

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

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

Szczecin, 13 maj 2021 r.

OPINIA

na temat rozprawy doktorskiej **mgra inż. Piotra Ramiączka**
pt. „**Optymalizacja parametrów fizyko-mechanicznych mieszanki wytworzonej w technologii
recyklingu głębokiego na zimno w aspekcie metody zagęszczania**”

wykonanej pod kierunkiem:

dr hab. inż. Anny Chomicz-Kowalskiej, prof. Politechniki Świętokrzyskiej

1. Podstawa opracowania recenzji

Podstawą formalną do wykonania recenzji rozprawy doktorskiej jest pismo Dyrektora Naukowego Dyscypliny Inżynieria Lądowa i Transport Politechniki Świętokrzyskiej prof. dra hab. inż. Jerzego Wawrzeńczyka z dnia 25.03.2021 r. (znak: RNB-12/2020), realizującego uchwałę nr 379/20 Senatu Politechniki Świętokrzyskiej w Kielcach, podjętej w dniu 08.07.2020 r.

2. Ocena rozprawy

2.1. Ogólna charakterystyka rozprawy

Przedstawiona do recenzji praca doktorska ma charakter pracy badawczej. Została przedstawiona na 234 stronach formatu A4, łącznie z częścią załącznikową. Część zasadnicza pracy liczy 197 stron i składa się ze spisu treści, wykazu skrótów, streszczenia, wstępu, czterech rozdziałów głównych oraz bibliografii. Nie załączono spisu tablic i rysunków. Załączniki, zawierające wyniki badań i analiz statystycznych mieszanek MCAS z etapu I, II i IV oraz analiz struktury mieszanek oznaczonej w tomografii komputerowej, zapisano na 37 stronach. Spis literatury obejmuje 124 pozycje zwarte (monografie, artykuły, dokumenty techniczne), 28 pozycji odnosi się do norm przedmiotowych (europejskich i amerykańskich).

Opiniowana rozprawa dotyczy oceny wpływu metod zagęszczania próbek z recyklowanych mieszanek mineralno-cementowych z asfaltem spienionym (MCAS) w technologii na zimno na ich właściwości fizyczno-wytrzymałościowe (zawartość wolnych przestrzeni, wytrzymałość na rozciąganie

pośrednie ITS, odporność na działanie wody TSR, moduł sztywności IT-CY) oraz strukturę mieszanki ocenianą techniką tomografii komputerowej (CT).

Doktorant w oparciu o przegląd literatury przygotował program badań laboratoryjnych mieszanek MCAS w zakresie niezbędnym do rozwiązania problemu naukowego zawartego w tezach pracy. 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 i praktycznym, zatem jej wybór i przedstawienie w rozprawie doktorskiej uznaję za merytorycznie uzasadnione.

Rozdział 1 – Wstęp

Rozdział liczy 3 strony maszynopisu. Zwrócono uwagę na potrzebę ochrony środowiska naturalnego w technologiach drogowych, w tym maksymalne wykorzystanie materiałów pochodzących z recyklingu starych nawierzchni. Przedstawiono w sposób zwięzły rys historyczny dotyczący mieszanek mineralno-cementowo-emulsyjnych (MCE) i mieszanek MCAS. Wskazano na problem związany z etapem przygotowania próbek MCAS do badań laboratoryjnych, a dokładnie ich zagęszczeniem, co ma wpływ na parametry mieszanki.

Rozdział 2 – Teza, cel i zakres pracy

W oparciu o studium literatury i doświadczenia własne Autor sformułował dwie tezy. Pierwsza dotyczy istotnego wpływu laboratoryjnej metody zagęszczania próbek MCAS na parametry fizyczno-mechaniczne mieszanki. W drugiej jest mowa o tym, że odpowiedni wybór laboratoryjnej metody zagęszczania mieszanek MCAS pozwala odzwierciedlić proces zagęszczania in situ, co ma skutkować wiernym odwzorowaniem wartości parametrów fizyko-mechanicznych uzyskiwanych w warunkach terenowych w porównaniu do laboratoryjnych.

Celem pracy było określenie wpływu laboratoryjnych metod zagęszczania próbek MCAS na ich właściwości fizyko-mechaniczne. W rozdziale przedstawiono również zakres działań zrealizowanych w ramach pracy, poczynawszy od przeglądu literatury, poprzez sprawdzenie właściwości próbek MCAS zagęszczanych różnymi metodami, porównanie tych parametrów z właściwościami mieszanek MCAS wykonanych w technologii in situ, kończąc na wnioskach i kierunkach dalszych badań.

Rozdział 3 – Technologie recyklingu na zimno z zastosowaniem asfaltu spienionego oraz emulsji asfaltowej

Rozdział składa się z pięciu podrozdziałów głównych i został przedstawiony na 43 stronach maszynopisu. Stanowi on przegląd literatury z zakresu mieszanek mineralno-cementowych z lepiszczem w postaci emulsji asfaltowej oraz asfaltu spienionego. Zawarto w tym rozdziale najważniejsze informacje odnośnie technologii wykonawstwa warstw nawierzchni z mieszanek MCE i MCAS, materiałów do wytworzenia tych mieszanek, ich projektowania oraz przygotowania próbek do badań z uwypukleniem metod zagęszczania i wpływu tych metod na właściwości mieszanek. Podsumowanie rozdziału zakończono stwierdzeniem odnośnie podjęcia w pracy prób doprecyzowania parametrów procesu zagęszczania dla najpopularniejszych, alternatywnych metod zagęszczania, tj. prasy żyratorowej oraz statycznej względem ubijaka Marshalla.

