyników badań i określeniu ich użyteczności wyrażonej liczbą w zakresie od 0 do 1, gdzie 1 jest wartością najlepszą. W pierwszym etapie opracowano tablicę z wynikami użyteczności 11 różnych właściwości mieszanek uzyskanych w przeprowadzonych badaniach, z uwzględnieniem rodzaju asfaltu, technologii produkcji, rodzaju i zawartości włókien. W ostatniej kolumnie przedstawiono sumaryczny wskaźnik użyteczności będący wartością średnią użyteczności cząstkowej dla danego wariantu mma. Autorka przeprowadziła analizę użyteczności cząstkowych i wskaźnika użyteczności. Wskazała m.in. PRD wzrasta (maleje odporność na koleinowanie) wraz z ilością dodawanego zbrojenia. Ocena wynikowa wskaźnika użyteczności wskazała na relatywnie najlepsze właściwości mieszanek na gorąco z PMB 45/80-55, a dodatek włókien wpływał korzystnie na ogólną ocenę właściwości mma. Autorka przygotowała również odrębne zestawienia prezentujące wskaźnik użyteczności w podziale na poszczególne rodzaje asfaltu. Powstały trzy listy rankingowe mieszanek, które podlegały dalszej analizie. Przy takim podziale Autorka wskazała m.in., iż w każdym przypadku najwyższy wynik uzyskała mieszanka na gorąco z włóknem. Obniżanie temperatur produkcji powodowało spadek wskaźnika użyteczności, jednak dodatek włókna w przypadku mma z PMB pozwolił na poprawę w porównaniu do mieszanki referencyjnej w tej samej technologii. W dalszej części analizy przeprowadzono ocenę wskaźnika użyteczności dla mieszanek WMA-30°C. W tym przypadku najkorzystniej wypadły mieszanki z PMB 45/80-55 z 0,3% włókna polimerowo-bazaltowego, a najgorszymi mieszankami pozostały asfalty również z włóknem polimerowo-bazaltowym (0,3%). W kolejnym etapie Autorka przeprowadza analizę użyteczności tzw. właściwości wysokotemperaturowych, w której grupa ocenianych parametrów zredukowana została do czterech (wyniki koleinowania, pełzania i moduł sztywności w temp. 35°C). Ocena użyteczności wskazała jako najlepsze mieszanki z asfaltem PMB i HiMA. Natomiast obniżenie temperatury produkcji pogarszało odporność na deformacje trwałe. W przypadku mieszanek WMA-30°C dodatek włókien korzystnie wpływał na odporność na koleinowanie (PRDair). Najkorzystniej w tych warunkach oceniona została mieszanka z asfaltem HiMA i dodatkiem włókien PB, co potwierdziły również wyniki pełzania. Analiza z podziałem na rodzaj asfaltu wskazała na korzystny wpływ technologii HMA i zbrojenia włóknami na wskaźnik użyteczności. Podsumowując całość analizy użyteczności w odniesieniu do tzw. właściwości wysokotemperaturowych Autorka wskazuje, że najkorzystniejszym rozwiązaniem są mieszanki z asfaltem PMB lub HiMA z dodatkiem 0,3%

włókna PB. Końcowy 5 rozdział pracy prezentuje wnioski końcowe i kierunki dalszych badań. Autorka formułuje 4 wnioski główne i 13 wniosków szczegółowych. Wnioski główne w swojej treści potwierdzają słuszność wcześniej sformułowanych tez rozprawy doktorskiej i takie też stwierdzenia finalizuje podsumowanie pracy. Na koniec Autorka przedstawia możliwe kierunki dalszych badań, które m.in. powinny obejmować rozszerzenie bazy asfaltów, rodzajów włókien, rozszerzenia metodyki badawczej i zastosowanie granulatu asfaltowego.

4 Ocena merytoryczna rozprawy

Recenzowana rozprawa dotyczy problematyki związanej z koniecznością redukcji nakładów energetycznych i emisji, która jest obecnie tematem o dużym znaczeniu zarówno w kontekście ochrony środowiska jak i wpisuje się w trendy poszukiwań nowych możliwości technologicznych w tym zakresie. Powiązanie technologii WMA z zastosowaniem zbrojenia włóknami w celu zapewnienia trwałości nawierzchni drogowej jest interesującym i ważnym kierunkiem badań.

Po zapoznaniu się z pracą oraz w nawiązaniu do jej omówienia przedstawionego w poprzednim punkcie recenzji, przedstawiam ocenę merytoryczną w wymaganych kwestiach.

