

Prof. dr hab. inż. Dariusz Sybilski  
Warszawa, 03.12.2019  
Instytut Badawczy Dróg i Mostów  
Ul. Instytutowa 1  
03-302 Warszawa  
e-mail: [d.sybilski@ibdim.edu.pl](mailto:d.sybilski@ibdim.edu.pl)

## **Recenzja**

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

### **1 Podstawa i cel recenzji**

Recenzja rozprawy została opracowana na podstawie uchwały Rady Wydziału Budownictwa i Inżynierii Środowiska Politechniki Poznańskiej z dnia 27 września 2019 roku oraz pisma zlecającego nr WB.63.188.2019 z dnia 02.10.2019 roku podpisanego przez Rektora prof. dr hab. inż. Tomasza Łodygowskiego.

Promotorem rozprawy jest dr hab. inż. Mieczysław Słowik, prof. ndzw. Politechniki Poznańskiej, a promotorem pomocniczym dr inż. Robert Studziński.

Przedstawiona rozprawa doktorska mieści się w dyscyplinie inżynieria lądowa i transport, specjalność budownictwo drogowe. Zgodnie z art. 13 ust. 1 Ustawy z dnia 14.03.2003 r. o stopniach i tytule naukowym oraz stopniach i tytule w zakresie sztuki (Dz.U. nr 65 poz. 595), celem recenzji jest sprawdzenie czy praca stanowi oryginalne rozwiązanie problemu naukowego, czy wykazuje ogólną wiedzę teoretyczną kandydata w danej dyscyplinie oraz jego umiejętność samodzielnego prowadzenia pracy naukowej.

### **2 Treść i zakres rozprawy doktorskiej**

Rozprawa rozpoczyna się od przedstawienia podstawowych pojęć, skrótów, oznaczeń, streszczenia oraz wprowadzenia. Zasadnicza część pracy składa się z 9 rozdziałów. Rozprawa jest przedstawiona na 220 stronach formatu A4, zawiera 5 załączników o objętości łącznej 46 stron oraz zestawienie wykorzystywanej literatury zawierającej 136 pozycji, 39 norm oraz 9 stron internetowych.

We wprowadzeniu Autor przedstawił w sposób zwięzły konieczność badań modułu zespolonego oraz wskazał główne fakty wskazujące potrzebę opracowywania modeli analityczno-empirycznych, a w szczególności modelu do wyznaczania tego parametru.

**Rozdział 1** zatytułowany jest „Projektowanie mieszanek mineralno-asfaltowych”. W rozdziale poruszonych jest wiele zagadnień ogólnych. Autor słusznie zwraca uwagę, że prognozy (projekty) trwałości eksploatacyjnej nawierzchni powinny być weryfikowane. Rozważa zasadnością prowadzenia badań laboratoryjnych w kontekście warunków eksploatacji nawierzchni, we wnioskach składając postulat, że należy dążyć do określania korelacji między wynikami badań laboratoryjnych MMA z danymi zbieranymi w systemach zarządzania i utrzymania dróg. W kolejnych podrozdziałach Autor omawia systemy wspomagające procesy inwestycji i utrzymania dróg, wpływ lepiszcza na właściwości MMA, związek między starzeniem asfaltów a trwałością mieszanek, kryteria doboru asfaltu wg Superpave i ich zastosowanie w Polsce oraz metody badań odnoszące się bezpośrednio do podstawowych mechanizmów powodujących uszkodzenia nawierzchni, tj. spękań niskotemperaturowych, deformacji trwałych i zmęczenia.

Ogólnie rozdział stanowi przegląd stanu wiedzy w zakresie wielu zagadnień, przedstawiony w sposób zwięzły i poprawny, wzbogacony o wnioski i przemyślenia własne. Już w tym rozdziale pojawia się element późniejszej tezy pracy, iż kąt przesunięcia fazowego może być istotny względem odporności na pękanie niskotemperaturowe.

**Rozdział 2** zawiera przegląd wiedzy o betonie asfaltowym w wysokim module sztywności (ACWMS). Autor przedstawia historię tej technologii, doświadczenia francuskie oraz polskie, ze szczególnym uwzględnieniem odporności na pękanie w niskiej temperaturze.