Rozdział 4 – Część badawcza

Rozdział stanowi najobszerniejszą część pracy. Składa się z siedmiu podrozdziałów głównych i zajmuje 127 stron maszynopisu. Dotyczy części badawczej i zawiera informacje na temat:

- planowania badań dla poszczególnych etapów,

- części opisowej dotyczącej przygotowania próbek (projektowania mieszanki MCAS, wytworzenia, zagęszczenie i pielęgnacji) oraz procedur badawczych (zawartość wolnych przestrzeni, wytrzymałość na rozciąganie pośrednie ITS, odporność na działanie wody TSR, moduł sztywności IT-CY);
- etapu projektowania MCAS polegającego na doborze ilościowym poszczególnych składników, tj. destruktu asfaltowego i kamiennego, kruszywa doziarniającego, asfaltu (łącznie z określeniem składu asfaltu spienionego, uwzględniającego wskaźnik ekspansji ER, czas półtrwania piany asfaltowej HL oraz wskaźnik piany FI), cementu oraz wody;
- wyników badań zawartości wolnej przestrzeni w próbkach MCAS z etapu I (wstępnego) w zależności od przyjętej metody i energii zagęszczania;
- wyników badań dla etapu II, tj. zawartości wolnej przestrzeni, wytrzymałości na rozciąganie pośrednie ITS, odporności na działanie wody TSR, modułów sztywności IT-CY w temperaturze 5, 15 i 25°C;
- wyników badań etapu III, tj. struktury mieszanki MCAS w oparciu o tomografię komputerową (analizowano rodzaj porów, ich wielkość i rozkład oraz stopień rozkruszenia ziarn),
- wyników badań etapu IV, tj. próbek formowanych w laboratorium z mieszanki pobranej z odcinka doświadczalnego (drogi wojewódzkiej nr 795) oraz pobranych (wyciętych) bezpośrednio z drogi.

Wyniki z poszczególnych oznaczeń części badawczej zostały dość szczegółowo omówione i poparte analizą statystyczną.

Etap projektowania mieszanki MCAS, przedstawiony w rozdz. 4.3, ograniczony został wyłącznie do doboru ilościowego poszczególnych składników oraz optymalizacji zawartości wody metodą Proctora. Do tego etapu nasuwa się kilka pytań:

- Czy ta procedura nie powinna uwzględniać również określenia cech fizyczno-wytrzymałościowych?
- Czy przyjęta metoda Proctora jest właściwa ze względu na rodzaj materiału jakim jest destruk asfaltowy?

Pewne zastrzeżenia można mieć odnośnie niezamieszczenia informacji o ilości przebadanych próbek (dotyczy to każdego z etapów badań) oraz braku głębszej analizy przyczyn mogących mieć wpływ na oznaczane parametry mieszanek.

W tekście pracy dość pobieżnie potraktowano etap IV (droga DW 795). Wyniki z odcinka doświadczalnego powinny stanowić bazę porównawczą dla wszystkich metod zagęszczania (łącznie z ubijakiem Marshalla). W opisie tego etapu brak jakichkolwiek informacji na temat warunków podczas wykonywania prac (co mogło mieć wpływ na parametry mieszanek zagęszczanych laboratoryjnie – temperatura powietrza, czas od momentu wytworzenia do zagęszczenia próbek), czy też późniejszym – dojrzewania mieszanki MCAS w warstwie. Nie zamieszczono również informacji na temat sposobu zagęszczania mieszanki na drodze (rodzaje walców, ilości przejazdów itp.) czy też czasu (od momentu wbudowania), po którym wycięto próbki z drogi.

Rozdział 5 – Wnioski i kierunki dalszych badań

Rozdział przedstawiono na 4 stronach maszynopisu.

Składa się on z krótkiego wprowadzenia, wniosków ogólnych (odnoszących się bezpośrednio do postawionych tez pracy), wniosków szczegółowych (zawierających przemyślenia odnośnie najistotniejszych wyników badań popartych szczegółową analizą) oraz kierunków dalszych badań. W tym aspekcie Autor rozprawy będzie chciał podjąć się:

- oceny wpływu wymiaru zagęszczanej próbki na właściwości mieszanki wytworzonej w warunkach laboratoryjnych i terenowych,

- analizy wpływu metod zagęszczania na właściwości mieszanki MCE.

Rozdział finalizuje kilkudzaniowe podsumowanie, kończące się stwierdzeniem, że jako alternatywną i równoważną metodę formowania próbek z mieszanek MCAS do zagęszczania ubijakiem Marshalla można uznać metodę wykorzystującą:

- prasę żyratorową (parametry: 120 obrotów, ciśnienie 900 kPa),
- prasę statyczną (parametry: czas 2 minut, siła: 60 kN lub 80 kN).

Autor w zakresie dalszych badań ukierunkował się na właściwościach mieszanek (MCAS, MCE) wykonywanych i kondycjonowanych w warunkach laboratoryjnych. Uzyskane wyniki z badań parametrów fizyczno-wytrzymałościowych na próbkach MCAS pobranych z drogi wskazują na pewne odstępstwa od wyników uzyskanych na próbkach laboratoryjnych. Może warto zastanowić się nad badaniami dotyczącymi wpływu warunków „dojrzwania” mieszanki MCAS w warunkach in situ na parametry warstwy.

Innym aspektem wartym rozważenia jest wpływ parametrów mieszanki mineralnej (mineralno-asfaltowej) na jej zagęszczalność w zależności od przyjętej metody, tj. kąta tarcia wewnętrznego i kohezji (spójności).

Innym aspektem wartym rozważenia jest wykorzystanie prasy żyratorowej do optymalizacji zawartości wody przy projektowaniu mieszanek MCAS. Stosowana obecnie metoda Proctora może skutkować dużymi zmianami w uziarnieniu jednego ze składników, tj. destruktu asfaltowego (zależnie od jego rodzaju i udziału ilościowego w mieszance).