Pracę pod względem układu można podzielić na następujące części: część studialną obejmującą wprowadzenie i przegląd literatury, który został podsumowany i określone zostały tezy i cele pracy doktorskiej, oraz część badawczą w której zaprezentowany jest plan badań, metodyka oraz wyniki badań wraz z analizą. Praca zakończona została podsumowaniem z przedstawieniem wniosków, odniesieniem się do tez pracy i wskazaniem potencjalnych dalszych kierunków działań. Zamieszczony jest również wykaz literatury, norm, spis tabel, rysunków i załączników. Szczegółowy układ pracy z omówieniem części składowych został omówiony w poprzednim punkcie recenzji. Oceniam, że układ pracy prawidłowy.

Autorka przeprowadziła obszerne studia literatury z odniesieniem do 214 pozycji literatury, na podstawie których sformułowała trzy tezy oraz podstawowe cele rozprawy. Zakres przeglądu literatury i dobór piśmiennictwa uważam za prawidłowy.

Cel pracy dotyczy optymalizacji składu betonu asfaltowego wytwarzanego w obniżonych temperaturach z zastosowaniem technologii asfaltu spienionego i zbrojenia rozproszonego oraz analiza wpływu rodzaju lepiszcza asfaltowego oraz włókien wzmacniających (aramidowych oraz polimerowo-bazaltowych) na właściwości wysokotemperaturowe mieszanki mineralno-asfaltowej. Jest on ściśle związany w tytule rozprawy i powiązany z tezami pracy postawionymi przez Autorkę. Należy podkreślić, że postawiony pracy jest bardzo złożony, uwzględnia jednocześnie wiele zmiennych, które mogą mieć wpływ na właściwości mieszanki mineralno-asfaltowej. Nieco dyskusyjny jest dla mnie termin właściwości wysokotemperaturowe, co przedstawiam w części opinii prezentującej pytania i uwagi do pracy. Oceniam postawiony cel pracy jako prawidłowy.

Zasadnicza część badań laboratoryjnych w zakresie oceny wpływu włókien oraz obniżonych temperatur technologicznych została przeprowadzona na mieszance betonu asfaltowego AC 11 S do warstwy ścieralnej. Autorka opracowała szczegółowy plan badawczy z podziałem na kolejne etapy. Założyła, że skład mieszanki mineralnej i zawartość lepiszcza są

stałe. W zakresie zmienianych składników: trzy rodzaje asfaltu (drogowy, PMB i HiMA), dwa rodzaje włókien (aramidowe i bazaltowo-polimerowe) o zmiennej zawartości (po trzy poziomy zawartości dla każdego rodzaju włókna oraz skład porównawczy bez włókien). W zakresie zmiennych parametrów technologicznych wykonano mieszanki w technologii na gorąco oraz WMA przy obniżonej temperaturze zagęszczenia. W etapie I zaplanowano badania lepiszczy asfaltowych, których celem było ustalenie optymalnych parametrów procesu spieniania lepiszczy asfaltowych, co stanowiło podstawę do ich dalszego zastosowania w mieszankach mma. Analizie poddano trzy asfalty (50/70, PMB 45/80-55, PMB 45/80-80.) w zakresie właściwości podstawowych przed i po spienieniu, tj. penetracji, temperatury mięknięcia, temperatury łamliwości wg Fraassa, lepkości dynamicznej, nawrotu sprężystego. W zakresie oceny procesu spieniania dla każdego lepiszcza testowano 9 kombinacji (zmienne: 3 temperatury asfaltu i trzy poziomy ilości wody spieniającej). W kolejnym etapie przeprowadzono badania mieszanki AC 11 S w różnych kombinacjach wynikających ze zmienności rodzaju lepiszcza, rodzaju włókna i jego zawartości oraz temperatur technologicznych (mieszanka na gorąco oraz mieszanka WMA z asfaltem spienionym przy temperaturze zagęszczania obniżonej o 15 i 30 °C. Oceniano podstawowe właściwości mieszanek zgodnie z WT-2 2014, w tym: zawartość wolnych przestrzeni, odporność na deformacje trwałe i odporność na działanie wody i mrozu. W etapie III zaplanowano bardziej zaawansowane badania mieszanek w zakresie zagęszczalności w prasie żyratorowej, sztywności (metoda IT-CY), zespolonego modułu sztywności, odporności na zmęczenie i pełzanie.

