

Mieczysław Słowik
dr hab. nauk technicznych w dyscyplinie budownictwo

POLITECHNIKA POZNAŃSKA

WYDZIAŁ BUDOWNICTWA I INŻYNIERII ŚRODOWISKA

Instytut Inżynierii Lądowej, Zakład Budownictwa Drogowego
ul. Piotrowo 5, 60-965 Poznań

RECENZJA ROZPRAWY DOKTORSKIEJ

mgr. inż. Karola Nowakowskiego

*pt. „Optymalizacja właściwości mieszanki SMA z dodatkiem THPP wykonywanej
w obniżonej temperaturze”*

1. Podstawa opracowania recenzji

Recenzja została opracowana na zlecenie Prodziekana ds. Nauki i Współpracy z Zagranicą Wydziału Budownictwa i Architektury Politechniki Świętokrzyskiej w Kielcach (pismo nr BD-178/16 z dnia 13.06.2016 r.), realizującego uchwałę Rady Wydziału z dnia 6.04.2016 r., na podstawie Ustawy z dnia 14 marca 2003 r. o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz stopniach i tytule w zakresie sztuki (Dz.U. 2003 Nr 65 poz. 595, z późn. zm.) oraz Rozporządzenia Ministra Nauki i Szkolnictwa Wyższego z dnia 30 października 2015 r. w sprawie szczegółowego trybu i warunków przeprowadzania czynności w przewodzie doktorskim, w postępowaniu habilitacyjnym oraz w postępowaniu o nadanie tytułu profesora.

2. Ogólna charakterystyka rozprawy

Opiniowana rozprawa doktorska na temat „Optymalizacja właściwości mieszanki SMA z dodatkiem THPP wykonywanej w obniżonej temperaturze” została przygotowana przez mgr. inż. Karola Nowakowskiego pod kierunkiem dr. hab. inż. Marka Iwańskiego, profesora nadzwyczajnego Politechniki Świętokrzyskiej. Funkcję promotora pomocniczego w przewodzie doktorskim pełnił dr. inż. Grzegorz Mazurek z Politechniki Świętokrzyskiej.

Tematyka rozprawy jest związana z bardzo aktualnym i ważnym dla budownictwa drogowego problemem obniżenia temperatury produkcji i wbudowywania mieszanek mineralno-asfaltowych – zastosowania technologii „na ciepło” (WMA – ang. Warm Mix Asphalt) do budowy nawierzchni drogowych. W porównaniu z powszechnie stosowaną technologią „na gorąco” (HMA – ang. Hot Mix Asphalt), technologia WMA wykazuje liczne korzyści, zarówno techniczne (możliwość układania warstw nawierzchni asfaltowej w niższej temperaturze otoczenia – wydłużenie sezonu robót asfaltowych, możliwość wydłużenia drogi oraz czasu transportu mieszanki mineralno-asfaltowej z wytwórni na miejsce wbudowania), jak i ekologiczne (mniejsze zapotrzebowanie na energię skutkuje zredukowaniem emisji gazów cieplarnianych oraz innych szkodliwych związków do atmosfery). Do obniżenia temperatury produkcji i wbudowania mieszanek mineralno-asfaltowych wykorzystuje się

najczęściej rozwiązania prowadzące do znacznego zmniejszenia lepkości asfaltu w wysokiej temperaturze, np.: dodatek związków chemicznych uzyskanych na bazie wosku syntetycznego, dodatek zeolitów bądź zastosowanie lepiszcza w postaci asfaltu spienionego. Doktorant w swoich badaniach podjął próbę obniżenia temperatury produkcji mieszanki mineralno-asfaltowej w inny sposób – poprzez zastosowanie wybranego dodatku powierzchniowo aktywnego poprawiającego adhezję asfaltu do kruszyw mineralnych, a za cel pracy przyjął ocenę wpływu dodatku związku chemicznego tetrahydropirymidianu propylu (THPP) na właściwości mieszanki mastyksowo-grysowej SMA, która coraz częściej zastępuje beton asfaltowy w warstwach ścieralnych nawierzchni drogowych, w szczególności na drogach o dużym obciążeniu ruchem.