**Rozdział 3** przedstawia tezę, cele i zakres rozprawy. Wstęp stanowi podsumowanie wcześniejszych rozważań ze wskazaniem potrzeby opracowywania modeli analityczno-empirycznych. ***Tezą pracy jest możliwość opracowania w/w modeli do określenia modułu sztywności i kąta przesunięcia fazowego w metodzie 4PB na podstawie wybranych właściwości asfaltów i podstawowych danych o składzie MMA.***

Podstawowym celem pracy jest udowodnienie postawionej tezy poprzez opracowanie modeli analityczno-empirycznych. Tezę Autor udowadnia na podstawie badań laboratoryjnych oraz analiz wyników. Na wstępie pracy określone zostały również cele szczegółowe badawcze, wśród których wymieniono: analizę różnych modeli analityczno-empirycznych, ocenę możliwości wnioskowania o odporności na

podstawowe rodzaje uszkodzeń na podstawie właściwości reologicznych MMA, badania reologiczne w DSR asfaltów stosowanych do MMA w szerokim zakresie temperatury i częstotliwości obciążenia, analizę niepewności pomiarowej wybranych metod badań, przedstawienie metod wnioskowania statystycznego użytecznych w badaniach naukowych oraz przy ocenie zgodności wyrobu z określonymi wymaganiami, wskazanie na podstawie analizy literatury głównych czynników wpływających na trwałość nawierzchni drogowych oraz wielkości je charakteryzujących oraz przedstawienie własnej koncepcji systemu wspomagającego proces inwestycji i utrzymania dróg, ze szczególnym uwzględnieniem korelacji wyników badań laboratoryjnych z fazy budowy z wynikami oceny stanu nawierzchni podczas eksploatacji.

Zdefiniowany przez Autora problem badawczy został określony w sposób interesujący i właściwy. Są to zagadnienia ważna i aktualne, szczególnie ze względu na ciągły rozwój technologii MMA, stosowanie nowych materiałów (np. asfalty typu HiMA) czy też ze względu na potrzebę racjonalnego projektowania konstrukcji nawierzchni z uwzględnieniem najważniejszych właściwości materiałowych.

**Rozdział 4** zatytułowany jest „Moduł sztywności i kąt przesunięcia fazowego mma oraz moduł ścinania i kąt przesunięcia fazowego asfaltu”. Podzielony jest na kilka części, w których Autor przedstawia definicję modułu zespolonego, metody badań, wpływ sposobu zagęszczania próbek MMA, wpływ rodzaju i kształtu ziaren, problemy dotyczące stosowania różnych metod badania modułu, jego zastosowanie w projektowaniu konstrukcji, wpływ sztywności na odporność na pęknięcie niskotemperaturowe, zmęczenie i deformacje lepkoplastyczne, badania zmienności modułu sztywności i kąta przesunięcia fazowego w warstwach asfaltowych nawierzchni oraz badania modułu ścinania asfaltów. Rozdział stanowi przegląd stanu wiedzy w zakresie związanym z zagadnieniem badania ogólnie modułu zespolonego MMA i asfaltu. Przedstawione są na poziomie ogólnym wybrane metody badań z powołaniem norm europejskich i amerykańskich oraz odwołaniem do wybranych pozycji literatury. Autor wskazuje również na zagadnienia wpływu przygotowania próbek, rodzaju i kształtu ziaren kruszywa oraz metody badania na moduł sztywności MMA. Jak interesujące i wartościowe są postulaty Autora wskazujące na potrzebę podjęcia prób oceny wpływu adhezji (pośrednio przez zawartość krzemionki) oraz kształtu ziaren na wartość na sztywność MMA, co mogłoby być uwzględnione w modelach analityczno-empirycznych. Jako słuszne uważam wskazanie przez Autora zagadnień związanych z wpływem metody badania czy też zastosowania w projektowaniu konstrukcji. Ważne i celowe jest omówienie przez Autora

wpływu modułu sztywności na odporność MMA na podstawowe mechanizmy zniszczenia. Ciekawym i wartym sprawdzenia jest postulat Autora o sprawdzeniu korelacji między współczynnikiem rozszerzalności a właściwościami reologicznymi MMA. Jednak w niedawno opublikowanych badaniach Bańkowskiego (Zeszyt 81, Studia i Materiały, IBDiM 2019) wskazano, że w tym zakresie decydująca jest zawartość lepiszcza. Natomiast nie sprawdzano korelacji ze sztywnością. W dalszej części rozdziału, Autor porusza sprawę korelacji między pomiarami FWD a modułem sztywności i kątem przesunięcia fazowego w badaniach laboratoryjnych.