Autorka przedstawiała metodykę badań laboratoryjnych na poszczególnych etapach. W zakresie lepiszczy opisano proces przygotowania próbek oraz poszczególnych badań tj. penetracji, temperatury mięknięcia, temperatury łamliwości, lepkości dynamicznej, nawrotu sprężystego i oceny parametrów spieniania asfaltu. Następnie opisała proces produkcji i zagęszczania mieszanki AC w warunkach laboratoryjnych. Określone zostały temperatury technologiczne w zależności od rodzaju asfaltu i technologii produkcji (HMA, WMA) oraz warunki starzenia technologicznego, jak również warunki i energia zagęszczania próbek w zależności od metody. Autorka przedstawia opisy metod badania podstawowych właściwości mieszanek mineralno-asfaltowych, takie jak: gęstość, gęstość objętościowa, zawartość wolnych przestrzeni, odporność na deformacje trwałe, odporność na działanie wody i mrozu (ITSR), zagęszczalności w prasie żyratorowej, sztywności metodą rozciągania pośredniego (IT-CY), zespolonego modułu sztywności i kąta przesunięcia fazowego metodą ściskania cyklicznego, odporności na zmęczenie metodą IT-FT oraz modułu sztywności pełzania.

Po przeprowadzonej analizie pozytywnie oceniam plan i metodykę badań i uważam za odpowiedni do realizacji założonego celu pracy. Pewne uwagi lub pytania przedstawiam w kolejnej części recenzji.

Zasadniczą częścią pracy jest część badawcza, w której Autorka prezentuje wyniki badań, poddaje je analizom i przedstawia wnioski cząstkowe. Należy podkreślić, że program badań był niezwykle obszerny i uwzględniał bardzo dużo zmiennych. Tym samym analiza wyników stanowiła duże wyzwanie naukowe dla Autorki, która podeszła do tego w sposób bardzo

usystematyzowany. Badania i analizy podzielone były na etapy, które były ze sobą powiązane. Prezentacja wyników głównie w formie wykresów lub tablic prezentujących wartości średnie. Do analiz wyników użyte zostały zaawansowane metody analiz, w tym przede wszystkim metod statystycznych, w tym m.in. prezentacja tzw. powierzchni odpowiedzi, analiza wariancji zmiennych zależnych, ocenę istotności różnic między średnimi, analizy optymalizacyjne (w zakresie doboru parametrów spieniania), opracowanie krzywych wiodących modułu zespolonego oraz optymalizację z zastosowaniem tzw. funkcji użyteczności i indeksu użyteczności. Na podkreślenie zasługuje bardzo duża ilość przeprowadzonych analiz, co niewątpliwie wymagało odpowiedniego nakładu pracy. Świadczy to również o biegłości w prowadzeniu zaawansowanych analiz statystycznych. Autorka w każdym przypadku przeprowadza dyskusję wyników i formułuje wnioski własne. Patrząc ogólnie na część badawczą, to pomimo niewątpliwych zalet przeprowadzonych analiz uważam, że warto również prezentować i analizować wyniki w tzw. „inżynierski” sposób, np. pokazując porównania przyrostów koleiny, wykresy pełzania, wykresy charakterystyk zmęczeniowych czy kąta przesunięcia fazowego. Uwzględnienie takich elementów mogłoby nie tylko wesprzeć wnioski z przeprowadzonych analiz, ale również być czytelniejsze i atrakcyjniejsze dla odbiorcy. Po zapoznaniu się z treścią tej części pracy oraz po przeprowadzonej analizie jej zakresu przedstawionej w poprzednim punkcie recenzji pozytywnie oceniam część badawczą i omówienie wyników badań. Pewne uwagi i pytania w tym zakresie przedstawiam w dalszej części opinii.

Autorka nie przedstawia w sposób bezpośredni informacji co do praktycznego zastosowania wyników. Nie mniej jednak biorąc pod uwagę wnioski z przeglądu literatury można stwierdzić, że w związku z rosnącymi wymaganiami w zakresie ogólnie pojętej ochrony środowiska technologia asfaltu spienionego ma potencjał wdrożeniowy, a przedstawiona praca udowadnia, że możliwe jest uzyskanie mieszanek o odpowiednich właściwościach, w tym również dzięki zastosowaniu tzw. zbrojenia rozproszonego.