Bibliografia

Bibliografia wykorzystana w pracy jest dość obszerna i obejmuje 152 pozycje, z czego 124 to monografie, artykuły, materiały konferencyjne i dokumenty techniczne, natomiast 28 pozycji odnosi się do norm przedmiotowych (głównie europejskich i 3 amerykańskich). Jedna z norm jest niedatowana (PN-EN 13808), w przypadku kilku innych powołano się na nieaktualną wersję (np. jest: PN-EN 12697-5:2010/AC:20212, powinno być: PN-EN 12697-5:2018; jest: PN-EN 13108-20:2008/AC:2008, powinno być: PN-EN 13108-20:2016; jest: PN-EN 12697-26:2012, powinno być: PN-EN 12697-28:2018; jest: PN-EN 12697-30:2012, powinno być: PN-EN 12697-30:2018; itp.).

2.2. Aktualność tematu

Rozprawa doktorska mgra inż. Piotra Ramiączka dotyczy istotnego problemu z zakresu technologii drogowej, a uściślając wpływu metod zagęszczania mieszanek MCAS na ich parametry fizyczno-wytrzymałościowe. Rozpowszechnianie technologii na zimno, a do takich należy wytwarzanie mieszanek w technologii recyklingu głębokiego z asfaltem spienionym, jest pożądane i powinno być promowane, m.in. ze względu na ochronę środowiska naturalnego, ale również optymalizację kosztów realizacji inwestycji. Obecnie obowiązujące *Instrukcje (Specyfikacje)* są na etapie ciągłego rozwoju i wymagają w pewnym zakresie „dopracowania”, co pozwoli usprawnić proces inwestycyjny, zarówno od strony Inwestora jak i Wykonawcy.

Wszelkiego rodzaju remonty czy też przebudowy dróg powinny uwzględniać odzysk materiału z drogi w maksymalnym stopniu i jego ponowne wykorzystanie w nawierzchni. Zapisy to regulujące powinny znaleźć się w warunkach kontraktowych i promować Wykonawców mających zaplecze i technologie umożliwiające realizację tego rodzaju założeń. Technologią bazującą na materiałach z odzysku (destrukt asfaltowy, betonowy i kamienny) i dodatkowo przyjazną środowisku naturalnemu ze względu na temperaturę procesu, jest technologia recyklingu głębokiego z udziałem mieszanek mineralno-cementowo-emulsyjnych (MCE) lub mieszanek mineralno-cementowych z asfaltem spienionym (MCAS). Rozwiązania z mieszankami MCE funkcjonują w Polsce (z mniejszym lub

większym powodzeniem) już od ponad 20-30 lat, „nowością” są mieszanki z asfaltem spienionym. Są to mieszanki o zbliżonych parametrach, ale różniące się rodzajem lepiszcza: emulsja asfaltowa i asfalt spieniony. Rozwój technologii z udziałem asfaltu spienionego wiązał się z „większą dostępnością” urządzeń do spieniania asfaltów (co z kolei było następstwem wygaśnięcia patentu należącego do Mobil Oil) i wzrastającą świadomością ludzi odnośnie ochrony środowiska naturalnego. Opracowanie technologii i wymagań krajowych odnośnie mieszanek MCAS było ułatwione i bazowało na doświadczeniach własnych z mieszankami MCE jak również zagranicznych z mieszankami MCAS. Zbierane doświadczenia z realizacji inwestycji z udziałem mieszanek MCAS wskazują jednak, że są pewne niedociągnięcia, które powinny być wyeliminowane. Jednym z elementów wymagających doprecyzowania jest formowanie (zagęszczanie) próbek MCAS na etapie przygotowywania recept, ale również kontroli jakości podczas realizacji inwestycji.

Procedura projektowania mieszanek MCAS (i odbioru warstw z nich wykonanych) powinna jednoznacznie określać wszystkie wymagania dotyczące składu, przygotowania próbek, ich kondycjonowania i wartości z poszczególnych oznaczeń. Jednym z czynników decydujących o właściwościach mieszanki MCAS (a tym samym i trwałości warstwy z niej wykonanej) jest gęstość objętościowa, kształtowana na etapie zagęszczania. Proces ten powinien gwarantować otrzymywanie zbliżonych wyników w laboratorium oraz w technologii in situ (przy zbliżonym wkładzie pracy zagęszczania). W Polsce (i wielu innych krajach) dominującą metodą zagęszczania jest metoda Marshalla, bazująca na oddziaływaniu uderowym ubijaka. Wieloletnie doświadczenia (szczególnie mieszanek w technologii na gorąco, ale również na zimno przy użyciu emulsji asfaltowych) wskazują, że zagęszczania uzyskiwane w laboratorium przy stosowaniu tej metody są odtwarzalne na drodze. Ma ona jednak swoje wady, w przypadku mieszanek MCAS wynikające m.in. z ograniczeń w zakresie maksymalnego uziarnienia mieszanek (do 22.4 mm) czy też zagęszczania próbek bezpośrednio na budowie (możliwa segregacja przy zagęszczaniu ubijakiem ręcznym Marshalla). Dopuszczanie alternatywnych metod zagęszczania próbek laboratoryjnych powinno gwarantować uzyskiwanie zbliżonych gęstości objętościowych do metody standardowej, ale również przekładać się na porównywalne wyniki w zakresie pozostałych parametrów.

Do alternatywnych metod zagęszczania próbek w technologii na zimno (MCE i MCAS) należy zaliczyć zagęszczanie w prasie statycznej oraz prasie żyrotorowej. Problematyka ta została poruszona w europejskim programie badawczym wspieranym przez Komisję Europejską – PARAMIX. W Polsce dopuszczoną już w 1997 r. była metoda zagęszczania w prasie statycznej (Zeszytu nr 53 IBDiM – projektowania mieszanek MCE). Każda z tych metod ma swoje wady i zalety. Zagęszczanie w prasie żyrotorowej najlepiej odzwierciedla warunki zagęszczania na drodze, ale trzeba właściwie dobrać parametry zagęszczania (ciśnienie, ilość obrotów). Ponadto aparatura badawcza jest droga, a formowanie próbek z drogi jest możliwe wyłącznie w laboratorium (co w wielu przypadkach ze względu na warunki temperaturowo-wilgotnościowe nie jest dopuszczalne). W przypadku prasy statycznej proces zagęszczania komplikuje dobór odpowiedniej siły ściskającej oraz czasu jej oddziaływania. Zaletą jest możliwość formowania próbek z drogi bezpośrednio na miejscu budowy, bez potrzeby ich transportu do laboratorium. W przypadku obu metod dobór parametrów zagęszczania zależy (prawdopodobnie w różnym stopniu) od podatności do zagęszczania mieszanek na zimno, m.in. od kąta tarcia wewnętrznego czy też kohezji (spójności). Zatem nieodpowiedni dobór tych parametrów będzie skutkował przegęszczeniem mieszanek (i zmianami w strukturze agregatu mineralnego) czy też niedogęszczeniem, czego efektem będą znacznie niższe parametry wytrzymałościowe mieszanek.

