

Dr hab. inż. Paweł Mieczkowski, prof. ZUT
Katedra Dróg i Mostów
Wydział Budownictwa i Architektury
Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny w Szczecinie

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

Szczecin, 26 listopad 2019 r.

OPINIA

na temat rozprawy doktorskiej mgr inż. **Mikołaja Bartkowiaka**
pt. „**Wpływ właściwości asfaltu i składu mieszanki mineralno-asfaltowej na cechy reologiczne
betonu asfaltowego o wysokim module sztywności**”

wykonanej pod kierunkiem:

dra hab. inż. Mieczysława Słowika, prof. Politechniki Poznańskiej – promotora
oraz **dra inż. Roberta Studzińskiego** – promotora pomocniczego

1. Podstawa opracowania recenzji

Podstawą formalną do wykonania recenzji rozprawy doktorskiej jest pismo Pana Dziekana Wydziału Budownictwa i Inżynierii Lądowej Politechniki Poznańskiej prof. dr hab. inż. Tomasza Mroza z dnia 02.10.2019 r. (WB.63.189.2019), realizującego uchwałę Rady Wydziału Budownictwa i Inżynierii Lądowej Politechniki Poznańskiej z dnia 27.09.2019 r.

2. Ocena rozprawy

2.1. Ogólna charakterystyka rozprawy

Przedstawiona do recenzji praca doktorska ma charakter pracy analityczno-badawczej. Została przedstawiona na 266 stronach formatu A4, łącznie z częścią załącznikową. Część zasadnicza pracy liczy 220 stron i składa się ze spisu treści i załączników, wykazu podstawowych oznaczeń i skrótów, słownika pojęć, streszczenia w j. polskim i angielskim, wprowadzenia, dziewięciu rozdziałów głównych oraz bibliografii. Nie załączono spisu tablic i rysunków. Załączniki, zawierające wyniki badań lepkości i mieszanek mineralno-asfaltowych oraz elementy analizy statystycznej, zapisano na 46 stronach. Spis literatury obejmuje 136 pozycji zwartych (monografie, artykuły, dokumenty techniczne), 39 pozycji odnosi się do norm przedmiotowych (europejskich i amerykańskich) i 19 pozycji to odwołania do witryn internetowych.

Opiniowana rozprawa dotyczy opracowania modeli analityczno-empirycznych pozwalających wyznaczyć moduł sztywności i kąt przesunięcia fazowego mieszanek typu beton asfaltowy o wysokim module sztywności w oparciu o wybrane parametry lepiszczy asfaltowych (moduł ścinania i kąt przesunięcia fazowego) oraz właściwości mieszanek mineralno-asfaltowych (zawartość wolnych przestrzeni w MMA i MM, wypełnienie wolnych przestrzeni w MM asfaltem, uziarnienie, zawartość lepiszcza).

Doktorant w oparciu o przegląd literatury przygotował program badań laboratoryjnych asfaltów i mieszanek mineralno-asfaltowych (MMA) w zakresie niezbędnym do opracowania modeli analityczno-empirycznych. Sposób jego realizacji, wyniki z uzyskanych oznaczeń, ich analiza oraz wnioski zostały przedstawione w poszczególnych rozdziałach pracy.

Mogę stwierdzić, że tytuł rozprawy, podjęta tematyka badawcza jest aktualna i interesująca pod względem naukowym, zatem jej wybór i przedstawienie w rozprawie doktorskiej uznaję za merytorycznie uzasadnione.

Rozdział 1 – Projektowanie mieszanek mineralno-asfaltowych

Rozdział składa się z 11 podrozdziałów. Zdaniem recenzenta treść rozdziału nie znajduje odzwierciedlenia w jego tytule, który wprost odnosi się do metodyki projektowania MMA.

W dwóch pierwszych podrozdziałach (po bardzo ogólnym wstępie) zawarto ogólne informacje na temat okresu eksploatacji nawierzchni oraz systemów wspomagania procesów inwestycyjnych i utrzymaniowych. Cztery kolejne podrozdziały dotyczą wpływu lepiszcza na właściwości mieszanek mineralno-asfaltowych z uwzględnieniem procesu starzenia oraz metodyki doboru asfaltu wg kryteriów Superpave. W podrozdziałach od 8 do 10 omówiono metodykę badania odporności odpowiednio na spękania niskotemperaturowe, spękania zmęczeniowe oraz trwałe odkształcenia lepkoplastyczne. Rozdział kończy podsumowanie.

Rozdział 2 – Beton asfaltowy o wysokim module sztywności

Rozdział składa się z siedmiu podrozdziałów głównych.

W rozdziale zawarto informacje na temat betonów asfaltowych o wysokim module sztywności (AC WMS), rozwoju technologii tego rodzaju mieszanek we Francji, tamtejszych wymagań jak również krajowych zapisów odnośnie AC WMS. Przedstawiono przykłady zastosowań we Francji i w Polsce z rozwiązaniami w zakresie konstrukcji oraz problemami technologicznymi powiązаныmi z tego rodzaju mieszankami (spękania niskotemperaturowe).

Rozdział 3 – Teza, cel i zakres rozprawy

W oparciu o studium literatury i doświadczenia własne Autor sformułował tezę, która dotyczy możliwości opracowania modeli analityczno-empirycznych do określenia modułu sztywności $|E^*|$ i kąta przesunięcia fazowego Φ dla betonu asfaltowego o wysokim module sztywności w oparciu o wybrane parametry asfaltu, tj. moduł ścinania $|G^*|$ i kąt przesunięcia fazowego δ .

W rozdziale przedstawiono również cele pracy, z których jeden sklasyfikowano jako podstawowy, natomiast kolejnych siedem jako pozostałe. Znalazły się również zapisy odnośnie potwierdzenia wiarygodności modelu analityczno-empirycznego na podstawie testów statystycznych oraz zakres pracy w postaci krótkiego streszczenia poszczególnych rozdziałów.