5 Uwagi redakcyjne, merytoryczne oraz pytania do Doktorantki

Po zapoznaniu się z treścią rozprawy przedstawiam następujące uwagi, komentarze i pytania:

I. Na początku pracy znajduje się notatka wskazująca, iż badania zostały wykonane w ramach projektu badawczego Techmatstrateg. Proszę o wskazanie czy przedstawioną pracę doktorską należy traktować jako samodzielną, wyodrębnioną część pracy zbiorowej, a jeżeli tak to jaki indywidualny wkład Autorki w jej powstanie.

II. Przegląd literatury, podrozdział 2.1.1 jest dość nieuporządkowany, niektóre stwierdzenia się powtarzają.

III. Uważam, że opisy rysunków powinny być przetłumaczone na język polski.

IV. Mam wątpliwość czy stwierdzenie z rozdziału 2.1.2 o obniżeniu (temperatury) o 20-30°C jest w zgodzie z danymi w tablicy 2.1.

V. Uważam, że korzystne byłoby wydzielenie osobnego rozdziału o asfalcie spienionym jako wiodącym temacie pracy od podrozdziałów 2.1.x i osobne podsumowanie z przedstawieniem jego wad i zalet.

VI. W omawianiu zalet WMA warto wskazać, że nie wszystkie z nich można uzyskać jednocześnie. Np. jeżeli celem WMA jest możliwość skutecznego ułożenia i zagęszczenia mma w niekorzystnych warunkach termicznych, to raczej nie będzie obniżana temperatura produkcji.

VII. Z opisu technologii asfaltu spienionego nie wynika wprost skąd bierze się obniżenie temperatury produkcji, skoro asfalt jest podgrzewany do wysokiej temperatury 160-180°C (str. 26). Proszę o wyjaśnienie skąd się bierze znaczne obniżenie temperatur technologicznych, które w przeliczeniu na oszczędność energii może sięgać nawet 30-40% (str.31). Czy to jest to Pani zdaniem realne do uzyskania w produkcji na WMB?

VIII. Czy pozytywny wpływ piany asfaltowej na proces mieszania i otoczenia kruszywa utrzymuje się również na etapie wbudowania? Czy stosowanie asfaltu spienionego może wydłużyć możliwy czas transportu lub ułatwić zagęszczenie warstwy w niekorzystnych warunkach termicznych?

IX. W przeglądzie literatury można wskazać wiele sformułowań, które są nieprecyzyjne lub błędne, np.

- a. Str. 8 – „wysokiej jakości beton asfaltowy” wskazany jako bliżej nieokreślona innowacyjna metoda,
- b. Str. 11 – „mieszanki niskotemperaturowe” – takie pojęcie nie funkcjonuje w użyciu, z kontekstu wynika, że chodzi o mieszanki WMA, czyli mieszanki na ciepło
- c. Str.16 - „modyfikacja struktury zakładów produkcyjnych” – lepiej napisać, iż potrzebne są modyfikacje instalacji na wytwórniach mma,
- d. Str. 20 – technologia asfaltu spienionego określona jest dość nietrafnie jako „metoda budowy dróg”
- e. Str. 49 – termin „materiał zbrojeniowy” jest nieodpowiedni w odniesieniu do włókien. Dyskusyjne jest również iż włókna tworzą w mieszance sieć strukturalną, co sugeruje iż pojedyncze włókna współpracują między sobą. Niezrozumiały jest również termin „makro włókna”.
- f. Str. 57 – Stwierdzenie „mieszanki na warstwę wiążącą modyfikowaną asfaltem PMB 25/55-60” nie jest prawidłowe
- g. Str. 58 – termin „badaniach pośrednich obciążeń rozciągających” lepiej zastąpić powszechnie używany terminem „badanie rozciągania pośredniego” i utrzymać termin w ustalonym zapisie (w pracy są trzy wersje nazwy tego samego badania).

X. Str. 28 – Wskazano, że jednym z atutów WMA jest „obniżenie temperatury, przy której przeprowadza się proces transportu i wbudowania”. Można zakładać, że istotą tego zdania jest niższa temperatura transportowanej mma, w czym jednak trudno znaleźć szczególną zaletę. W dalszej części tego akapitu czytamy: „Dodatkowo, istotna różnica w temperaturze zauważalna jest także w trakcie procesu układania”. Jest to w zasadzie powtórzenie wcześniejszego zdania, ponieważ „wbudowanie” i „układanie” należy rozumieć

tak samo. Dodatkowo na stronie 30 w logicznej sprzeczności są dwa wymienione aspekty technologiczne WMA, tj. „spowolnienie tempa ochładzania się mieszanki mineralno-asfaltowej – poprzez mniejszą różnicę temperatur między mieszanką a otoczeniem” i „zmniejszenie czasu potrzebnego do wychłodzenia się ułożonej warstwy – pozwala to na szybsze wbudowanie kolejnych warstw oraz udostępnienie nawierzchni do ruchu samochodowego”.