Rozprawa została napisana w języku polskim i liczy łącznie 187 stron. Składa się z 8. rozdziałów, podzielonych na podrozdziały (z wyjątkiem rozdziału 8), obejmujących: wstęp zawierający m.in. tezy, cel oraz zakres pracy (rozdział 1), charakterystykę lepiszczy oraz mieszanki mastyksowo-grysowej SMA w aspekcie ich właściwości reologicznych (rozdział 2), charakterystykę technologii WMA z dodatkiem THPP (rozdział 3), opis zastosowanej w pracy metodyki badań lepiszcza i mieszanki SMA (rozdział 4), określenie wpływu dodatku THPP na właściwości lepiszcza modyfikowanego (rozdział 5), ocenę właściwości fizychnomechanicznych mieszanki SMA w aspekcie ilości zastosowanego dodatku THPP (rozdział 6), ocenę odporności na deformacje trwałe mieszanki SMA wykonanej w technologii WMA z dodatkiem THPP (rozdział 7) oraz wnioski i propozycje dalszych badań (rozdział 8). W części końcowej zamieszczono bibliografię obejmującą łącznie 158 pozycji oraz streszczenie w języku polskim i angielskim.

3. Ocena rozprawy

Autor rozprawy doktorskiej podjął się wykazania, że dodatek związku tetrahydropirymidianu propylu (THPP) do asfaltu modyfikowanego polimerem PMB 45/80-55 można traktować jako dodatek wielofunkcyjny, który oprócz polepszenia przyczepności lepiszcza do ziaren kruszywa mineralnego, umożliwia produkcję i układanie mieszanki mastyksowo-grysowej SMA w nawierzchni drogowej przy znacznie obniżonej temperaturze, bez ryzyka pogorszenia jej zagęszczalności oraz właściwości reologicznych i funkcjonalnych. Wynika to z trzech tez pracy sformułowanych w punkcie 1.2. Jest to podejście oryginalne, a uzyskane w pracy rezultaty można uznać za rozwiązanie ważnego problemu naukowego dotyczącego budownictwa drogowego.

Część badawcza została poprzedzona wnikliwymi studiami literatury związanej z realizowanymi zadaniami. W rozdziale 2 Doktorant scharakteryzował asfalty i mieszanki SMA pod względem ich właściwości reologicznych, w rozdziale 3 – technologię WMA z wykorzystaniem dodatku THPP, natomiast w rozdziale 4 – metodykę badań oraz analiz

statystycznych uzyskanych wyników. Bogata (158 pozycji) i prawidłowo dobrana bibliografia cytowana w rozprawie świadczy o dobrym przygotowaniu teoretycznym Doktoranta do prowadzenia badań naukowych w zakresie mieszczącym się w dyscyplinie budownictwo.

Badania laboratoryjne zostały podzielone na dwie części – dwa odrębne poziomy obserwacji. Pierwszy poziom obejmował badania wpływu dodatku tetrahydropirymidianu propylu (THPP) na właściwości asfaltu modyfikowanego polimerem PMB 45/80-55. Natomiast drugi poziom obserwacji dotyczył badań mieszanki mastyksowo-grysowej SMA 8S wykonanej z udziałem analizowanego wcześniej asfaltu modyfikowanego polimerem PMB 45/80-55 z dodatkiem tetrahydropirymidianu propylu (THPP) o zróżnicowanej zawartości, w zakresie od 0 do 0,6% w stosunku do masy asfaltu modyfikowanego zawierającego dodatek THPP. Właściwości lepiszcza asfaltowego decydują w znacznym stopniu o zachowaniu produktu finalnego, czyli mieszanki mineralno-asfaltowej. Dlatego zastosowany podział realizowanych prac badawczych należy uznać za słuszny, a przy tym stosowany w wielu opracowaniach naukowo-badawczych o podobnej tematyce.