**Rozdział 5** jest zatytułowany „Modele analityczno-empiryczne do określania zespolonego modułu sztywności mieszanek mineralno-asfaltowych”. Jest to część pracy, którą należy również zaliczyć do przeglądu literatury, w której Autor omówił osiem modeli analityczno-empirycznych. Z punktu widzenia tezy pracy i postawionych celów przedstawione studia są bardzo ważne. Należy też dodać, że zostały przedstawione w bardzo dobry sposób, również uwzględniając własne rozważania Autora co do oceny tych modeli. Efektem przeglądu literatury jest wybór dwóch modeli, które zdaniem Autora charakteryzują się największą dokładnością, tj. modelu Witczak-El-Bidawy i model Hirscha, są najlepiej opisane w literaturze, a dodatkowo pierwszy z modeli został wykorzystany w metodzie MEPDG.

**Rozdział 6** zatytułowany jest: „Niepewność pomiaru oraz inne zagadnienia statystyczne”. W pierwszej części rozdziału Autor przedstawia zagadnienia ogólne związane z niepewnością pomiarów, sposobami analizy wyników, liczebnością próby oznaczenia, metodą obliczania niepewności pomiarowej oraz powtarzalnością i odtwarzalnością. Autor słusznie podkreśla konieczność podawania niepewności pomiaru przy przedstawianiu wyników oraz konieczność wzorcowania i kalibracji urządzeń pomiarowych. W dalszej części przedstawia przykłady szacowania niepewności pomiarowej dla wybranych metod badań asfaltu i MMA, w tym pomiaru modułu sztywności, kąta przesunięcia fazowego. W końcowym podrozdziale omówione zostały wskaźniki dopasowania modelu analityczno-empirycznego, w tym precyzję i bias.

**Rozdział 7** zatytułowany jest: „Badania laboratoryjne i analiza ich wyników”. Początek rozdziału stanowi przedstawienie planu badań asfaltów i MMA, omówienie metod przygotowania próbek do badań, a w dalszej części przedstawiane są kolejno wyniki badań. Po wstępnej ocenie zbioru mieszanek ujętej w programie, do dalszych badań Autor wybrał 8 z nich. Są to mieszanki ACWMS 16 z asfaltem drogowym 20/30, polimeroasfaltem 25/55-60 oraz asfaltem wysokomodyfikowanym 25/55-

60. Ta ostatnia mieszanka z uwagi na zbyt niską wartość modułu sztywności została zakwalifikowana jako klasyczny beton asfaltowy AC 16 do warstwy podbudowy. W zakresie badań MMA przedstawione są wyniki oznaczenia uziarnienia, gęstości, gęstości objętościowej, zawartości lepiszcza rozpuszczalnego oraz modułu zespolonego.

Przedstawiono również wyniki badań asfaltów: penetracji, temperatury mięknięcia, temperatury łamliwości oraz modułu ścinania i kąta przesunięcia fazowego w DSR. Dużym atutem pracy jest przedstawienie oceny statystycznej wyników badań, przez podanie niepewności pomiarów i powtarzalności.

**Rozdział 8** zatytułowany jest „Opracowanie modeli analityczno-empirycznych”. Z punktu widzenia tezy pracy jest to kluczowy rozdział rozprawy. W kolejnych podrozdziałach omówione są skorygowane przez Autora modele Witczak-El-Bidawy i Hirscha, dane wejściowe do modeli, ich optymalizacja, porównanie i ocena modeli, ocena statystyczna względem normalności rozkładu błędów bezwzględnych, analiza wrażliwości modelu B, modele do wyznaczania kąta przesunięcia fazowego, a na koniec zestawienie zbiorcze parametrów wszystkich analizowanych modeli.