Rozdział 4 – Moduł sztywności i kąt przesunięcia fazowego MMA oraz moduł ścinania i kąt przesunięcia fazowego asfaltu

Rozdział składa się z dwunastu podrozdziałów głównych i jest nakierunkowany na właściwości mieszanek mineralno-asfaltowych (11 podrozdziałów), a głównie modułu sztywności. Obok metod

wyznaczania modułu sztywności zwrócono uwagę na wpływ wybranych czynników (m.in. zagęszczenia, uziarnienia) na uzyskiwane wartości oraz wpływ samego modułu sztywności (a w niektórych przypadkach również kąta przesunięcia fazowego) na konstrukcję nawierzchni, spękania niskotemperaturowe, zmęczenie czy też deformacje lepkoplastyczne. Ogólne informacje na temat metodyki wyznaczania modułu ścinania i kąta przesunięcia fazowego asfaltu zawarto w jednym podrozdziale.

Rozdział 5 – Modele analityczno-empiryczne do określania zespolonego modułu sztywności mieszanek mineralno-asfaltowych

Rozdział składa się z czternastu podrozdziałów głównych, w których przedstawiono najbardziej rozpowszechnione modele analityczno-empiryczne do wyznaczania zespolonego modułu sztywności MMA. Na podstawie analizy literatury wytypowano dwa modele, które miały stanowić bazę do opracowania modelu pozwalającego na szacowanie wartości modułu sztywności w badaniu belki zginanej 4PB-PR. Do tej grupy Autor zaliczył model Witczak–El-Badawy i model Hirscha. Ponadto w oparciu o literaturę, dla modelu Witczak-Bari przedstawiono analizę dotyczącą wpływu zmienności parametrów modelu na uzyskiwany wynik (wrażliwość).

Rozdział 6 – Niepewność pomiaru oraz inne zagadnienia statystyczne

Rozdział składa się z dziesięciu podrozdziałów głównych. W jego zakresie znalazły się informacje na temat niepewności pomiaru (łącznie z metodami jej wyznaczania i oceny), tolerancji, sposobu analizy uzyskiwanych wartości w zależności od liczebności próby oraz powtarzalności i odtwarzalności wyników badań. Autor odniósł się również do zapisów normowych odnośnie niepewności pomiaru w badaniu modułu ścinania i kąta przesunięcia fazowego asfaltu oraz modułu sztywności i kąta przesunięcia fazowego mieszanek mineralno-asfaltowych jak również konieczności wzorcowania urządzeń pomiarowych. Ważnym z punktu widzenia tematyki rozprawy jest rozdział poświęcony określeniu wskaźników jakości dopasowania modelu, uwzględniających precyzję i bias wartości obliczonych z modelu i pomierzonych w badaniach.

Rozdział 7 – Badania laboratoryjne i analiza ich wyników

Rozdział składa się z szesnastu podrozdziałów głównych. W pierwszym podrozdziale przedstawiono plan badań laboratoryjnych, w kolejnych zapisy odnośnie przygotowania próbek oraz wyniki z przeprowadzonych oznaczeń, zarówno mieszanek mineralno-asfaltowych jak i lepiszczy. Uzyskane wyniki poddano analizie oraz ocenie niepewności pomiaru w odniesieniu do modułu ścinania i kąta przesunięcia fazowego dla asfaltów oraz modułu sztywności i kąta przesunięcia fazowego mieszanek mineralno-asfaltowych.

Rozdział 8 – Opracowanie modeli analityczno-empirycznych

Rozdział składa się z czternastu podrozdziałów głównych. W pierwszym podrozdziale przedstawiono dwa wzory do obliczania modułu sztywności MMA typu AC WMS oznaczanego metodą belki zginanej 4 PB-PR, stanowiące zmodyfikowane postacie wzorów z modelu Witczak–El-Badawy (model A) i modelu Hirscha (model B). W dalszych podrozdziałach znalazły się informacje na temat parametrów modeli, tj. efektywnej zawartości asfaltu, wolnych przestrzeni w MMA, uziarnienia oraz modułu ścinania i kąta przesunięcia fazowego asfaltu. W rozdz. 8.7 zaprezentowano dodatkowy wzór pozwalający wyznaczyć moduł sztywności MMA typu AC WMS wyłącznie w oparciu o moduł ścinania asfaltu (model GE). Autor rozprawy za właściwą uznał funkcję potęgową. Optymalizacja współczynników zmodyfikowanych wzorów z modeli Witczak–El-Badawy i Hirscha, porównanie modeli, sprawdzenie normalności rozkładu błędów bezwzględnych, ocena uzyskanych efektów oraz

analiza wrażliwości (wyłącznie dla modelu B – na podstawie modelu Hirscha) stanowią kolejnych 5 podrozdziałów. W rozdz. 8.13 omówiono modele pozwalające oszacować wartość kąta przesunięcia fazowego MMA w oparciu o ich moduł sztywności (oznaczony w badaniach i obliczony z modelu B) oraz na podstawie wartości kąta przesunięcia fazowego asfaltu (model KPF). W ostatnim podrozdziale zestawiono statystyki jakości dopasowania modeli w zakresie modułu sztywności i kąta przesunięcia fazowego.

Rozdział 5 – Posumowanie

Rozdział składa się z dwóch podrozdziałów głównych.

W pierwszym podrozdziale przedstawiono wnioski końcowe. Podstawowym był wybór optymalnych (najistotniejszych) modeli prezentowanych w rozprawie. W zakresie modułu sztywności Autor wytypował dwa: model GE oraz model B. W przypadku kąta przesunięcia fazowego MMA wybór padł na model KPF.

W tej części znalazły się również wnioski niezwiązane bezpośrednio z badaniami i analizami przeprowadzonymi w ramach rozprawy (np. dotyczące kryterium konwencjonalnego oceny trwałości zmęczeniowej MMA). Zdaniem recenzenta tego rodzaju stwierdzenia można zawrzeć w przeglądzie literatury. Wnioski w pracach analityczno-badawczych powinny być powiązane z zakresem wykonanej pracy.