Dobór materiałów poddanych badaniom oraz zastosowanych metod pomiarowych świadczy o dobrym rozeznaniu Doktoranta w zakresie właściwości lepiszczy i mieszanek mineralno-asfaltowych. Jako najistotniejsze właściwości określone w wyniku wykonanych badań należy wymienić: indeks penetracji będący umowną miarą wrażliwości temperaturowej, przyczepność lepiszcza do kruszywa, lepkość dynamiczną i moduł sztywności oznaczony metodą reometru zginanej belki (BBR) w niskiej temperaturze (właściwości lepiszczy asfaltowych) oraz zawartość wolnych przestrzeni, wskaźnik wytrzymałości na rozciąganie pośrednie (ITSR) będący miarą odporności na działanie wody i mrozu, moduł sztywności oraz parametry PRD i WTS charakteryzujące odporność na koleinowanie (właściwości mieszanek mineralno-asfaltowych). Tak szeroki program badań pozwolił na kompleksową ocenę wpływu zawartości dodatku tetrahydropirymidianu propylu (THPP) na zachowanie analizowanych lepiszczy i mieszanek SMA.

Ważną cechą analiz rezultatów badań dokonanych przez Doktoranta jest wszechstronne wykorzystanie narzędzi statystycznych. Wszystkie wyniki pomiarów wyrażone zostały w postaci średniej arytmetycznej wraz z oszacowaną niepewnością. Istotność różnic pomiędzy wynikami badań lepiszczy oraz mieszanek SMA o zróżnicowanej zawartości dodatku THPP była każdorazowo sprawdzana z zastosowaniem dwóch testów statystycznych: Tukeya i Dunkana. W rozdziale 7 Autor dokonał oszacowania optymalnej zawartości dodatku THPP oraz temperatury zagęszczania mieszanki SMA dla kilku wariantów zróżnicowanych pod względem przyjętych wag przypisanych poszczególnym parametrom mieszanki SMA.

Układ pracy jest spójny, podział na rozdziały i podrozdziały nie budzi większych zastrzeżeń. Sformułowane wnioski wskazują, że postawione w pracy tezy zostały udowodnione.

4. Uwagi i spostrzeżenia

4.1. Uwagi merytoryczne

- Str. 13, 8d: (Ciało doskonale plastyczne Saint Venanta) „poniżej określonej wartości naprężenia (...) nie ulega odkształceniom trwałym”. Ciało doskonale plastyczne Saint Venanta poniżej granicy plastyczności zachowuje się jak ciało sztywne Euklidesa, czyli nie doznaje żadnych odkształceń, a nie tylko odkształceń trwałych.
- Na stronach 31 i 32 Autor dywersyfikuje pojęcia deformacji sprężystej (podlegającej prawu Hooke’a) i deformacji elastycznej (opóźnionej w czasie). Terminy „sprężystość” i „elastyczność” są w mechanice równoważne i nie należy nadawać im odrębnych znaczeń. Odkształcenia opóźnione w czasie powinny być określone terminem odkształceń lepkosprężystych.
- W mojej opinii wykresy zamieszczone na rys. 5.6 (str. 91) i 5.7 (str. 93), które przedstawiają odpowiednio zależności ciągłości i maksymalnej siły rozciągającej od temperatury oraz od stężenia dodatku THPP nie powinny być w przedstawionej formie prezentowane ani analizowane. Powodem jest zróżnicowanie warunków pomiaru, w jakich badania zostały wykonane, a konkretnie różna prędkość rozciągania próbek badanych lepiszczy, która w temperaturze pomiaru równej 25 i 15°C wynosiła 50 mm/min, natomiast w temperaturze 5°C wynosiła 5 mm/min. Takie wykresy mogłyby być zamieszczone i analizowane jedynie w przypadku zapewnienia jednakowej prędkości rozciągania we wszystkich przypadkach, lub gdyby zmiana warunków pomiaru nie miała istotnego wpływu na uzyskiwane wyniki. W rozpatrywanym przypadku 10-krotna zmiana prędkości rozciągania ma bardzo duży wpływ na uzyskiwane rezultaty. Wyniki badań zamieszczone na rys. 5.6 i 5.7 nie opisują w sposób jednoznaczny rzeczywistego wpływu zmiany temperatury na mierzone wielkości. Ponadto wykorzystanie wielomianu kwadratowego do określenia powierzchni zależności, w szczególności pokazanej na rys. 5.7, uważam za niewłaściwe. Analizując wykres przedstawiony na rys. 5.7, można bowiem odnieść wrażenie, że zwiększając temperaturę pomiaru z 20 do 25°C uzyskuje się większe wartości maksymalnej siły rozciągającej, co rozmija się z rzeczywistością.
- W punkcie 5.4.8 (str. 97) Autor używa pojęć „adhezja bierna” (np. w tabeli 5.31), „adhezja” (np. na rys. 5.9 – przy osi pionowej) oraz „przyczepność” (np. w podpisie pod rys. 5.9) traktując je jak synonimy i wyrażając w procentach. Uważam, że takie podejście nie jest właściwe, ponieważ adhezji (przyczepności) nie można wyrażać w procentach – jest to praca przypadająca na jednostkę powierzchni, której wykonanie jest potrzebne do rozdzielenia dwóch stykających się ciał. Doktorant wykonał badania zgodnie z zapisami normy PN-84/B-06714/22 „Kruszywa mineralne. Badania. Oznaczanie przyczepności bitumów”, której omyłkowo nadał numer PN-76/B-06721 [132]. Zgodnie z normą PN-