Alternatywne metody zagęszczania powinny gwarantować uzyskiwanie porównywalnych wyników również ze względów ekonomicznych realizacji inwestycji. Daje to możliwość obu stronom kontraktu

(inwestorowi i wykonawcy) na szybszą akceptację recept i realizację zadania. Brak odtwarzalności wyników w zależności od metody może skutecznie przedłużyć proces, a tym samym zwiększyć koszty budowy. Przykładem braku tego rodzaju spójności mogą być zapisy SST D-04.10.01a (pozycja literatury [104]), w której jako alternatywną do metody Marshalla przyjęto zagęszczania w prasie statycznej przez 5 minut pod naciskiem 100 kN. Uzyskane wyniki badań są rozbieżne (w stosunku do metody Marshalla i próbek z drogi) i jednoznacznie wskazują, że niewłaściwie przyjęto parametry zagęszczania dla prasy statycznej.

Reasumując, przedstawiona do oceny praca dotyczy aktualnego problemu odnoszącego się do mieszanek mineralno-cementowych z asfaltem spienionym, a dokładnie etapu formowania (zagęszczania) próbek. Technologia na zimno oparta na materiałach pozyskiwanych z drogi (destrukcie asfaltowym) ze względu na ochronę środowiska naturalnego oraz koszty realizacji inwestycji będzie się rozwijała. Z tego względu jest wyraźna potrzeba opracowania jasnych i przejrzystych metod przygotowania receptur mieszanek, pozwalających na odwzorowanie ich parametrów w mieszkankach in situ. Zaproponowana w rozprawie metoda zagęszczania prasą statyczną (przy odpowiednich parametrach siły i czasu oddziaływania) może być bardzo użyteczną (szczególnie w aspekcie przygotowywania próbek z drogi) i dawać wyniki porównywalne do próbek zagęszczanych obowiązującą metodą Marshalla. Z kolei prasa żyratorowa pozwala na lepsze odzwierciedlenie procesu zagęszczania w warunkach na drodze. W tym przypadku może warto analizować nie tylko efekt końcowy (gęstość objętościowa po zagęszczeniu), ale również i zmiany tego parametru w czasie (w zależności od włożonej energii zagęszczania).

2.3. Ocena programu i zakresu badań

Plan badań laboratoryjnych został przedstawiony w rozdz. 4.1. Obejmował swoim zakresem cztery etapy, które były ściśle powiązane z celem pracy – wpływem metod i przyjętych parametrów zagęszczenia na właściwości mieszanek MCAS. W pracy były przeprowadzone również inne (dodatkowe) badania, nie ujęte w programie, a dotyczące m.in. projektowania trzech mieszanek MCAS (w tym parametrów asfaltu spienionego). Szczegółowo rozpisano etap I i etap II. W przypadku etapu III i IV w rozdz. 4.1 znalazły się ogólnikowe zapisy odnośnie zakresu badań.

Etap pierwszy dotyczył wstępnej oceny wpływu alternatywnych metod zagęszczania na właściwości trzech zaprojektowanych mieszanek MCAS, w oparciu o zawartość wolnej przestrzeni w odniesieniu do zagęszczania próbek ubijakiem Marshalla (2×75 uderzeń na stronę próbki). W przypadku prasy statycznej zmiennymi była siła (60, 80 i 100 kN) oraz czas zagęszczania (1, 3 i 5 minut), natomiast dla prasy żyratorowej liczba obrotów (40, 120 i 200) oraz ciśnienie konsolidacyjne (600, 750 i 900 kPa).

Uzyskane wyniki w etapie pierwszym pozwoliły na zawężenie planu eksperymentu etapu II w zakresie parametrów zagęszczania dla prasy statycznej (ciśnienie 60, 80 i 100 kN, czas: 1, 2 i 3 min.) i żyratorowej (obroty: 80, 120 i 160, ciśnienie: 600, 750 i 900 kPa). W etapie tym obok zawartości wolnej przestrzeni przeprowadzono oznaczenia wytrzymałości na pośrednie rozciąganie próbek niekondycjonowanych oraz kondycjonowanych w wodzie, odporności na działanie wody oraz modułów sztywności w trzech temperaturach: 5, 15 oraz 25°C. Wszystkie oznaczenia wykonywano dla trzech zaprojektowanych mieszanek MCAS.

Etap trzeci obejmował ocenę struktury mieszanek MCAS (wolnych przestrzeni, spękanych ziaren agregatu mineralnego) w oparciu o tomografię komputerową CT (Computed Tomography), która posłużyła do wygenerowania trójwymiarowych obrazów zagęszczonych próbek. Ze względu na złożoność i czasochłonność procesu analizę przeprowadzono dla wybranych wartości planu eksperymentu (11 konfiguracji), tj. metod zagęszczania określonych jako równoważne z metodą Marshalla oraz wytypowanych skrajnych na podstawie planu eksperymentu z II etapu prac. Analiza

dotyczyła określenia zawartości wolnej przestrzeni (z podziałem na pory otwarte i zamknięte), ich rozkładem w objętości próbki, wielkością porów i ich udziałem procentowym, a także zestawieniem średniej liczby spękanych ziaren o wymiarze od 3 do 26 mm.