XI. Str. 28/29 – Ilustracje na rysunkach 2.9 i 2.10 niewiele wnoszą, wskazany byłby dodatkowy komentarz na co należy zwrócić na nich uwagę.

XII. Str. 31 – Procedura starzeniowa powinna być raczej opisana w części badawczej, wraz z innymi procedurami.

XIII. Str. 36 – Wskazano, iż mma z włóknami charakteryzują się zwiększoną trwałością zmęczeniową i odpornością na koleinowanie oraz iż, „Takie właściwości sprawiają, że mieszanki te mogą znajdować zastosowanie w nawierzchniach dróg, które są obciążone ruchem od lekkiego do ciężkiego (od kategorii KR1 do KR7)”. Trudno w tym zdaniu doszukać się specjalnych zalet czy celu stosowania włókien. Moim zdaniem raczej należałoby wskazać np., iż stosowanie włókien ze względu na powyższe jest szczególnie zasadne w nawierzchniach bardziej obciążonych lub np. w nawierzchniach remontowanych albo warstwach antyzmęczeniowych.

XIV. Str. 40 – „Stosowanie włókien celulozowych do mieszanek mineralno-asfaltowych o ciągłym uziarnieniu nie przynosi efektów zbrojenia mieszanki ze względu na ich ograniczoną długość.” – czy należy rozumieć, że gdybyśmy stosowali dłuższe włókna celulozowe, to efekt zbrojenia byłby osiągnięty?

XV. Str. 44 – „Badania wykazały, że stosowanie włókien bazaltowych w konstrukcji dróg o wysokim natężeniu ruchu redukuje konieczność przeprowadzania prac remontowych 1,5 krotnie” – to zdanie nie jest precyzyjne – czy chodzi o wydłużenie okresów między kolejnymi remontami czy o coś innego?

XVI. Str. 44 – Czy na rys. 2.21 są włókna aramidowe czy mieszanina włókien aramidowych i innych? To samo pytanie dotyczy Str. 64. - czy rzeczywiście używano włókna aramidowe czy mieszankę włókien aramidowych i innych, czy to były włókna dostępne na rynku?

XVII. Str. 45 – Zdanie o 40% wpływie lepiszcza na odporność mma na koleinowanie należałoby rozszerzyć i wskazać co odpowiada za pozostałe 60%.

XVIII. Str. 46 – W rozdziale o ocenie właściwości wysokotemperaturowych obok metod badań asfaltów i mma, które charakteryzują właściwości funkcjonalne (eksploatacyjne) w wysokiej temperaturze, dodano również badanie lepkości, które dotyczy głównie zachowania właściwości lepiszcza w procesie technologicznym. Łączenie właściwości technologicznych i eksploatacyjnych pod jednym terminem „właściwości wysokotemperaturowych” jest niezrozumiałe i nie wynika z rozdziału 2.4, w którym omawiano zagadnienie zmian klimatycznych na właściwości wysokotemperaturowe.

XIX. Str. 47 – W opisie badań cyklicznego jednoosiowego i trójosiowego ściskania brakuje stwierdzenia, że jest to tzw. pełzanie pod obciążeniem powtarzalnym.

XX. Str.48 – Badanie modułu dynamicznego wg AASHTO jest również metodą badania modułu zespolonego, te dwa punkty należałoby połączyć. Definicja modułu zespolonego jest nieprecyzyjna. Nie jasne jest również dlaczego ta metoda ma być stosowana do próbek o „zakładanej zawartości wolnych przestrzeni”.

XXI. Str. 48 – Koleinowania nie wykonuje się z wykorzystaniem powietrza lub wody, tylko w próbka jest albo w otoczeniu powietrza, albo umieszczana w wodzie. Przyrost koleiny i nachylenie wykresu koleinowania to są raczej tożsame pojęcia, a nie dwa różne.

XXII. Str. 49 – Umieszczenie badania stabilności i odkształcenia wg Marshalla jest moim zdaniem niepotrzebne, a jeżeli to powinny być wskazane wady i ograniczenia tej metody, która od wielu lat nie jest już stosowana.