W drugim podrozdziale nakreślono kierunki dalszych prac, które podzielono na dwie grupy. Pierwszą stanowiły prace bezpośrednio powiązane z tematyką rozprawy (m.in. rozwój modeli, opracowanie algorytmu wyznaczania modułu sztywności i kąta przesunięcia fazowego metodą 4PB-PR łącznie z określeniem powtarzalności i odtwarzalności wyników czy też wybór krzywych wiodących dla asfaltu i MMA). Drugą grupę stanowiły prace „w dalszej perspektywie” związane z modelowaniem parametrów asfaltu i MMA, wpływem modułu sztywności na podatność do deformacji czy na spękania niskotemperaturowe, pogłębianie wiedzy z zakresu starzenia asfaltów czy też prace nad implementacją nowoczesnych metod do projektowania nawierzchni drogowych.

Literatura

Bibliografia wykorzystana w pracy jest dość obszerna i obejmuje 194 pozycje, z czego 136 to monografie, artykuły, materiały konferencyjne i dokumenty techniczne, 39 pozycji odnosi się do norm przedmiotowych (europejskich i amerykańskich), natomiast 19 pozycji to odwołania do witryn internetowych.

Pewne zastrzeżenie może budzić brak numeracji w części bibliograficznej (monografie, artykuły), ale jest to związane ze sposobem cytowania przyjętym w rozprawie. Ponadto:

- w zestawieniu norm europejskich we wszystkich przypadkach numer normy jest niepełny. Brak roku jej wprowadzenia, co jest bardzo ważne ze względu na zmiany w zapisach (przynajmniej w niektórych przypadkach) odnośnie metody badawczej.
- w spisie witryn internetowych nie podano daty dostępu.

2.2. Aktualność tematu

Rozprawa doktorska mgra inż. Mikołaja Bartkowiaka dotyczy istotnego problemu z zakresu szeroko rozumianej technologii drogowej, a uściślając możliwości szacowania wartości modułu sztywności i kąta przesunięcia fazowego mieszanek mineralno-asfaltowych typu AC WMS wyznaczonego w badaniach belki zginanej 4 PB-PR na podstawie parametrów powiązanych ze składem mieszanki oraz właściwościami asfaltu (moduł ścinania i kąt przesunięcia fazowego).

Moduł sztywności MMA jest bardzo istotną wielkością charakteryzującą właściwości tego materiału. Jako parametr jest wykorzystywany przede wszystkim procesie projektowania nowych nawierzchni oraz wzmocnień bądź remontów istniejących metodami mechanicznymi bądź mechaniczno-empirycznymi. Służy również do oceny jakości projektowanych mieszanek mineralno-asfaltowych. Dotyczy to głównie betonów asfaltowych o wysokim module sztywności. Idea tego rodzaju mieszanek oraz pierwsze ich zastosowania dotyczą Francji. Miała to być odpowiedź na problem powstawania trwałych deformacji w nawierzchniach asfaltowych przy coraz większym obciążeniu dopuszczalnym osi pojazdów samochodowych. Wysokie moduły sztywności w tego rodzaju mieszankach uzyskuje się wykorzystując stosunkowo twarde asfalty bądź polimeroasfalty. Dodatkowym czynnikiem przemawiającym za wykorzystywaniem mieszanek typu AC WMS w konstrukcjach drogowych jest ich wysoka trwałość zmęczeniowa, uzyskana dzięki odpowiednio zaprojektowanemu składowi (duża zawartość asfaltu, niska zawartość wolnych przestrzeni).

Moduły sztywności wyznacza się w badaniach laboratoryjnych różnymi metodami. Norma europejska PN-EN 12697-26:2018-08 umożliwia oznaczenie tego parametru dziewięcioma metodami (2 PB-TR, 2 PB-PR, 3 PB-PR, 4 PB-PR, IT-CY, CIT-CY, DTC-CY oraz DT-PR), które dają zróżnicowane wartości modułu sztywności. Powstaje zatem pytanie, która z metod jest właściwa? W przypadku projektowania nawierzchni metodą MEPDG wykorzystuje się metodę DM (osiowe ściskanie dynamiczne) i dla tej metody opracowano modele analityczno-empiryczne szacowania wartości modułu sztywności. W Polsce moduł sztywności, zgodnie z obowiązującym dokumentem technicznym WT-2:2014 (jak również jej wcześniejszymi wersjami), należy wyznaczyć metodą belki zginanej 4 PB-PR. Na chwilę obecną brak jest pośredniej metody (analityczno-empirycznej) dedykowanej tej właśnie procedurze wyznaczania modułu sztywności. Dodatkowy problem stanowi również dostosowanie modeli mechaniczno-empirycznych projektowania nawierzchni w oparciu o moduły sztywności uzyskiwane z metody 4 PB-PR.

Autor, w części dotyczącej przeglądu literatury, wskazuje również, że moduł sztywności (jak i kąt przesunięcia fazowego) mieszanek mineralno-asfaltowych może być wskaźnikiem klasyfikującym mieszanki pod kątem ich odporności na deformacje trwałe, spękania niskotemperaturowe czy też trwałość zmęczeniową. To potwierdza uniwersalność tego parametru i przydatność w ocenie mieszanek mineralno-asfaltowych.

Reasumując, przedstawiona do oceny praca dotyczy aktualnego problemu związanego z możliwością szacowania modułu sztywności i kąta przesunięcia fazowego mieszanek mineralno-asfaltowych typu AC WMS na podstawie składu mieszanki (jej cech fizycznych) oraz właściwości reologicznych asfaltu (modułu ścinania, kąta przesunięcia fazowego). Tego rodzaju umiejętność pozwoli na skrócenie czasu projektowania mieszanek mineralno-asfaltowych i obniżenie kosztów tego etapu, ale również może się przysłużyć optymalizacji konstrukcji nawierzchni drogowych poprzez lepsze doszacowanie wartości modułu sztywności w oparciu o rzeczywisty skład mieszanki mineralno-asfaltowej (Badanie Typu).