Etap czwarty bazował na mieszance MCAS wytworzonej w skali technicznej podczas realizacji inwestycji pn.: „Przebudowa drogi wojewódzkiej nr 795 Secemin-Szczekociny na odcinku od m. Secemin do granicy województwa świętokrzyskiego w km 0+000 do km 7+030 – Etap I w km 0+800 do 4+400”. Plan badań zakładał pobranie mieszanki MCAS bezpośrednio z recyklera, tj. po wymieszaniu składników, następnie przygotowanie próbek wybranymi metodami zagęszczania i porównanie wyników z próbkami zagęszczonymi ubijakiem Marshalla oraz odwierconymi z nawierzchni. Dla metod alternatywnych przyjęto następujące parametry zagęszczania:

- prasa statyczna – ciśnienie 60 i 80 kN w czasie 2 i 3 min. oraz ciśnienie 100 kN w czasie 5 min.,
- prasa żyratorowa – ilość obrotów 120 przy ciśnieniu 750 i 900 kPa oraz ilość obrotów 160 przy ciśnieniu 600, 750 i 900 kPa.

Program badań został omówiony dość szczegółowo. Poszczególne etapy są racjonalne, zawarto w nich informacje na temat rodzaju oznaczeń i metodyki ich wykonania. Przewidziany w pracy zakres wykonanych oznaczeń nie budzi większych zastrzeżeń. Należy jednak zaznaczyć, że Autor nie określił ilości próbek z poszczególnych etapów czy nawet wykonanych oznaczeń. Jest to szczególnie istotne w przypadku próbek formowanych z mieszanek wykonywanych w technologii *in situ* (etap IV), gdzie jednorodność może mieć znaczący wpływ na uzyskiwane wyniki z badań.

W zakresie czynności przewidzianych w pracy Autor uwzględnił przeprowadzenie szczegółowych analiz, opartych o testy statystyczne, m.in. z zakresu istotności i jednorodności 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 dwie tezy (rozdz. 2.1):

- rodzaj laboratoryjnej metody zagęszczania wpływa w istotny sposób na podstawowe parametry fizyczne i mechaniczne mieszanki wytworzonej w technologii recyklingu na zimno z asfaltem spienionym;
- odpowiedni wybór laboratoryjnej metody zagęszczania, pozwala odzwierciedlić proces zagęszczania mieszanki MCAS *in situ*, co skutkuje wiernym odwzorowaniem wartości parametrów fizyko-mechanicznych uzyskiwanych w warunkach terenowych w porównaniu do laboratoryjnych.

Pierwsza z tez jest racjonalna i zrozumiała. W przypadku drugiej pewne zastrzeżenia można mieć do sformułowania odnośnie „wiernego odwzorowania wartości parametrów fizyko-mechanicznych uzyskiwanych w warunkach terenowych w porównaniu do laboratoryjnych”. Parametry mieszanki MCAS nie będą zależne wyłącznie od metody zagęszczania, ale również od warunków, a w jakich mieszanka „dojrzeje” (spoiwo hydrauliczne). W technologii *in situ* warunki są zmienne, a metody laboratoryjne kondycjonowania próbek nie uwzględniają tego.

Celem pracy było określenie wpływu laboratoryjnych metod zagęszczania (ubijak Marshalla, prasa hydrauliczna, prasa żyratorowa) na zmiany cech fizycznych i mechanicznych recyklowanych mieszanek wytworzonych w technologii na zimno z asfaltem spienionym, przeznaczonych na warstwę podbudowy nawierzchni drogowej. Brakuje, w tak sformułowanym celu, stwierdzenia odnoszącego się do właściwości mieszanek MCAS wbudowywanych w technologii *in situ*, co zostało w pewien sposób zawarte w drugiej z tez pracy.

2.5. Struktura rozprawy, język i redakcja pracy

Strukturę pracy można uznać za właściwą. Część teoretyczna stanowi ok. 30% całości rozprawy, badawcza ok. 70%, co wydaje się racjonalne w tego rodzaju pracach. Najbardziej wartościowym ze względów naukowych jest rozdział 4, odnoszący się do części badawczo-analitycznej.

Pewien niedosyt budzi rozdz. 4.7, w którym w sposób niedostateczny omówiono warunki związane z wytworzeniem mieszanki MCAS na drodze i jej zagęszczeniem, warunkami temperaturowymi, czasem od momentu wytworzenia mieszanki do jej zagęszczenia w laboratorium (mógł on się znacząco różnić w przypadku wykonywania próbek różnymi metodami z tej samej partii mieszanki).

Pewne zastrzeżenia można mieć również do rozdz. 4.6. Zamieszczono tam opis procedury badania tomografem komputerowym (jak i samego urządzenia). Tego typu zapisy powinny się znaleźć w rozdz. 4.2.3.

W rozprawie brak streszczenia w języku angielskim.

Pod względem edytorskim rozprawa jest napisana poprawnie, język techniczny odpowiada tematyce i poruszonym zagadnieniom. W tekście można dopatrzyć się dość licznych błędów interpunkcyjnych, ale ich znaczenie na ogólny ogląd pracy jest znikome. Pojawiają się również usterki redakcyjne, np.:

- literówki w tekście, np. „... wygaś patent na spieniania lepiszczy asfaltowych” (str. 15) czy też „odchodzenie badaczy na święcie i w kraju...” (str. 173);
- ujednolicenia wymaga styl podpisów rysunków i tabel (kończenie ich kropkami bądź nie),
- na str. 15 jest napisane: „... głównie w takich krajach jak Australia, Wielka Brytania, Francja i Skandynawia”. Skandynawia to region północnej Europy obejmujący Szwecję, Norwegię i Danię;
- wzory przywołane w tekście powinny być opatrzone nawiasami, np. (4.1);
- wzór (3.1) – błędnie opisany indeks. Jest (z prawej strony znaku równości): „ W_{dod} ”, powinno być: „ W_{opt} ”;
- na str. 55 jest napisane: „Podobnie jak ręczny ubijak Marshalla, jednak obecnie jest praktycznie niestosowany do przygotowania próbek przede wszystkim ze względu na uciążliwość...”, czy też fragment z tej samej strony: „Zastosowanie prasy statycznej pozwala ..., a łatwe sterowanie procesem zagęszczania w czasie pozwala na uzyskanie *powtarzalnych wyników przygotowania próbek*”
- skrót „wg” nie kończy się kropką (str. 157);
- oś pozioma na rys. 4.48 została opisana jako „Przedziały średnicy porów [mm^3]” – powinno być „Przedziały objętości porów [mm^3]”;

Część graficzna pracy jest estetyczna, rysunki wykonano ze starannością, w sposób czytelny i przejrzysty. Wyjątek może stanowić rys. 3.3 (str. 28), którego jakość budzi zastrzeżenia, a opis powinien być dostosowany do języka publikacji (w tym przypadku j. polskiego).

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 wstępie napisał, że „Mieszanka taka, po wymieszaniu przy zachowaniu optymalnej wilgotności, pozwala uzyskać pełnowartościową warstwę podbudowy drogowej”. Zdaniem recenzenta parametry warstwy podbudowy mieszanka osiągnie po jej zagęszczeniu i po procesie dojrzewania.

2. Drugą z tez (str. 12) sformułowano w następujących sposób: „Odpowiedni wybór laboratoryjnej metody zagęszczania, pozwala odzwierciedlić proces zagęszczania mieszanki MCAS in situ, co skutkuje wiernym odwzorowaniem wartości parametrów fizyko-mechanicznych uzyskiwanych w warunkach terenowych w porównaniu do laboratoryjnych”. Można zadać pytanie – czy czynniki zewnętrzne (np. klimatyczno-pogodowe, wilgotnościowe) oprócz metody zagęszczania nie będą wpływały na właściwości mieszanek MCAS wykonywanych in situ? Jak zatem porównywać mieszanki z drogi z mieszankami kondycjonowanymi w laboratorium z uwzględnieniem wiernego odwzorowania ich cech?
3. Na str. 20 jest napisane, że „Przyjęty system spowodował rozszerzenie liczby występujących na rynku rodzajów emulsji z 10 do 35”. W normie PN-EN 13808:2013 wyspecyfikowano 9 rodzajów emulsji, z czego 3, 4 i 8 jest dwójakiego przeznaczenia (PU/RC i ZM/R).
4. Błędnie oznaczony rozdz. 3.6 Podsumowanie (zarówno w spisie treści jak i w tekście pracy) – powinno być: rozdz. 3.5.
5. W wytycznych z 2019 r. dopuszczono stosowanie mieszanek MCE do ruchu kategorii od KR1 do KR7 (w zakresie KR5-KR7 – projektowanie indywidualne). Na str. 15 i 25 ograniczono to do KR6.
6. Na str. 27 przedstawiono krzywe dobrego uziarnienia dla mieszanki MCE na ruch KR3-4. Te krzywe obowiązują również dla kategorii KR5-7, przy indywidualnym projektowaniu nawierzchni.
7. Na str. 31 i 32 błędnie opisana emulsja asfaltowa jako C60B5 R (w zakresie klasy emulsji – jej indeksu rozpadu). Tego rodzaju emulsji nie przewiduje norma PN-EN 13808:2013 oraz Instrukcja z 2019 r. Taki rodzaj znalazł się w WT-3 Emulsje asfaltowe 2009. Prawidłowy zapis: C 60 B 10 ZM/R.
8. W tab. 3.3 nie zawarto informacji odnośnie maksymalnej zawartości wolnej przestrzeni w przypadku mieszanek z destruktem smołowym.
9. W tab. 3.5 zestawiono wymagania do oceny mieszanek MCAS. Zrezygnowano z oznaczenia wytrzymałości na ściskanie osiowe USC, które jest jednym z badań zawartych w Instrukcji [29]. Co było powodem odstąpienia od wykonania tego oznaczenia?
10. Na str. 46 jest napisane: „We Francji Próbkę zagęszczane są poprzez dwustronne statyczne zagęszczanie, podobnie jak ma to miejsce w Niemczech”. W opisanej na str. 44-45 metodzie niemieckiej nie wspomniano o zagęszczaniu dwustronnym próbek.
11. Na str. 49-51 porównywano wartości wskaźników MSI i MRI dwóch mieszanek o zróżnicowanej początkowej zawartości wolnej przestrzeni. Takie analizy powinny uwzględniać rodzaj mieszanek i projektowaną wolną przestrzeń. Czy można w ten sposób porównywać mieszanki na warstwę ścieralną (i projektowaną wolną przestrzeń 2-3%) z mieszankami na warstwę podbudowy o wolnej przestrzeni 7-9%?
12. W rozdz. 4.1 (plan badań) i rozdz. 4.2. (metodyka badawcza) brak informacji odnośnie ilości próbek wykorzystanych do poszczególnych oznaczeń. Takiej informacji nie można się dopatrzeć w całej pracy, a jest to jeden z elementów, który powinien być uwzględniany w analizach statystycznych.
13. Jednym z oznaczeń wstępnych była analiza sitowa na mokro destruktu asfaltowego. Uziarnienie tego materiału i podatność na rozdrabnianie zależy od wielu czynników, np. rodzaju warstwy, rodzaju mieszanki i jej uziarnienia, grubości frezowanej warstwy czy rodzaju frezarki. Czy Autor sprawdził, jakie zmiany pod względem uziarnienia zachodzą w destrukcie po jego zagęszczaniu w próbce z destruktem kamiennym i kruszywem doziarniającym (bez udziału cementu i asfaltu spienionego)?
14. Na str. 60 (i str. 67) błędnie podano rodzaj oznaczenia (gęstość objętościowa destruktu asfaltowego) – prawidłowe nazwa oznaczenia „gęstość”, co potwierdza norma (PN-EN 12697-5), na którą powołuje się Autor. Podobny błąd wkradł się w dalszej części i dotyczy gęstości destruktu kamiennego (jest: gęstość objętościowa).