XXIII. Str. 56 – Podając wyniki trwałości zmęczenia mma, należy podać również temperaturę. Podobnie na stronie 81.

XXIV. Str. 56 – Spękania w nawierzchni rok po wykonaniu wskazują raczej na błędy lub np. wystąpienie spękań termicznych, bez doprecyzowania można mieć wątpliwości, czy brak spękań na odcinku z włóknami wynika faktycznie z ich zastosowania.

XXV. Str. 59 – Ostatnie zdanie podsumowania raczej nie znajduje potwierdzenia w przeglądzie literatury, ponieważ właściwości niskotemperaturowe praktycznie nie były omawiane.

XXVI. Str. 61 – W tekście są dwie tezy pracy a wymieniono trzy. Podawanie rozwinięcia skrótów z jęz. angielskiego w środku pracy, podczas gdy były już stosowane i wymienione w wykazie na wstępie jest zbędne

XXVII. Str.62 – Oznaczenie kategorii ruchu KR5-7 jest błędne, ponieważ zgodnie z WT-2 beton asfaltowy w warstwie ścieralnej nie stosuje się do KR7.

XXVIII. Str. 62 – Ponownie pojawia się termin właściwości wysokotemperaturowe mma, które obejmują zagęszczalność, sztywność ITCY, moduł zespolony, zmęczenie i pełzanie. W tym przypadku również uważam, że obejmowanie tak różnych cech, w tym technologicznych, reologicznych i mechanicznych (badanych również w relatywnie niskiej temperaturze) nie jest najlepszym rozwiązaniem. Termin właściwości wysokotemperaturowe bym wiązałem z odpornością w wysokiej temperaturze, czyli koleinowanie, pełzanie, ewentualnie właściwości reologiczne w wysokiej temperaturze. Zmęczenie badane typowo w temperaturze pośredniej np. 10 czy 20°C nie jest właściwością wysokotemperaturową. Tym bardziej do tego terminu trudno również zaliczyć badanie modułu zespolonego, np. w temperaturze -10°C co zapisano w planie badań.

XXIX. Str. 69 - Plan badań w pewnym sensie dublował ocenę niektórych właściwości, zespolony moduł sztywności i moduł IT-CY, odporność na koleinowanie i moduł sztywności pełzania. Potwierdziły to też wnioski z tych badań, które w zasadzie były spójne. Pytanie do Autorki jaki był cel takiego podejścia i czy jednak nie warto było ograniczyć programu badań i z których metody wówczas zrezygnować? Ponadto termin „odporność na zjawisko zmęczenia” powinien być zastąpiony terminem odporność na zmęczenie lub trwałość zmęczeniowa.

XXX. Str. 69 i dalej od str. 95. – Procedura przygotowania asfaltu do badań po spienianiu nie podaje szczegółów w zakresie temperatury i czasu przygotowania asfaltu do

badania. Chciałbym również zapytać jaki był powód prowadzenia takich badań? Czy chodziło o ocenę „starzenia technologicznego” w procesie spieniania czy też porównanie właściwości asfaltów po produkcji w technologii na gorąco i w technologii asfaltu spienionego. Z jednej strony Autorka wykazuje, że są pewne różnice istotne statystycznie, ale z drugiej czy jest to wpływ procesu spieniania, a może inne czynniki o tym zdecydowały – np. dodatkowe wygrzewanie w suszarce po spienieniu?

XXXI. Str. 75 – Zdanie „Zawartość wolnej przestrzeni (V_a) jest podstawowym parametrem, który stanowi istotny wskaźnik zagęszczenia próbek mieszanek mineralno-asfaltowych.” jest mylące, ponieważ wskaźnik zagęszczenia w technologii nawierzchni asfaltowych oznacza coś zupełnie innego. Dalej w opisie niektórych metod badań nie podano liczby próbek, a w prezentacji wyników ograniczono się do wartości średnich.

XXXII. Str.77 – Parametry zagęszczania: wskaźnik zagęszczalności K , wskaźnik stabilności zagęszczonych próbek MSI oraz indeks odporności MRI zostały zbyt pobieżnie przedstawione w opisie metodyki badań, a w szczególności ich interpretacja, tym bardziej, iż nie są one powszechnie stosowane.