2.3. Ocena programu i zakresu badań

Program (plan) badań laboratoryjnych został przedstawiony w rozdz. 7.1 i obejmował mieszanki mineralno-asfaltowe oraz lepiszcza. Z założenia wyniki uzyskane z badań miały służyć opracowaniu modelu analityczno-empirycznego do wyznaczania modułu sztywności i kąta przesunięcia fazowego betonów asfaltowych o wysokim module sztywności. W zakresie mieszanek mineralno-asfaltowych przeprowadzenie oznaczeń modułu sztywności i kąta przesunięcia fazowego, zawartości lepiszcza rozpuszczalnego, składu granulometrycznego, gęstości i gęstości objętościowej (na podstawie masy

próbek oraz wymiarów). W przypadku asfaltów w planie było wykonanie oznaczenia modułu ścinania i kąta przesunięcia fazowego w reometrze dynamicznego ścinania DSR, odporności na starzenie krótkoterminowe RTFOT oraz typowych badań, takich jak: temperatura mięknięcia wg PiK, penetracja, temperatura łamliwości wg Fraassa. W sumie oznaczenia wykonano na 5 asfaltach drogowych i trzech modyfikowanych polimerami.

Badaniom poddano dziesięć mieszanek mineralno-asfaltowych, z czego trzy opracowano i przebadano specjalnie na potrzeby projektu badawczego, pozostałe siedem badanych było w ramach standardowych działań LD GDDKiA w Poznaniu. Jako lepiszcze zastosowano asfalt drogowy 20/30 (sześć mieszanek: MMA1 – MMA6) i asfalty modyfikowane polimerami PMB 25/55-60 (MMA7), PMB 25/55-80 (MMA8 oraz MMA10) oraz PMB 45/80-65 (MMA9). Większość mieszanek mineralno-asfaltowych zostało sklasyfikowanych jako betony asfaltowe o wysokim module sztywności. Wyjątek stanowiły dwie mieszanki typu beton asfaltowy (MMA8 i MMA10) ze względu na zaniżone wartości modułu sztywności oraz mieszanka MM9. Wątpliwości recenzenta budzi użycie w badaniach mieszanki typu SMA Jena (MMA9), zarówno ze względu na jej strukturę (pośrednia, bliżej kontaktowej) oraz rodzaj lepiszcza, niededykowany mieszankom AC WMS. Zastanawiać może również stwierdzenie Autora, że włączono ją do programu jako mieszankę porównawczą.

Program badań został przedstawiony dość szczegółowo. Poszczególne etapy są racjonalne, zawarto informacje na temat rodzaju badań i metodyki ich wykonania. Przewidziany w pracy zakres wykonanych oznaczeń nie budzi większych zastrzeżeń. Jedyna uwaga dotyczy braku etapu planowania eksperymentu, a co za tym idzie również informacji na temat wyboru kruszyw, rodzaju lepiszcza czy też ilości próbek do poszczególnych oznaczeń.

W zakresie czynności przewidzianych w pracy Autor uwzględnił przeprowadzenie szczegółowych analiz, opartych o testy statystyczne, m.in. z zakresu niepewności pomiaru i tolerancji wyników.

Podsumowując można uznać, że przyjęty program badań jest właściwy, a uzyskane wyniki z oznaczeń zapewniają realizację postawionego w pracy celu.

2.4. Teza i cel naukowy

W rozprawie sformułowano jedną tezę (rozdz. 3.2). Dotyczyła ona możliwości opracowania modeli analityczno-empirycznych do określenia modułu sztywności $|E^*|$ i kąta przesunięcia fazowego Φ , których wyniki będą odpowiadały wartościom uzyskanym w badaniach laboratoryjnych metodą belki zginanej (4PB-PR). Modele miały być dedykowane mieszankom betonu asfaltowego o wysokim module sztywności (AC WMS) w zróżnicowanych warunkach temperatury i częstotliwości obciążania. W modelach wykorzystano moduł ścinania $|G^*|$ i kąt przesunięcia fazowego δ asfaltu oznaczane w urządzeniu DSR oraz podstawowe dane o składzie mieszanki mineralno-asfaltowej (AC WMS).

Podstawowym celem pracy (nawiązującym do tezy) było opracowanie modeli analityczno-empirycznych pozwalających na określenie modułu sztywności E_{4PB} i kąta przesunięcia fazowego Φ mieszanek betonu asfaltowego o wysokim module sztywności (AC WMS) na podstawie właściwości asfaltu (modułu ścinania $|G^*|$ i kąta przesunięcia fazowego δ oznaczonych metodą DSR) oraz podstawowych danych o składzie mieszanki mineralno-asfaltowej.

Wyartykułowano również dodatkowe cele, w niektórych aspektach nawiązujące do tezy, w innych bazujące na danych literaturowych w aspektach częściowo odbiegających od głównego zagadnienia rozprawy (np. „Przedstawienie własnej koncepcji systemu wspomagającego proces inwestycji i utrzymania dróg, w której położono szczególny nacisk na korelację wyników badań laboratoryjnych uzyskiwanych na etapie budowy odcinka drogi z danymi uzyskanymi z urządzeń pomiarowych podczas eksploatacji tego odcinka drogi”).

W tej części znalazły się również zapisy odnośnie spełnienia warunków potwierdzających wiarygodność modeli analityczno-empirycznych.

2.5. Struktura rozprawy, język i redakcja pracy

Strukturę pracy można uznać za właściwą, przy czym zdaniem recenzenta część wstępna (opisowa) jest zbyt rozbudowana – zajmuje ponad 65% objętości tekstu. W kilku przypadkach również problematyka jest niezwiązana (bezpośrednio) z tematem rozprawy. Przykładem tego może być rozdział 1 (Projektowanie mieszanek mineralno-asfaltowych), którego tytuł nie do końca odzwierciedla zakres materiału tam zawarty, a tematyka związana np. ze spękaniami niskotemperaturowymi, zmęczeniowymi czy też podatnością na deformacje trwałe nie znajduje się w zakresie badań i analiz przeprowadzanych w rozprawie. Najbardziej wartościowymi ze względów naukowych są rozdziały 7 i 8, odnoszące się do części badawczo-analitycznej.