15. W rozdz. 4.2 (część opisowa badań) nie zawarto jakichkolwiek informacji odnośnie metody badania struktury mieszanki MCAS (po jej zagęszczeniu różnymi metodami) za pomocą tomografii komputerowej. Autor umieścił go w części wynikowej, tj. w rozdz. 4.6 dla etapu III.
16. Etap projektowania mieszanek MCAS został ograniczony wyłącznie do doboru ilościowego składników oraz optymalizacji zawartości wody metodą Proctora. Takie ograniczenie nasuwa pewne wątpliwości – co w przypadku, gdyby badania w etapie II wykazałyby, że właściwości mieszanek MCAS zagęszczanych ubijakiem Marshalla (metoda konwencjonalna) nie spełniają założonych wymagań (tab. 3.4-tab. 3.5)?
17. Metoda Proctora jest stosowana do wyznaczenia maksymalnej gęstości objętościowej szkieletu i wilgotności optymalnej gruntów, kruszyw czy też mieszanek mineralnych. Jednym z założeń jest maksymalne 5-cio krotne zagęszczanie tej samej próbki (przy zmianie wilgotności) i wynika z możliwych zmian w uziarnieniu kruszywa. Czy przyjęcie tej metody w przypadku mieszanek z udziałem destruktu asfaltowego jest właściwe? Czy kontrolowano zmiany w uziarnieniu mieszanek po każdym z zagęszczeń? Czy zmiana gęstości objętościowej mieszanki MCAS przy kolejnym zagęszczaniu była efektem wyłącznie dodatku wody, czy też częściowo zmiany w uziarnieniu destruktu?
18. Na str. 63 jest napisane, że gęstość objętościowa próbek MCAS została określona zgodnie z PN-EN 12697-6 wg procedury B (SSD – próbka nasycona, powierzchniowo sucha). Nasuwa się w związku z tym kilka pytań:
 - Czy procedura B (SSD) jest przeznaczona dla próbek o zawartości wolnej przestrzeni powyżej 9%? W przywołanej w tekście pozycji literatury [20] jest zapis, że gęstość objętościowa powinna być oznaczana wg procedury D, tj. na podstawie wymiarów.
 - Czy przy częściowo odsłoniętych kruszywach (nie pokrytych błonką asfaltu) nie dochodzi do wnikania wody w ich strukturę?
 - W normie jest zapis, że próbki przetrzymywane są w wodzie w czasie od 30 min do 3 godz. Może mieć to znaczenie w przypadku kruszyw o dużej nasiąkliwości (nie pokrytych błonką asfaltu). Jaki zatem czas nasycania wodą przyjęto do oznaczenia gęstości objętościowej próbek MCAS?
19. Na str. 65-66 opisano procedurę oznaczenia modułu sztywności IT-CY, powołując się na normę PN-EN 12697-26:2012. W 2018 r. wprowadzono w zapisach zmiany, których nie uwzględniono w opisie do procedury, np. wymagań (w tym aparaturowych) dotyczących rzeczywistego obciążenia sinusoidalnego). Nieaktualny jest w tym przypadku przedstawiony na str. 67 wzór (4.8).
20. Na str. 66 jest napisane: „Wynikiem badania jest średnia wartość modułu z pięciu pomiarów badawczych”. Zgodnie z PN-EN 12697-26 wynikiem oznaczenia modułu sztywności IT-CY jest wartość średnia z pięciu impulsów. Wynik badania to średnia z dwóch oznaczeń, mierzonych w dwóch średnicach przy spełnieniu wymagań co do rozrzutu wartości uzyskanych w poszczególnych oznaczeniach.
21. W rozdz. 4.4 przedstawiono wyniki zawartości wolnej przestrzeni w próbkach. Wartości te wyznaczono na podstawie gęstości i gęstości objętościowej próbek. Na str. 63 napisano, że gęstość na etapie wytwarzania mieszanki mineralno-asfaltowej była wyznaczana metodą objętościową. Ile oznaczeń gęstości wykonano i czy były różnice w wartościach gęstości pomierzonych i obliczonych metodą matematyczną na etapie projektowania?
22. W analizach statystycznych wykorzystywano analizę wariancji ANOVA. W tekście rozprawy brak informacji, czy zostały spełnione założenia tej analizy. Wymogi odnośnie mierzalności cech i ich niezależności nie budzą wątpliwości, natomiast należy zadać pytanie co do normalności rozkładu zmiennych jak i jednorodności wariancji we wszystkich populacjach.
23. Na rys. 4.11. przedstawiono interpretację graficzną zawartości wolnych przestrzeni w funkcji parametrów procesu zagęszczania w prasie żyratorowej dla mieszanek M1, M2 oraz M3. Zamieszczono tam również wzory definiujące wpływ poszczególnych czynników na zawartość