Na początku rozdziału Autor przedstawia dwa modele znaczone jako model A i model B, które są zmodyfikowanymi przez Niego modelami Witczak-El-Bidawy i Hirscha. Zasadnicza modyfikacja polegała na usunięciu z modeli niektórych zmiennych. W odniesieniu do modelu Witczak-El-Bidawy usunięto niektóre elementy modelu charakteryzujące uziarnienie kruszywa, co wynikało z analizy wrażliwości przedstawionej we wcześniejszej części pracy. Modyfikacji uległy w tym modelu również zmienne związane z wymiarem sit (przejście z sit wg AASHTO na sita europejskie). W modelu Hirscha usunięto drugi komponent, co było postulatem zaczerpniętym z przeglądu literatury. W zakresie przygotowania danych wejściowych do modelu uwagę zwraca analiza wrażliwości modułu sztywności od zawartości wolnych przestrzeni wskazująca na istotny wpływ zagęszczenia. Autor przedstawił też równanie własne do wyznaczania gęstości objętościowej próbek belkowych z MMA na podstawie ich gęstości geometrycznej. W rozdziale 8.6 przedstawiono wielkość i zakres bazy danych uwzględnionych w optymalizacji. Optymalizacja współczynników modeli została wykonana za pomocą opcji Isqnonlin programu Matlab, z zastosowaniem nieliniowej metody najmniejszych kwadratów. Po wyznaczeniu parametrów przeprowadzono testy normalności rozkładów normalnych, które po odrzuceniu wartości odbiegających za pomocą testu Hampela, wykazały rozkłady błędów mogą być rozkładami normalnymi. Ogólnie stwierdzono, że obydwa modele charakteryzują się dużą precyzją i niewielkim biasem, ze wskazaniem na

niecو dokładniejsze dopasowanie z zastosowaniem modelu B. Biorąc pod uwagę również prostszą formę, Autor uznał ten model za bardziej użyteczny. W ocenie modeli Doktorant wskazuje, że ich dokładność można potencjalnie zwiększyć przez zwiększenie dokładności badań. Stawia również tezę, że dokładność mogłaby zostać zwiększona przez prowadzenie dodatkowych czynników związanych z wpływem rodzaju i kształtu ziaren kruszywa. W kontekście tych stwierdzeń należy zapytać, dlaczego Autor nie przeprowadził również optymalizacji z zastosowaniem oryginalnych modeli Witczak-El-Bidawy i Hirscha. Można się bowiem zastanowić, czy uproszczenie tych modeli nie spowodowało obniżenia dokładności ich dopasowania. Jako bardzo cenne i interesujące należy uznać analizy wrażliwości modelu B względem różnych zmiennych. Oprócz modelu A i B przedstawiony został również dużo prostszy model oznaczony jako GE, który pozwala wyznaczyć moduł sztywności MMA na podstawie modułu ścinania asfaltu. Ocena statystyczna modelu jest niezadowolająca, jednak ze względu na jego prostotę Autor uznał go za przydatny i możliwy do stosowania.

W drugiej części rozdziału zamieszczone są analizy modeli do wyznaczania kąta przesunięcia fazowego MMA. Zastosowano modele wybrane z przeglądu literatury oznaczone jako GE i KPF. Podobnie jak w przypadku modułu sztywności przeprowadzono optymalizację i ocenę zgodności z rozkładem normalnym. Z przeprowadzonych analiz i porównań za najlepszy uznano model KPF, który pozwala określić kąt przesunięcia fazowego MMA na podstawie kąta przesunięcia fazowego asfaltu w badaniu DSR.

**Rozdział 9** jest ostatnim rozdziałem pracy i stanowi podsumowanie pracy. Autor odwołuje się przede wszystkim do tezy pracy, wskazując na opracowane modele analityczno-empiryczne do wyznaczania modułu sztywności i kąta przesunięcia fazowego wg metody 4PB. Na tej podstawie uznaje tezę za udowodnioną. Dokonuje podsumowania w zakresie parametrów, dokładności modeli oraz analizy wrażliwości. Autor wskazuje, że modele mogą znaleźć zastosowanie na różnych etapach realizacji inwestycji drogowych. Oczywiście należy się zgodzić, że mogą one być wykorzystane na wstępnym etapie projektowania MMA. Może to posłużyć np. do wyboru optymalnego składu do dalszych badań, w tym modułu sztywności lub np. wyboru lepsza asfaltowego. Na koniec rozdziału Autor przedstawia propozycje dalszych kierunków prac badawczych.