Pewne zastrzeżenia można mieć również do objętości poszczególnych podrozdziałów (np. rozdz. 5.10 – dwa zdania, rozdz. 7.4 – cztery zdania, rozdz. 7.6 – jedno zdanie i jeden wykres, rozdz. 7.9 – dwa zdania i jedna tabela, rozdz. 8.5 – dwa zdania) i potrzeby ich wyodrębniania.

Pod względem edytorskim rozprawa jest napisana poprawnie, język techniczny odpowiada tematyce i poruszonym zagadnieniom. W pracy pojawiają się pojedyncze błędy o charakterze redakcyjnym, np.:

- nieuzasadnione są w tekście pracy wtrącenia typu (str. 16): „Problemy z nieścistością definicji lub ich brakiem bywają też bardzo istotne w sądownictwie, gdzie dla jednej ze stron postępowania sądowego mogą się okazać korzystne, a dla drugiej niekorzystne”;
- skrót „wg.” pisze się bez kropki (wg);
- na str. 69 jest powołanie na rys. 2 – powinno być „rys. 4.4”;
- w tabl. 7.5 błędny wynik oznaczonej wartości dla MMA3. Jest: 5.96%, powinno być (prawdopodobnie): „5.06”;
- dwukrotnie umieszczono spis załączników (str. 4 w części zasadniczej i str. 3 w części załącznikowej). Numeracja stron załączników w spisie części zasadniczej jest niewłaściwa;
- we wzorach (8.6) i (8.7) moduł sztywności wyznaczony w badaniach laboratoryjnych oraz obliczony w oparciu o model B ma takie samo oznaczenie (E_{4PB}). Zdaniem recenzenta wartość (np.) teoretyczna powinna mieć dodatkowy indeks.

Część graficzna pracy jest estetyczna, rysunki wykonano ze starannością, w sposób czytelny i przejrzysty. Wyjątek mogą stanowić:

- ze względu na jakość rys. 1.6 i rys. 1.7;
- brak oznaczeń na rys. 1.2 i rys. 1.12
- na rys. 7.29 i rys. 7.30 błędnie opisana jednostka. Jest [MPa], powinno być: [Pa];
- na rys. 8.4 wartości obu osi powinny mieć taką samą dokładność (ilość cyfr po przecinku).

Przyjęta numeracja tabel i rysunków uwzględnia numer rozdziału głównego, co pozwala na szybkie ich usytuowanie w pracy.

3. Uwagi krytyczne i dyskusyjne, pytania do pracy

Po zapoznaniu się z treścią rozprawy zwrócono uwagę na pewne niedociągnięcia, na które doktorant powinien zwrócić uwagę, a w niektórych przypadkach również odnieść się do nich. Poniżej przedstawiono przykłady:

1. Autor we wprowadzeniu napisał, że w 2012 roku wystąpiły spękania warstw podbudów wykonanych z AC WMS, a nie przykrytych innymi warstwami. Zdaniem recenzenta spękania

- warstw z AC WMS nie dotyczyły wyłącznie warstw podbudów nie przykrytych wyżej leżącymi warstwami. Spękania pojawiały się również w konstrukcjach, w których występowała warstwa zabezpieczająca (ścieralna bądź wiążąca).
2. Na str. 23 jest napisane: „Nie wnikając w szczegóły procesów chemicznych i fizycznych zjawiska starzenia autor pracy chciałby zwrócić uwagę na elementy istotne ze względu na tematykę rozprawy. Zmiany w strukturze chemicznej asfaltu, spowodowane działaniem tlenu, prowadzą do pogorszenia jego właściwości” – oddziaływanie tlenu w okresie eksploatacji nawierzchni (przy typowych mieszankach mineralno-asfaltowych) dotyczy wyłącznie lepiszcza z warstwy ścieralnej. Autor w pracy analizuje wpływ parametrów lepiszcza na moduł sztywności i kąt przesunięcia fazowego mieszanek typu AC WMS, które znajdują się w niższych warstwach konstrukcyjnych.
 3. W tab. 1.1 (str. 24) przedstawiono wyniki badań lepiszcza wyjściowego, po wymieszaniu w otaczarni oraz z nawierzchni. Brak w tekście informacji jakiej warstwy to dotyczy oraz po jakim czasie eksploatacji przeprowadzono badania lepiszcza.
 4. Na str. 24-25 przedstawiono model matematyczny Olivera pozwalający na obliczenie prognozowanej lepkości asfaltu z nawierzchni po y latach od jej oddania do użytkowania. W tekście brak informacji na temat umiejscowienia warstwy w konstrukcji. Ponadto Autor twierdzi, że uzyskano obiecujące wyniki zgodności lepkości prognozowanej z wynikami oznaczeń, bazując wyłącznie na rocznej średniej dziennej minimalnej temperaturze powietrza (czyli jakiej?).
 5. Autor opierając się na wynikach badaczy stwierdził, że zwiększenie zawartości asfaltu powoduje zwiększenie trwałości zmęczeniowej, przy czym istnieje pewne ekstremum zawartości lepiszcza, po której przekroczeniu trwałość zmęczeniowa zaczyna się zmniejszać. Dlaczego zdaniem Autora wysnuto tego rodzaju wnioski, szczególnie w aspekcie badania prowadzonego przy stałej amplitudzie naprężenia.
 6. Na str. 45 jest napisane, że w wytycznych francuskich dla mieszanek typu EME przewidziano wyjątkowo małą zawartość wypełniacza mineralnego, dzięki której w szkieletcie mineralnym pozostaje miejsce na większą ilość asfaltu. Stosunkowo niewielka zawartość wypełniacza nie jest jedynym czynnikiem decydującym o wolnej przestrzeni, którą wypełnia się lepiszczem (to można również regulować zawartością frakcji grysowych i piaskowych). Ważniejszym z punktu widzenia trwałości zmęczeniowych mieszanek tego typu jest grubość błonki oraz poziom strukturyzacji lepiszcza na ziarnach wypełniacza mineralnego.
 7. Na str. 53 jest napisane, że w WT-2 z 2008 roku przewidziano do mieszanki asfalt 10/15 – powinno być 10/20. W dalszej części stwierdzono, że w wymaganiach WT-2 z 2010 roku wprowadzono asfalty modyfikowane o penetracji ok. 30 mm/10 – w tym przypadku (szczególnie w odniesieniu do asfaltów modyfikowanych) powinno się precyzyjnie określić rodzaj lepiszcza: PMB 10/40-65 i PMB 25/55-60.
 8. Na str. 54 jest napisane, że w celu ograniczenia możliwości wystąpienia spękań warstw AC WMS w ostatniej wersji wymagań technicznych [WT-2 2014] wprowadzono obowiązek wykonania badania TSRST. Jaki wpływ na ograniczenie spękań ma sam wynik badania TSRST bez określenia wymagań?
 9. Na str.55 jest napisane: „Tak małą wartością modułu sztywności według doświadczeń autora rozprawy mogą się charakteryzować nawet zwykłe betony asfaltowe. Może to powodować znaczące zmniejszenie trwałości zmęczeniowej mieszanki”. Konsekwencją niższych wartości modułów sztywności nie musi być niższa trwałość zmęczeniowa mieszanki mineralno-asfaltowej. Może to natomiast wpłynąć na zmniejszenie trwałości konstrukcji ze względu na zwiększone odkształcenia rozciągające na spodzie warstw asfaltowych.
 10. Na str. 67 na rys. 4.3 przedstawiono wymiary próbki (oznaczenie modułu sztywności metodą 2PB-TR), nie podając jednocześnie, że dotyczą one mieszanki mineralno-asfaltowej o uziarnieniu do 14 mm.