- wolnej przestrzeni. We wszystkich trzech wzorach trzy z czynników (OL^2 , Op^2 , $0,OLp$) dają wartość równą 0, zatem jaki jest cel ich umieszczania? Podobnie jest ze wzorami na rys. 4.17.
24. Na str. 86 jest napisane: Dla zagęszczania w czasie 1 minuty wszystkie wyniki charakteryzowały się wartościami wolnych przestrzeni większymi od metody referencyjnej, natomiast statystyczny brak istotności wykazały próbki zagęszczane siłą 80 kN oraz 60 kN. Zgodnie z rys. 4.12 dla czasu 1 min przy sile 100 kN średnia wartość wolnej przestrzeni jest niższa od referencyjnej, natomiast statystyczny brak istotności wykazały próbki zagęszczane siłą 80 i 100 kN.
 25. Uzyskane wyniki modułu sztywności w 25°C dla mieszanki M2 nie spełniają wymagań w zakresie jej minimalnej wartości (4500 MPa). Czy zatem powinny być one uwzględniane w dalszych analizach statystycznych (mieszanka nie spełnia zakładanych wymagań wyjściowych – tab. 3.4-3.5).
 26. Na str. 171 jest napisane, że jednym z etapów w ramach realizacji przebudowy DW nr 795 było „frezowanie odprężające wraz z rozłożeniem frezu”. Co to jest frezowanie *odprężające*?
 27. Rozdz. 4.7 jest poświęcony odcinkowi doświadczalnemu. Zamieszczono skład ramowy mieszanki MCAS, jej uziarnienie oraz podstawowe cechy. Brak jednak podstawowych informacji odnośnie materiałów wsadowych pozyskanych z drogi, tj. destruktu asfaltowego i kamiennego czy też kruszywa doziarniającego.
 28. W tab. 4.66 zamieszczono informacje odnośnie materiałów wsadowych oraz parametrów mieszanki MCAS. Analizując te zapisy nasuwa się kilka pytań:
 - Czy wielkość 1.32% (zdefiniowana jako zawartość lepiszcza w destrukcie asfaltowym) odnosi się bezpośrednio do destruktu asfaltowego czy też określa zawartość lepiszcza w destrukcie, ale w przeliczeniu na mieszankę MCAS?
 - Czy gęstość mieszanki mineralnej równa 2.635 g/cm³ to gęstość wyłącznie agregatu mineralnego w całej mieszance MCAS (również z uwzględnieniem agregatu mineralnego z destruktu asfaltowego)?
 29. Na rys. 4.61 przedstawiono wartości wolnej przestrzeni w mieszance MCAS w próbkach zagęszczanych różnymi metodami. Nie podano ilości wykonanych próbek dla każdej z metod laboratoryjnych. Brak również informacji odnośnie ilości wyciętych próbek z nawierzchni. Zaskakująca jest natomiast bardzo duża jednorodność próbek z drogi pod względem zawartości wolnej przestrzeni. Czy próbki z nawierzchni pobierano z jednej czy kilku działek roboczych? Czym można uzasadnić tak dużą jednorodność próbek zagęszczanych w skali technicznej?
 30. Na str. 174 jest napisane, że zawartość wolnych przestrzeni zgodnie z SST powinna mieścić się w zakresie od 9% do 15%, natomiast w tab. 4.66 zakres ten wynosi 9-16%.
 31. Na str. 174 jest napisane, że próbki wywiercone z nawierzchni charakteryzowały największą średnią zawartością wolnych przestrzeni wynoszącą 14,5%. Z wykresu na rys. 4.61 wynika, że wartość ta wynosi 13.93%. Która jest właściwa?
 32. Pobieranie próbek (MCE czy też MCAS) z nawierzchni jest problematyczne. Może dojść w trakcie wycinania próbki do uszkodzeń struktury mieszanki, co może przekładać się na wzrost zawartości wolnej przestrzeni (szczególnie przy oznaczaniu gęstości objętościowej metodą ρ_{bssd}).
 33. Jak były przygotowywane próbki pobrane z drogi do badania wytrzymałości na pośrednie rozciąganie oraz modułu sztywności? Czy mogło dojść do uszkodzenia struktury mieszanki w wyniku kilkukrotnego cięcia próbek (nawierzchnia, laboratorium)?
 34. Warunki kondycjonowania wpływają na właściwości mieszanki MCAS. W zakresie prowadzonych badań i oznaczeń były próbki MCAS pobrane z nawierzchni. Jakie były warunki „dojrzwania” warstwy z mieszanki MCAS w drodze? W tekście pracy brak informacji na ten temat.
 35. Co mogło być przyczyną braku istotności wpływu metody zagęszczania na ITS_m w etapie IV? Taką istotność stwierdzono w przypadku ITS_s.

36. Czy wyniki uzyskane na próbkach z drogi można uznać za wiarygodne (z uwzględnieniem skali: ilość próbek z danego odcinka, ilość odcinków, warunki klimatyczno-pogodowe, parametry zagęszczania, miejsca pobrania próbek itp.)?

4. Ocena końcowa

Przedstawioną do recenzji pracę oceniam dość 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 inżynieria lądowa i transport, a precyzując – technologii recyklingu na zimno z udziałem destruktu asfaltowego (smołowego), cementu i asfaltu spienionego. W pracy przeanalizowano możliwości zastosowania alternatywnej (w stosunku do ubijaka Marshalla) metody zagęszczania mieszanki MCAS z wykorzystaniem prasy statycznej i prasy żyratorowej. Szczególnie przydatna do celów praktycznych wydaje się metoda zagęszczania prasą statyczną, którą to metodę można wykorzystać bezpośrednio „na drodze”. Jest to szczególnie ważne w przypadku prowadzenia robót w okresie letnim (wysokich temperatur powietrza) oraz dużych odległościach budowy od pomieszczeń laboratoryjnych, w których są zagęszczane próbki. Ponadto umożliwia ona formowanie próbek z mieszanek o uziarnieniu do 31.5 mm (w stosunku do 22.4 mm w przypadku ubijaka Marshalla), co jest standardem w tego typu rozwiązaniach. Przydatność prasy żyratorowej można wartościować w aspekcie oceny podatności do zagęszczania mieszanek MCAS, co jest bardzo ważne w przypadku procesów technologicznych in situ (struktura mieszanek).

Sformułowane przez Autora tezy pracy znalazły swoje potwierdzenie w wynikach badań, popartych szczegółową analizą i testami statystycznymi. Cel pracy, którym było określenie wpływu laboratoryjnych metod zagęszczania na zmiany cech fizycznych i mechanicznych recyklowanych mieszanek wytworzonych w technologii na zimno z asfaltem spienionym, można uznać za zrealizowany.

W związku z powyższym uważam, że praca doktorska Pana mgr inż. Piotra Ramiączka 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.