### **3 Ocena merytoryczna rozprawy**

Recenzowana rozprawa dotyczy bardzo ważnej cechy charakteryzującej właściwości lepkosprężyste MMA, które mają zasadnicze znaczenie dla pracy konstrukcji i jej trwałości w odniesieniu do różnych mechanizmów zniszczenia. Autor dokonał obszernych studiów literaturowych, na podstawie których sformułował tezę oraz podstawowe cele rozprawy. Opracowanie modeli empiryczno-analitycznych do wyznaczenia modułu zespolonego MMA jest zadaniem trudnym i ambitnym, czego dowodzą zarówno studia literatury oraz badania własne przeprowadzone przez Autora. Istotną zaletą pracy jest zwrócenie uwagi oraz wdrożenie we własnych analizach zagadnień związanych z niepewnością pomiaru. Należy również wskazać, że w analizach wyników badań, a w szczególności w ocenie opracowanych modeli Autor biegle posługuje się statystyką matematyczną. Praca zawiera pewne nowatorskie elementy w skali kraju, do których należy zaliczyć np. opracowane modele empiryczno-analityczne. Istotne jest również uwzględnienie w programie badań stosunkowo nowych materiałów jakim są asfalty wysokomodyfikowane. Warto również zwrócić uwagę, że na wielu etapach pracy, w tym na etapie studiów literatury Autor formułuje wiele wniosków własnych. Opracowanie i ocena statystyczna dokładności opracowanych modeli pozwoliła Autorowi udowodnić tezę pracy. Autor wskazuje również potencjalne zastosowanie modeli oraz określa kierunki dalszych badań. Treść pracy jest ogólnie zgodna jest z tytułem i celami rozprawy.

### **4 Uwagi redakcyjne, merytoryczne i pytania do Doktoranta**

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

I. Odnośnie rozdziału 1 uważam, że jego tytuł w zasadzie nie znajduje odzwierciedlenia w jego głównej treści i w tytułach oraz treści podrozdziałów. Kolejne podrozdziały dotyczą wielu różnych zagadnień, z których większość ma niewielki związek z projektowaniem mieszanek mineralno-asfaltowych. Tak szeroki tematycznie zakres istotnie trudny do objęcia jednym trafnym tytułem. Przykładem tematu, który nie odpowiada tytułowi rozdziału jest zagadnienie systemów wspomagających proces inwestycji i utrzymania dróg. Dodatkowo ten podrozdział zawiera elementy, które są później wskazane przez Autora jako realizacja jednego z celów pracy. Cele natomiast są określone dopiero w rozdziale 3, co

również wskazuje, że ten podrozdział powinien być w innym miejscu pracy. Uważam również, że w tytułach rozdziałów 1.8-1.10 bardziej wskazane jest użycie słowa „badania” lub „ocena odporności (...)” zamiast słowa „badanie”.

II. W punkcie 2.1 Autor prawidłowo definiuje ogólną definicję mieszanek ACWMS, natomiast niepotrzebnie podaje w tej definicji graniczne wartości modułów wg WT-2 i to wyłącznie dla warstwy podbudowy, pomijając warstwę wiążącą. W dalszej części pracy natomiast bardzo słusznie zauważa, że dolna wartość przedziału jest błędna. Jest to zgodne z naszymi badaniami i stanowiskiem Instytutu w tej sprawie, co m.in. wykazane było w tegorocznych publikacjach. Jako nieścisłość należy wskazać stwierdzenie, że we Francji mieszanki EME2 (francuski odpowiednik ACWMS) nie stosuje się do warstwy wiążącej. Typowy układ konstrukcji z tych mieszanek we Francji obejmuje warstwę wiążącą i podbudowy.

III. Autor często (np. w rozdziale 4) odwołuje się jedynie do modułu sztywności, a przecież w tezie podnosi też zagadnienia związane z kątem przesunięcia fazowego? Czy zatem nie lepiej posługiwać się pojęciem modułu zespolonego, lub właściwości reologicznych, co zresztą na początku pracy zostało wskazane.