11. Na str. 70 podano wzory (4.12-4.14) pozwalające wyznaczyć moduł dynamiczny $|E^*|$ metodą osiowego ściskania dynamicznego DM. Wynika z nich, że moduł sztywności wyznacza się na podstawie amplitudy naprężenia i odkształcenia bez uwzględnienia kąta przesunięcia fazowego, co jest niezgodne z zapisami normy AASHTO T234. W normie dokładnie opisano sposób wyznaczenia modułu dynamicznego i kąta przesunięcia fazowego, łącznie z uwzględnieniem parametrów przetwornika.
12. Na str. 85 (tab. 4.2) przedstawiono wyniki badania trwałości zmęczeniowej określonej na podstawie zmiany modułów sztywności (początkowego i końcowego). Wyniki dotyczą mieszanek AC WMS 16, różniących się rodzajem lepiszcza. Badania wykonano dla założonej (zbliżonej dla wszystkich próbek) wartości siły pionowej F , co skutkowało bardzo zróżnicowaną amplitudą odkształcenia. Autor stwierdził, że „warstwy nawierzchni wykonane z badanych mma będą pracowały w trybie kontrolowanego naprężenia, na co wskazuje cytowany wcześniej tekst, to prezentowane wyniki mma z asfaltami modyfikowanymi nie wskazują na ich większą trwałość zmęczeniową”. Zdaniem recenzenta przyjęte poziomy odkształcenia nie odzwierciedlają warunków pracy nawierzchni z tymi mieszankami w stanie kontrolowanego naprężenia. Różnice w zakresie odkształceń rozciągających na spodzie warstw asfaltowych czy też deformacji podłoża z mieszankami różniącymi się przyjętymi modułami sztywności będą znacznie mniejsze. Zatem wnioski dotyczące większej szkody zmęczeniowej nawierzchni z mieszankami z asfaltami modyfikowanymi również nie odzwierciedlają warunków rzeczywistych.
13. Na str. 105 jest napisane: „Autorzy zaadoptowali do ulepszanego modelu poprawki uwzględniające możliwe różne poziomy odkształcenia podczas badania i zmienność gęstości kruszywa, jednak jak sami zaznaczają, wprowadzone poprawki w niewielkim stopniu ulepszają moduł i oddziałują tylko na niektóre analizowane przypadki” – co Autor rozumie przez *ulepszanie modułu*.
14. Jednym z parametrów ulepszanego modelu Hirscha jest moduł kruszywa E_{agg} (str. 105). Brak informacji w tekście na temat metod jego wyznaczania, tj.:
 - czy określany jest dla mieszanki kruszyw czy też skały (sposób wyznaczania),
 - czy jest to moduł sprężystości, czy moduł odkształcenia?
15. Na str. 129 jest napisane, „...precyzja badań prowadzonych w DSR jest zbliżona do precyzji oznaczeń temperatury mięknięcia, co może dziwić zakładając że DSR jest urządzeniem znacznie nowocześniejszym” – zdaniem recenzenta precyzja wykonywania badań nie jest uzależniona wyłącznie *nowoczesnością aparatury*, ale również metodyką samego badania (jego prostotą).
16. Na str. 133 jest napisane: „Autor rozprawy jest pod wrażeniem działań laboratoriów drogowych GDDKIA, które przeprowadzają liczne badania międzylaboratoryjne...” – badania międzylaboratoryjne należą do obowiązkowych zadań wszystkich laboratoriów akredytowanych.
17. Na str. 138 w tabl. 7.1 (cz. II) przedstawiono zestawienie mieszanek mineralno-asfaltowych poddanych analizie. W zestawie znajduje się:
 - siedem mieszanek typu beton asfaltowy o wysokim module sztywności (AC WMS),
 - dwie mieszanki oznaczone jako beton asfaltowy (AC), które w zakresie uziarnienia, rodzaju lepiszcza i cech fizycznych odpowiadają mieszankom AC WMS (za wyjątkiem modułu sztywności)
 - jedna mieszanka mastyksowo-grysowa (SMA Jena).W związku z tym nasuwają się pytania:
 - Oznaczając mieszanki jako beton asfaltowy należy określić ich przeznaczenie (S, W, P). Do której z warstw można przypisać analizowane w pracy mieszanki mineralno-asfaltowe oznaczone jako MMA8 i MMA10?
 - W zakresie pracy analizowano mieszankę SMA Jena, która miała być mieszanką porównawczą w stosunku do mieszanek AC WMS. Jak Autor zamierzał porównywać oba tak zróżnicowane

typy mieszanek, nie tylko ze względu na uziarnienie, stopień strukturyzacji lepiszcza czy też rodzaj lepiszcza asfaltowego? Stwierdzenie, że uziarnienie mieszanki SMA Jena mieści się w polu dobrego uziarnienia dla AC WMS, nie klasyfikuje tej mieszanki w grupie mieszanek typu betonowego. Czy analiza porównawcza nie powinna być przeprowadzona w oparciu o mieszanki mineralno-asfaltowego tego samego typu?