XXXIII. Str. 77 – W części przedstawiającej metodykę badań zabrakło opisu oceny rozkładu wolnych przestrzeni V_a , która jest następnie omówiona na stronie 140. Opis jest jednak dość nieprecyzyjny, nie zdefiniowano co oznacza V_{a-c} , nie jest zrozumiałe również stwierdzenie „docelowa wartość V_{a-r} wynosiła 3%”.

XXXIV. Str. 80 – w zakresie badania trwałości zmęczeniowej nie podano normy badawczej i temperatury badania. Opis metodyki jest dość pobieżny, jego uzupełnienie można znaleźć przy prezentacji wyników na stronie 168. Brak jest informacji o liczbie próbek oraz o rozrzucie wyników, co jest krytyczne w badaniach zmęczeniowych. W p. 4.6.4. jest mowa o regresji uzyskanych wyników, nie precyzując o które wyniki chodzi. Autorka wspomina również o „określeniu krzywych zmęczeniowych”. Niestety w pracy nie ma tych wykresów, ani wyników regresji. Można było również pokazać i porównać typowe przebiegi badań zmęczeniowych. W opisie badań zmęczeniowych zabrakło również informacji jakie ostatecznie kryterium decydowało o zmęczeniu próbki – czy jej zniszczenie czy osiągnięcie granicznej wartości przemieszczenia? Powstaje również pytanie dlaczego do badań zmęczeniowych wybrano metodę rozciągania pośredniego, która nie jest metodą zalecaną w ocenie odporności na zmęczenie. Kontynuując sprawę badań zmęczeniowych – na str. 168 – Na jakiej podstawie wybrano poziomy trwałości zmęczeniowej 10 tys., 50 tys. i 100 tys. cykli, które były wartościami odniesienia do wyznaczenia odkształceń początkowych? Czy te wartości nie powinny obejmować szerszego zakresu, np. między 10 tys. a 1 mln cykli? Jakie były poziomy trwałości zmęczeniowej uzyskiwane w badaniach?

XXXV. Str. 79 – Opis badania modułu zespolonego jest dość skromny i nie przedstawia tego co najważniejsze, czyli modułu zespolonego jako liczby zespolonej, kąta przesunięcia fazowego, interpretacji reologicznej. Formalnie należy rozróżnić pojęcie modułu zespolonego będącego liczbą zespoloną od długości (normy) modułu zespolonego, która w zagadnieniach dotyczących mieszanek mineralno-asfaltowych nazywana jest modułem sztywności lub sztywnością. Ponadto (Str. 150 – Rozdział 4.6.3) analiza modułu zespolonego została

sprawdzona do analizy modułu sztywności (długości modułu zespolonego) i praktycznie pominięto ocenę kąta przesunięcia fazowego czy fazy lepkiej i sprężystej modułu. Jedynym akcentem jest wykres Blacka dla wąskiego zakresu wyników.

XXXVI. Str. 84 – Brak charakterystyki zastosowanych włókien, np. długość, średnica. Czy to były produkty dostępne na rynku?

XXXVII. Str. 109 – Wniosek dotyczący asfaltu PMB 45/80-55 powinien również dotyczyć temperatury 110°C.

XXXVIII. Str. 110 – Czy istotnie zawsze „Spienianie lepiszczy asfaltowych nie wpływało istotnie na pogorszenie ich właściwości (...)” ? – np. na nawrót sprężysty HIMA, czy PiK dla wszystkich asfaltów. W mojej ocenie taką analizę warto podsumować łącznym zestawieniem, które by wskazywało wpływ istotny spieniania i informację czy jest to korzystne czy nie dla właściwości asfaltu. To byłoby bardziej czytelne i pozwoliłoby na bardziej precyzyjne wnioski.

XXXIX. Str. 132 – W podsumowaniu poprzedniego etapu stwierdzono, że w tym etapie nie będzie uwzględniany wariant „-15°C”, tymczasem jednak jest on ujęty.

XL. Str. 141 – Warto zachować tą samą skalę na rysunkach 4.41 a, b, c dla łatwiejszego porównania.

XLI. Str. 143 – W jaki sposób dobrano temperatury badania modułu ITCY? Trudno również kwalifikować te wartości jako wysokotemperaturowe, a raczej jako średnie temperatury eksploatacyjne. Dlaczego na wykresach zaprezentowano jedynie wartości średnie, bez przedziałów ufności?