IV. W odniesieniu do rozdziału 4 należy zauważyć, że nie zostały uwzględnione niektóre kluczowe i ważne publikacje dotyczące modułu zespolonego i metod jego wyznaczania, jak np. „Rilem Raport 17” z roku 1998, późniejsze publikacje prof. Benedetto i innych. Zabrakło moim zdaniem też wzmianki o pracach badawczych związanych z implementacją modelu lepkosprężystego i lepkoplastycznego w projektowaniu nawierzchni z zastosowaniem programu Veroad, co było prowadzone w ośrodkach zarówno krajowych i zagranicznych. W tym miejscu należy również zauważyć, że w przeglądzie literatury Autor pominął ważne zagadnienia związane z reologią MMA, tj. modele reologiczne (np. Burgersa, Kelvina, Maxwella itp.), krzywymi wiodącymi, superpozycją czasowo-temperaturową, itd.

V. W dyskusji na temat kryteriów zmęczenia (rozdział 4) Autor przedstawia wyniki badań bez powołania źródła, choć można się domyślać, że są to badania własne Autora. Zdanie drugie na stroni 86 zaczynające się od słowa „natomiast” jest błędne, prawdopodobnie miało wskazywać, że szkoda zmęczeniowa MMA z asfaltami modyfikowanymi jest większa niż z asfaltem 20/30. Ogólnie ten akapit jest dość niezrozumiały. W mojej ocenie porównywanie MMA względem trwałości zmęczeniowej na podstawie szkody przy różnych warunkach badania jest zbyt dużym uproszczeniem. Ocena powinna uwzględniać pełne charakterystyki



zmęczeniowe, a właściwe jest też uwzględnienie pracy MMA w konstrukcji. Zresztą Autor zauważa ten fakt, wskazując różnice w stanie naprężeń i odkształceń w konstrukcji w związku z różnicami w sztywności.

VI. W rozdziale 4 Autor wskazuje potrzebę korelacji między badaniami terenowymi a laboratoryjnymi, w tym również z uwzględnieniem procesów starzenia. Trudno się nie zgodzić z Autorem, że takie korelacje byłyby wartościowe. Należy jednak wyrazić obawę, czy jest to do osiągnięcia. Badanie ugięć metodą FWD jest obarczone wieloma czynnikami, a przede wszystkim nie jest badaniem powtarzalnym (cyklicznym). Impuls obciążenia jest pojedynczy, stąd szukanie korelacji z właściwościami pod obciążeniem powtarzalnym może być zbyt dużym uproszczeniem. Prośba do Autora o ewentualnie szerszy komentarz do tego zagadnienia.

VII. Ogólnie rozdział 4 porusza wiele zagadnień na poziomie przeglądu literatury. Biorąc pod uwagę układ pracy w mojej ocenie zagadnienia te powinny być omówione przed rozdziałem 3 (np. w rozdziale 1), który przedstawia tezę pracy wynikającą z analizy studiów literatury.

VIII. Rozdział 5 również można zakwalifikować do przeglądu literatury, stąd powinien w mojej ocenie być on umieszczony przed rozdziałem prezentującym tezę pracy. Rozdział 5.10 składający się z dwóch zdań nie wnosi moim zdaniem nic istotnego w odniesieniu do celu pracy. Są tam informacje, które nie zasługują w mojej ocenie na umieszczenie w osobnym rozdziale, a można je było zawrzeć w innej części pracy. Rozdział 5.14 dotyczy analizy wrażliwości modelu Witczak-Bari. W związku z czym można postawić pytanie jaki jest cel tej analizy, skoro dotyczy metody, która nie została przez Autora wybrana do dalszej pracy.

IX. Oznaczenie metody belki czteropunktowo zginanej przyjęte w normie i literaturze to raczej 4PB. W pracy oznaczenia nie są jednolite: 4PB i 4PBB.

X. W przedstawionych wynikach w rozdziale 7 brakuje wyników zawartości wolnych przestrzeni, który to parametr jest jednym z kluczowych w zakresie właściwości MMA i jest również używany w modelach analityczno-empirycznych. Powinny również się znaleźć pozostałe właściwości charakteryzujące ACWMS, jak ITSR, trwałość zmęczeniowa czy koleinowanie.