18. W zał. nr 2 przedstawiono wyniki badań cech fizycznych uformowanych próbek (belek prostopadłościennych). Jednym z parametrów jest wolna przestrzeń V_a , której wyniki znacząco się różnią od oznaczonych na próbkach walcowych (z wyjątkiem mieszanki oznaczonej jako MMA6). Co było przyczyną zróżnicowań w wynikach i jaki to miało wpływ na wartości modułu sztywności i kąta przesunięcia fazowego. Jak to odnieść do zapisów WT-2:2014 odnośnie poziomu zagęszczenia (P_{98} - P_{100})?
19. Na str. 139 jest napisane, że do mieszanek mineralno-asfaltowych jako wypełniacz zastosowano mączkę wapienną. Brak w tekście informacji, czy we wszystkich przypadkach mączka wapienna jest dostarczana od jednego producenta (z tej samej kopalni), co w przypadku różnych dostawców może się przekładać na uziarnienie oraz powierzchnię właściwą materiału, a tym samym i poziom strukturyzacji lepiszcza na ziarnach agregatu mineralnego?
20. Na str. 142 jest napisane, że do mieszanek stosowano środek adhezyjny od różnych producentów. Czy zostało to uwzględnione w analizach statystycznych i jaki zdaniem Autora to mogło mieć wpływ na uzyskiwane wartości modułów sztywności i kąta przesunięcia fazowego?
21. Na str. 139 jest napisane, że „podczas wykonywania MMA 10 pracownicy laboratorium stwierdzili rozsegregowanie się mma, które mogło być skutkiem większej niż zazwyczaj ilości dodanego asfaltu”. Czy Autor rozprawy może to potwierdzić? Czy segregacja mieszanki nie świadczy o niewłaściwie dobranym składzie i z zasady nie powinna być odrzucona z zakresu badań?
22. Na str. 140 jest napisane, że MMA 6 została pobrana z miejsca wbudowania i przewieziona do laboratorium. Autor nie informuje, czy mieszanka wymagała ponownego rozgrzewania czy też utrzymano temperaturę zarejestrowaną w chwili jej pobrania na budowie. Czy zdaniem Autora rozprawy miejsce wytworzenia mieszanki nie ma wpływu na jej parametry fizyczno-wytrzymałościowe (laboratorium, WMB)?
23. Na str. 140 jest napisane: „Temperaturę otaczania przyjęto w zależności od rodzaju mieszanki i zastosowanego rodzaju asfaltu zgodnie z [WT-2 2014]” – w przytoczonym dokumencie nie ma zapisów na temat temperatury lepiszcza podczas otaczania kruszywa. Autor powinien ją podać w rozprawie (podobnie jak i temperaturę kruszywa), co ma bezpośredni wpływ na proces starzenia lepiszcza oraz właściwości jego i mieszanki mineralno-asfaltowej. Dotyczy to również czasu mieszania składników.
24. Na str. 141 jest napisane, że w zakresie badań było również wykonanie próbek walcowych (Marshalla), zagęszczanych przez ubijanie. Ilość uderzeń na każdą stronę próbki wynosiła 75. Przyjęta ilość uderzeń jest w przypadku mieszanki SMA Jena (MMA 9) niezgodna z WT-2:2014 oraz zapisami poradnika „Jednowarstwowa nawierzchnia asfaltowa SMA 16 JENA”, w których ilość uderzeń określono na poziomie 2×50 na stronę próbki.
25. Na str. 141 jest napisane, że wykonano z każdej mieszanki po 3-4 próbki walcowe (Marshalla). Dlaczego zatem przy określaniu gęstości objętościowej próbek w przypadku mieszanek MMA3, MMA5 i MMA6 przedstawiono wyniki dla dwóch próbek (tab. 7.4)?
26. W tab. 7.6 przedstawiono wyniki badań temperatury łamliwości, penetracji i temperatury mięknięcia lepiszczy asfaltowych. W tekście pracy brak informacji, dlaczego te oznaczenia wykonywano wybiórczo.
27. Jednym z etapów badań miało być oznaczenie odporności na starzenie krótkotrwałe lepiszczy asfaltowych metodą RTFOT. W tekście pracy brak wyników odnoszących się tego zakresu badań,

znajduje się wyłącznie informacja o wykonaniu oznaczenia modułu ścinania i kąta przesunięcia fazowego lepiszczu poddanych starzeniu wg RTFOT.