84/B-06714/22 określa się w procentach udział powierzchni kruszywa pokrytej lepiszczem (nieodmytej z lepiszcza), która jest umowną miarą przyczepności (adhezji) lepiszcza do ziaren kruszywa. Uważam, że Autor zastosował „skrót myślowy”, który nie powinien mieć miejsca w rozprawie naukowej.

- Wniosek ogólny nr 1 (str. 176) wygląda na niedokończony. Autor nie podał, jakie właściwości badanych lepiszczy ulegają poprawie dzięki zastosowaniu dodatku THPP (który omyłkowo nazwał „HTPP”).

4.2. Uwagi o charakterze redakcyjnym

- Zestawienie „Nazwy, symbole i objaśnienia” zamieszczone na stronach 6-8 jest w mojej opinii zbędne. Wszystkie symbole zostały opisane i wyjaśnione w tych miejscach pracy, gdzie pojawiają się formuły, w których te wielkości występują. Zestawienie znajdujące się na str. 6-8 jest zupełnie oderwane od kontekstu i nie dostarcza Czytelnikowi żadnych pożytecznych informacji. Czy na podstawie trzech przykładowych, zacytowanych poniżej fragmentów ze str. 6 Czytelnik uzyskuje wystarczające informacje?

„F – siła odczytana z urządzenia [N]”

„L – długość odczytu wykresu [mm]”

„V – prędkość przesunięcia rejestratora [mm/s]”

Moim zdaniem nie. W żadnym z opisanych przypadków nie wyjaśniono, jakiego badania (przyrządu, materiału) dotyczą opisywane wielkości. Uważam, że znacznie bardziej przydatne byłoby wyjaśnienie na początku pracy znaczenia skrótów, które bardzo licznie pojawiają się w rozprawie – dwa z nich (SMA i THPP) znalazły się już w jej tytule. Przykłady innych skrótów, które powinny znaleźć się w takim zestawieniu: WMA, HMA, PMB, KR, NCAT, LZO, PAS, AC, WMB, LEA, MMA, BBR, ITSr, ITS, IT-CY, ANOVA, TZP, WTS, PRD.

- Str. 12, 12d: „Asfalt obciążony pośrednimi temperaturami”. Asfaltu nie można „obciążyć” temperaturą.
- Str. 18, 3g: „Materiały lepko sprężyste są to substancje posiadające zdolność do częściowego odzyskiwania sprężystości”. Ciała lepkosprężyste mają zdolność do częściowego (lub całkowitego) odzyskiwania kształtu oraz wymiarów, jakie posiadają przed rozpoczęciem ich obciążania. Nie mogą „odzyskiwać sprężystości”, gdyż najpierw musiałyby ją utracić.
- Str. 19, 6d: „Model Kelvina jest połączeniem równoległym naprężenia całkowitego (wzór 2.10) oraz odkształcenia całkowitego (wzór 2.11). Trudno nadać za wywodem

Doktoranta. Należało raczej napisać: model Kelvina jest połączeniem równoległym elementu sprężystego Hooke'a i elementu lepkiego Newtona.