XI. W zakresie badań modułów zespolonych (rozdział 7) brak jest przedstawienia przez Autora krzywych wiodących dla asfaltów i MMA oraz takich wykresów jak np. wykres Blacka czy Cole-Cole. Są to elementy, które stosuje się przy prezentacji i omawianiu wyników tych badań. Można

się zgodzić, że nie są to elementy niezbędne do realizacji podstawowego celu pracy. Jednak moim zdaniem powinny być zamieszczone, jak również pozwoliłyby Autorowi na omówienie/porównanie mieszanek i asfaltów w zakresie właściwości reologicznych. W rozprawie omówienie wyników badań modułu sztywności i kąta przesunięcia fazowego zajmuje jedynie pół strony, podczas gdy jest to zagadnienie umieszczone w tytule pracy.

XII. W rozdziale 8 podanie wartości średnich w tabeli 8.5 dla modułu sztywności i kąta przesunięcia fazowego asfaltu i MMA jest niezrozumiałe, ponieważ są to parametry silnie zależne od temperatury i częstotliwości obciążenia. W tym układzie wyciąganie jednej wartości średniej wydaje się być nieuzasadnione i bezcelowe, wymaga to wyjaśnienia. W pierwszym zdaniu tego rozdziału w mojej ocenie powinno być 8 mieszanek a nie 9 jak podaje Autor.

XIII. W odniesieniu do rozdziału 8.7 należy zadać Autorowi pytanie dlaczego do określenia zależności sztywności MMA od modułu ścinania asfaltu wybrana została funkcja potęgowa. Autor nie podaje jakie były argumenty przy tym wyborze. Rysunek 8.6 też wymaga szerszego komentarza. Można się domyślać, że poszczególne punkty wykresu reprezentują sztywność asfaltu i MMA w takich samych warunkach temperatury i częstotliwości. Powinno zostać to potwierdzone.

XIV. W rozdziale 8 Autor stawia tezę, że dokładność wybranych modeli mogłaby zostać zwiększona przez prowadzenie dodatkowych czynników związanych z wpływem rodzaju i kształtu ziaren kruszywa. W kontekście tych stwierdzeń należy zapytać, czy Autor przeprowadził również optymalizację z zastosowaniem oryginalnych modeli Witczak-El-Bidawy i Hirscha?

XV. W mojej ocenie ograniczenia stosowania modeli wybranych przez Autora może wynikać z dostępności do reometru DSR oraz z dokładności modeli, które nie gwarantują uzyskania odpowiedniej sztywności mieszanki ACWMS, szczególnie jeżeli sztywność jest bliska granicznym wartościom wg wymagań. W tym miejscu można więc zapytać Autora, jakie Jego zdaniem są inne najbardziej obiecujące zastosowania tych modeli i jakie Autor widzi zalety, ale również jakie są ograniczenia?

## **5 Podsumowanie oceny rozprawy**

Biorąc pod uwagę całość przedstawionej rozprawy stwierdzam, że dotyczy ona ważnego zagadnienia związanego z technologią mieszanek mineralno-asfaltowych. Autor przedstawił przegląd stanu wiedzy, a w celu udowodnienia postawionej tezy przeprowadził obszerne badania laboratoryjne oraz przeprowadził analizy obliczeniowe z zastosowaniem zaawansowanych metod statystycznych. Zaproponowane przez Autora modele stanowią wkład w rozwój technologii MMA. Doktorant wykazał się dostateczną umiejętnością samodzielnego prowadzenia prac badawczych i rozwiązywania problemów naukowych. Praca napisana jest poprawnie, język pracy jest właściwy.

Na podstawie badań laboratoryjnych oraz analiz matematycznych Autor rozwiązał postawiony problem i udowodnił tezę pracy. Przeprowadzone przez Autora studia literaturowe oceniam jako wystarczające. Podane powyżej uwagi nie umniejszają wartości rozprawy jako całości.

## **6 Wniosek końcowy**

Stwierdzam, że opiniowana rozprawa doktorska mgr inż. Mikołaja Bartkowiaka pt: "Wpływ właściwości asfaltu i składu mieszanki mineralno-asfaltowej na cechy reologiczne betonu asfaltowego o wysokim module sztywności" spełnia wszystkie wymagania określone przez ustawę o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki z dnia 14 marca 2003 roku.

Przedkładam Wysokiej Radzie Wydziału Budownictwa i Inżynierii Środowiska Politechniki Poznańskiej niniejszą recenzję z wnioskiem o przyjęcie pracy jako rozprawy doktorskiej oraz dopuszczenie do publicznej obrony.