28. W rozdz. 7.13 analizowano wyniki z oznaczeń modułu ścinania i kąta przesunięcia fazowego. Asfalty twarde (20/30) sklasyfikowano w dwóch grupach ze względu na znaczne różnice w uzyskanych wartościach głównie modułu ścinania. Czy zdaniem Autora te różnice nie wynikają z typu reologicznego lepiszczu, który można określić na podstawie np. indeksu penetracji I_p wykorzystując wartości temperatury mięknięcia i penetracji. Autor częściowo wyznaczył w badaniach te parametry (przed starzeniem RTFOT), ale stwierdził również, że zamieszczono je ze względów informacyjnych.
29. W tab. 7.10 (str. 167) podano wartości temperatury i częstotliwości badania modułu sztywności 4PB-PR. Z czego wynikało zróżnicowanie w zakresie parametrów badania dla poszczególnych mieszanek mineralno-asfaltowych?
30. Na str. 167 jest napisane, że do obliczania wartości modułu sztywności E_{4PB} i kąta przesunięcia fazowego Φ wykorzystano 15 cykli (od 93 do 107 cyklu). Z czego wynikało przyjęcie właśnie takiego zakresu pomiarowego?
31. Na str. 178 jest napisane, że mieszanki mineralno-asfaltowe z asfaltem modyfikowanym w temperaturze 0°C charakteryzują się większym modułem sztywności w stosunku do mieszanek z asfaltem 20/30, co zdaniem Autora rozprawy jest nietypowym zachowaniem. Tego rodzaju stwierdzenia wymagają rozwinięcia i uzasadnienia.
32. Na str. 179 przedstawiono zmodyfikowane wzory modeli Witczak–El-Badawy oraz Hirscha. Miały one posłużyć do wyznaczania modułu sztywności metodą belki zginanej 4 PB-PR. Czy korzystanie z modeli bazowych Witczak–El-Badawy i Hirscha, przystosowanych do metody osiowego ściskania dynamicznego (DM), jest właściwym podejściem do szacowania wartości teoretycznych bazujących na metodzie belki zginanej 4PB-PR (ze względu na zróżnicowany sposób oznaczania modułu sztywności). Czy Autor podjął próby opracowania całkowicie autorskiego modelu wyznaczania modułu sztywności?
33. W tab. 8.5 (str. 185) podano wartości zmiennych do opracowania modeli, tj. wartość minimum, maksimum i średnią. W jaki sposób wyznaczono wartość średnią? Dlaczego minimalna zawartość wolnych przestrzeni wynosi 0.5% (w zał. 2 jest 0.4% - MMA1, próbka nr 1)?
34. Na str. 193 jest napisane, że „największą niedokładność obliczania modułu sztywności E_{4PB} oba modele wykazały w temperaturze 0°C.... Autor rozprawy doszukuje się tu efektów twardnienia fizycznego, które objawiają się zwiększeniem niedokładności modeli”. Do powyższego stwierdzenia nasuwają się pytania:
 - Czy w badaniach potwierdzono, że użyte lepiszczu są podatne na twardnienie fizyczne dla założonego przedziału czasowego oziębiania próbek?
 - Czy proces twardnienia fizycznego nie powinien być odzwierciedlony w wartościach modułu ścinania asfaltów?
 - Czy różnice (niedokładności) mogą być efektem skali?
35. Na str. 201 przedstawiono modele (opisane wzorami 8.6 i 8.7) umożliwiające wyznaczenie kąta przesunięcia fazowego MMA w oparciu wyłącznie o wartość modułu sztywności. Zdaniem recenzenta jednoparametrowy model jest zbytnim uproszczeniem, którego przydatność zmniejsza się wraz ze wzrostem temperatury badania (i udziałem części niesprężystej w całkowitym odkształceniu). Podobnie jest z modelem opisanym wzorem (8.6), który z kolei uzależnia wartość kąta przesunięcia fazowego MMA od kąta przesunięcia fazowego asfaltu.
36. Przedstawione w pracy modele A, B, GE i KBF opracowano na podstawie wyników uzyskanych z oznaczeń. Czy nie powinny być one zweryfikowane na podstawie wyników badań nie wykorzystanych w modelowaniu? Sugestią o tego rodzaju działaniu był zapis odnośnie mieszanki SMA Jena – „mieszanka porównawcza”?

37. W rozdziale „Wnioski końcowe” jest napisane: „Na podstawie przeprowadzonej analizy literatury i wykonanych badań stwierdza się, iż tzw. kryterium konwencjonalne oceny trwałości zmęczeniowej MMA może niewłaściwie klasyfikować MMA pod względem trwałości zmęczeniowej” – czy przeprowadzone przez Autora rozprawy badania uprawniają do stawiania tego rodzaju wniosków?
38. W rozdziale „Kierunki dalszych badań” jednym z podpunktów jest „Prace nad laboratoryjnym oznaczaniem gęstości asfaltu i upowszechnieniem pomiaru tej wielkości” – co Autor przez to rozumie?

4. Ocenia końcowa

Przedstawioną do recenzji pracę oceniam wysoko. Dotyczy to zarówno jej strony naukowej jak i formalnej, które nie budzą większych zastrzeżeń. Należy podkreślić znaczny nakład pracy autora związany z zakresem przeprowadzonych badań i analiz. Autor rozprawy wykazał się wiedzą teoretyczną z zakresu budownictwa, pracowitością i innowacyjnością oraz precyzją w zapewnieniu wiarygodności badań i opracowaniu ich wyników. Świadczy to o jego uzdolnieniach do samodzielnej pracy naukowej i rozwiązywania trudnych zagadnień badawczych.

Oceniana rozprawa stanowi oryginalne rozwiązanie problemu naukowego dotyczącego dyscypliny budownictwo, a precyzując – możliwości szacowania w oparciu o badania lepiszczy (moduł ścinania i kąt przesunięcia fazowego oznaczone w DSR) wartości modułów sztywności i kąta przesunięcia fazowego (4 PB-PR) mieszanek mineralno-asfaltowych typu beton asfaltowy o wysokim module sztywności. Szczególne znaczenie ma moduł sztywności, który jest parametrem stosowanym przy wymiarowaniu konstrukcji. Należy przy tym zaznaczyć, że mieszanki AC WMS nie znalazły się w rozwiązaniach w KTKN PiP z 2014, a co za tym idzie niezbędna jest wiedza na temat wartości tego parametru. Ponadto, wnioskowanie na temat wartości modułu sztywności (i kąta przesunięcia fazowego) w metodzie belki zginanej 4 PB-PR w oparciu o zaproponowane modele analityczno-empiryczne bazujące na parametrach lepiszcza może wpłynąć na skrócenie procedur badawczych, projektowych oraz kosztów z tym związanych.

W związku z powyższym uważam, że praca doktorska Pana mgr inż. Mikołaja Bartkowiaka spełnia wszystkie warunki określone w art. 13 ust. 1 ustawy z dnia 14.03.2003 r. o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki (Dz.U. z 2017 r. poz. 1789) i wnoszę o przyjęcie rozprawy doktorskiej oraz dopuszczenie jej do publicznej obrony.