- Str. 31, 11d: (deformacji) „nieodwracalnych które noszą nazwę plastycznych lub płynięcia”. Niewłaściwy dobór słów. Płynięcie może mieć charakter plastyczny, lepki bądź lepkoplastyczny. Deformacje nieodwracalne można uzyskać również w przypadku ciał lepkosprężystych (np. opisywanych modelem cieczy Maxwella czy Burgersa).
- Str. 59, wzór (4.1): Autor podaje, że wytrzymałość na pośrednie rozciąganie jest wyrażana w megapaskalach (MPa), tymczasem w opisie pod wzorem wskazuje, że siłę należy wyrazić w niutonach (N), a wymiary geometryczne próbki – w metrach (m). W takim przypadku uzyskany wynik będzie wyrażony w paskalach (Pa), a nie w megapaskalach (MPa). Ponadto występują nieścisłości dotyczące symbolu określającego średnią wysokość próbki: we wzorze jest „L”, a w opisie pod wzorem „h”.
- Str. 61, wzór (4.4): w mianowniku występuje wyrażenie „ $ITS_{(1 \text{ lub } 18)}$ ”, a powinno być „ ITS ”, ponieważ wielkością referencyjną jest wytrzymałość na pośrednie rozciąganie określona na próbkach kondycjonowanych w warunkach powietrzno-suchych w temperaturze pokojowej.
- Str. 86, 12d: „Najmniejszą wartością temperatury łamliwości charakteryzował się referencyjny asfalt modyfikowany”. Zgodnie z wynikami zamieszczonymi na rys. 5.4, referencyjny asfalt modyfikowany (tj. o zerowej zawartości dodatku THPP) charakteryzuje się największą wartością temperatury łamliwości spośród analizowanych lepiszczy.
- Str. 91, rys. 5.6: Oś pionowa została błędnie opisana w postaci „ROZCIĄGANIE [mm]”. Rozciąganie nie jest wielkością fizyczną i nie można mu przyporządkować wartości liczbowej ani jednostki. Podpis przy osi pionowej powinien brzmieć „CIĄGLIWOŚĆ [mm]”.
- Str. 92, tabela 5.24: maksymalna siła rozciągająca została wyrażona w miliniutonach (mN), a powinna być wyrażona w niutonach (N).
- Str. 93, rys. 5.7: Oś pionowa została nieprecyzyjnie opisana w postaci „SIŁA [N]”. Podpis przy osi pionowej powinien brzmieć „MAKSYMALNA SIŁA ROZCIĄGAJĄCA [N]” – konsekwentnie, tak jak w tabeli 5.24.
- Str. 119, tabela 6.8: w lewej skrajnej kolumnie zapisano „wolna przestrzeń w próbce [%]” zamiast „Zawartość wolnej przestrzeni w próbce [%]”.
- Str. 127, 1g: napisano „wartości rozciągania pośredniego” zamiast „wartości wytrzymałości na rozciąganie pośrednie”.

- W kilku przypadkach występują niezgodności dotyczące cytowanej literatury. Przykładem jest pozycja [91], którą nieprawidłowo zacytowano w pracy kilkanaście razy. Inne przykłady niewłaściwego cytowania zaznaczono w egzemplarzu rozprawy przekazanym do oceny.
- W opiniowanej rozprawie doktorskiej występują również usterki edytorskie (tzw. „literówki”) w postaci m.in. braku litery (liter), przestawieniu kolejności liter (tzw. „czeski błąd”) czy stosowania niepoprawnej odmiany niektórych zwrotów. Zostały one zaznaczone w egzemplarzu rozprawy przekazanym do oceny.