XLII. Str. 187 – Indeks użyteczności wyznaczony w tabeli 4.91 należy wg mnie traktować z dużą rezerwą z wielu powodów. Po pierwsze oceniane są równocześnie i z taką samą wagą różne cechy: technologiczne (zageszczalność K), funkcjonalne (koleinowanie, zmęczenie), powiązane funkcjonalnie (ITSR, pełzanie) i mechaniczne (sztywność). Takie podejście powoduje, że nie doszacowano DI mieszanek z asfaltami HiMA, których wyniki został zaniżony przez niską ocenę zagęszczalności i ocenę sztywności wg ITCY i E*. Jest powszechnie wiadomo, a zostało to również wykazane w tej pracy, że mieszanki z asfaltami wysokomodyfikowanymi mają niższą sztywność. Natomiast rekompensują to bardzo dobrymi parametrami w zakresie odporności na zmęczenie, pękanie, koleinowanie itd. W przypadku tych modułów wątpliwości budzi ich ocena użyteczności w temperaturach pośrednich, np. 5 czy 35°C. Przy jakich wartościach użyteczność jest największa a przy jakich najmniejsza? Wartość tzw. „wszechstronnej” oceny wskaźnika użyteczności jest również ograniczona z tego powodu, iż żadna z metod nie dotyczyła odporności na pękanie, np. wg TSRST czy SCB. W tabeli 4.95 dokonano oceny użyteczności w zakresie tzw. właściwości wysokotemperaturowych. Widać, że po eliminacji niektórych właściwości ocena mieszanek z asfaltami HiMA jest już znacznie korzystniejsza, co potwierdza mój wcześniejszy komentarz w tym zakresie. Warto również zwrócić uwagę, że ocena użyteczności wg modułu E w temperaturze 35°C, daje praktycznie odwrotne wyniki w porównaniu do wyników użyteczności wg koleinowania czy pełzania. Wynika to prawdopodobnie z faktu, iż sztywność w tej temperaturze niekoniecznie ma związek z odpornością na deformacje, które powstają w

wyższej temperaturze. Nie znany jest też czas obciążenia (częstotliwość) dla której określony został moduł sztywności. Ta uwaga dotyczy tablic 4.91 i 4.96.

XLIII. W dalszych kierunkach badań proponowałbym uwzględnić również badania odporności niskotemperaturowej, która jest szczególnie istotna dla warstw ścieralnych.

6 Podsumowanie oceny rozprawy

Na postawie przeprowadzone oceny rozprawy stwierdzam, że Autorka podjęła się bardzo ważnego i jednocześnie złożonego zagadnienia. Realizacja założonych celów pracy wymagała zarówno przeprowadzenia studiów literatury i starannego zaplanowania badań z podziałem na etapy pracy, ale również wiązała się z koniecznością wykorzystania różnorodnych i w zaawansowanych metod analiz statystycznych, którymi Autorka bardzo sprawnie się posłużyła. Na uwagę zasługuje również duża dokładność opisywania wyników złożonych analiz statystycznych. Na podstawie analizy przedstawionej rozprawy uważam, że Autorka wykazała się wysokim poziomem ogólnej wiedzy teoretycznej w dziedzinie nauk inżynieryjno-technicznych w dyscyplinie inżynieria lądowa, geodezja i transport. Złożoność podjętego zagadnienia, umiejętność doboru metod badawczych, planowania eksperymentu, analiz statystycznych i wnioskowania dowodzi wysokich umiejętności prowadzenia pracy naukowej przez Autorkę, a rozprawa stanowi oryginalne rozwiązanie problemu naukowego.

Praca napisana właściwym językiem pod względem technicznym. Przedstawione powyżej uwagi nie umniejszają walorów pracy. Ich wykorzystanie przez Autorkę może być przydatne w prowadzeniu dalszych prac, ale również w aspekcie wykorzystania wyników rozprawy w kolejnych publikacjach naukowych.

7 Wniosek końcowy

Stwierdzam, że opiniowana 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” spełnia wymagania określone w ustawie z dnia 20.07.2018 r. Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce. Przedkładam niniejszą recenzję z wnioskiem o przyjęcie pracy jako rozprawy doktorskiej oraz dopuszczenie do publicznej obrony.

Dr hab. inż. Wojciech Bańkowski, prof. IBDiM

Warszawa, kwiecień 2025

Recenzja spełnia wymagania funkcje

DYREKTOR NAUKOWY DISCYPLINY
Inżynieria Lądowa, Geodezja i Transport

Wawrz
prof. dr.hab. inż. Jerzy Wawrzętczyk