4.3. Uwagi o charakterze dyskusyjnym

- Niepewności pomiarowe wielkości wyznaczonych metodami pośrednimi, tj. temperaturowego zakresu plastyczności, nawrotu sprężystego czy indeksu penetracji badanych lepiszczy asfaltowych, Autor oszacował korzystając z tzw. metody B, w której nie uwzględnia się wartości odchylenia standardowego uzyskanych w wyniku przeprowadzonego eksperymentu. Takie podejście nie jest błędne, jednak bardziej wiarygodne rezultaty Doktorant uzyskałby wyznaczając niepewności pomiarowe tzw. metodą A – wykorzystując gotowe wzory opracowane i przedstawione w moich publikacjach z 2010 i 2013 roku (Słowik M., Analiza niepewności pomiarowych przy ocenie właściwości asfaltów drogowych, Archiwum Instytutu Inżynierii Lądowej, 7/2010, Poznań 2010, s. 129-144 oraz Słowik M., Wybrane zagadnienia lepkosprężystości drogowych asfaltów modyfikowanych zawierających elastomer SBS, seria Rozprawy, Nr 508, Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej, Poznań 2013).
- W punkcie 5.5.1 (str. 100) zostały przedstawione wyniki oznaczania modułu sztywności badanych lepiszczy w temperaturze -10 oraz -15°C z zastosowaniem reometru zginanej belki (BBR). Uzyskane wartości modułu sztywności nie przekroczyły w żadnym przypadku 60 MPa. Natomiast zgodnie z pragmatyką badania asfaltów metodą reometru BBR, określa się maksymalną temperaturę, w której moduł sztywności lepiszcza nie przekracza wartości 300 MPa, a tzw. parametr m (m-value – nie analizowany przez Doktoranta) ma wartość nie mniejszą niż 0,3. Dlatego uważam, że pomiary powinny być wykonane w niższej temperaturze (np. -15, -20, -25°C), tak aby uzyskać wartości modułu sztywności badanych lepiszczy zarówno mniejsze, jak i większe od 300 MPa.
- Doktorant w swojej pracy nie rozpatrywał problemu starzenia lepiszczy asfaltowych. Badania asfaltów wykonano wyłącznie na próbkach niepoddanych starzeniu, podczas gdy badane mieszanki SMA wykonane były z udziałem lepiszcza, które musiało doznać starzenia technologicznego podczas przygotowywania próbek. W punkcie 3 nadmieniałem, że Doktorant potraktował dodatek THPP jako dodatek wielofunkcyjny, który oprócz polepszenia przyczepności lepiszcza do ziaren kruszywa mineralnego, umożliwia

produkcję i układanie mieszanki SMA w nawierzchni drogowej przy znacznie obniżonej temperaturze. Można przypuszczać, że analizowany w pracy dodatek mógłby pełnić jeszcze jedną ważną funkcję, tj. prowadzić do ograniczenia zmian spowodowanych zjawiskiem starzenia zachodzącego w lepiszczu asfaltowym podczas produkcji, układania i zagęszczania mieszanki mineralno-asfaltowej, ze względu na możliwość prowadzenia tych procesów w niższej temperaturze. Problem ten Doktorant dostrzegł wskazując zagrożenia oceny starzenia technologicznego lepiszcza z dodatkiem THPP z uwzględnieniem zróżnicowanej temperatury procesów technologicznych jako jeden z proponowanych kierunków dalszych badań.

5. Podsumowanie i wniosek końcowy

Podsumowując, stwierdzam, że opiniowana rozprawa doktorska mgr. inż. Karola Nowakowskiego pt. „Optymalizacja właściwości mieszanki SMA z dodatkiem THPP wykonywanej w obniżonej temperaturze” stanowi oryginalne rozwiązanie problemu naukowego dotyczącego dyscypliny budownictwo. Sformułowanie tez i celu pracy, zaplanowanie eksperymentu i wykonanie badań laboratoryjnych, ich wnikliwa analiza i trafne wnioski dowodzą, że Doktorant posiada ogólną wiedzę teoretyczną dotyczącą dyscypliny naukowej budownictwo, a także umiejętność samodzielnego prowadzenia badań naukowych.

Uwagi krytyczne zamieszczone w punkcie 4 niniejszej recenzji nie wpływają w sposób znaczący na wartość merytoryczną rozprawy, która moim zdaniem w pełni zasługuje na pozytywną opinię.

Uważam, iż opiniowana rozprawa doktorska mgr. inż. Karola Nowakowskiego pt. „Optymalizacja właściwości mieszanki SMA z dodatkiem THPP wykonywanej w obniżonej temperaturze” spełnia wymagania stawiane rozprawom doktorskim zawarte w Ustawie z dnia 14 marca 2003 r. o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz stopniach i tytule w zakresie sztuki (Dz.U. 2003 Nr 65 poz. 595, z późn. zm.) i przedstawiam Radzie Wydziału Budownictwa i Architektury Politechniki Świętokrzyskiej wniosek o przyjęcie rozprawy doktorskiej oraz dopuszczenie jej do publicznej obrony.

Mieczysław Kowalski
Poznań, dnia 10 sierpnia 2016 r.