

Wrocław, 14.05.2024

Prof. dr hab. inż. Dariusz Łydzba
Wydział Budownictwa Lądowego i Wodnego
Politechnika Wroclawska

Recenzja rozprawy doktorskiej mgr inż. Mateusza Jackowskiego „Kompozyt cementowy z częściowym wykorzystaniem naturalnych substytutów i materiałów odpadowych”

Podstawa opracowania recenzji: pismo płk. prof. dr hab. inż. Michała Kędzierskiego, Przewodniczącego Rady Dyscypliny Inżynieria Lądowa, Geodezja i Transport Wojskowej Akademii Technicznej, z dnia 16.11.2023 r.; otrzymane 06.12.2024 r.

1. Uwagi ogólne

Recenzowana rozprawa dotyczy zagadnienia oceny wpływu wykorzystania w matrycy cementowej „zamienników” cementu, tj.: metakaolinitu, mikrometakaolinitu oraz zeolitu, na właściwości mechaniczne i cieplne kompozytu betonowego ze zbrojeniem rozproszonym. Jako zbrojenie rozproszone zastosowano materiały odpadowe, tj. włókna polipropylenowe, włókna szklane oraz pręciki stalowe pozyskane w procesie recyklingu zużytych opon.

Rozwiązania zagadnienia dokonano realizując program badań laboratoryjnych, w którym oznaczano, dla badanego materiału, jego wartości zastępczych stałych materiałowych, tj.: sprężystości (moduł Younga), cieplnych (ciepło właściwe, przewodność cieplna, dyfuzyjność cieplna) oraz wytrzymałości (na jednoosiowe ściskanie, na rozciąganie przy rozłupywaniu, na zginanie). Badania mechaniczne kompozytu betonowego realizowano na próbkach: sześciennych 100 mm x 100 mm x 100 mm – wytrzymałość na jednoosiowe ściskanie, prostopadłościennych beleczkach 40 mm x 40 mm x 160 mm – wytrzymałość na zginanie oraz próbkach walcowych o średnicy 150 mm i wysokości 300 mm – wytrzymałość na rozciąganie przy rozłupywaniu.

Cechy cieplne oznaczano metodą impulsową na próbkach sześciennych o krawędzi 150 mm.

Badania różnicowano ze względu na wykorzystywany materiał betonowy, tj. stosowano do wytworzenia matrycy cementowej, wymienione powyżej, trzy rodzaje zamienników cementu w udziale frakcyjnym równym odpowiednio 5%, 10% i 15% oraz trzy typy zbrojenia rozproszonego w udziale frakcyjnym do 1,5%.

Program badań laboratoryjnych został dobrze zaplanowany, zrealizowany a uzyskane wyniki otrzymały analizą ilościową i jakościową. Badania właściwości mechanicznych oraz cieplnych uzupełniono o strukturalne badania laboratoryjne z wykorzystaniem mikroskopu optycznego oraz skaningowego mikroskopu elektronowego. W badaniach strukturalnych dokonano zobrazowania materiałów zastępczych cementu oraz materiałów odpadowych stanowiących zbrojenie rozproszone oraz oceniono ich skład chemiczny.

Analizowany w pracy doktorskiej problem jest interesujący, ważny i aktualny. Pracę doktorską stanowią: rozszerzony 66 stronicowy opis, w języku polskim, nadający całej pracy przejrzysty, zwarty charakter dysertacji doktorskiej oraz 4 załączniki będące artykułami opublikowanymi w języku angielskim w recenzowanych czasopismach tworzących tzw. monotematyczny cykl publikacji, w których doktorant jest współautorem. W dwóch pierwszych pracach udział doktoranta deklarowany jest na poziomie 50% a w kolejnych odpowiednio 55% oraz 90%. Udział doktoranta potwierdzony jest stosownymi deklaracjami przez współautorów publikacji.

Całość pracy, tj. rozszerzony 66 stronicowy opis oraz 4 wieloautorskie artykuły, z udziałem doktoranta powyżej 50% w każdym z nich, może być traktowana jako dysertacja doktorska w sensie formalnym – poniżej dokonano więc jej szczegółowej recenzji z ostateczną konkluzją o dopuszczeniu lub nie doktoranta do jej publicznej obrony.

2. Treść pracy

Obecnie omówię krytycznie treść pracy. Konsekwentne omówienie poszczególnych rozdziałów ograniczę do rozszerzonego 66 stronicowego opisu doktoratu. Doktorant w tym opisie odwołuje się do poszczególnych artykułów stanowiących zasadnicze uzupełnienie pracy i w tym sensie wyszczególnione uwagi krytyczne do rozdziałów są również konsekwencją treści poszczególnych artykułów.

Rozdział 1 to wykaz publikacji będących podstawą rozprawy doktorskiej. Wyszczególniono cztery publikacje, wszystkie opublikowane w czasopismach naukowych, w języku angielskim.

Nie mam uwag krytycznych.

Rozdział 2 W tym rozdziale autor formułuje cel, tezę i zakres rozprawy. Zamierza potwierdzić, na drodze badań laboratoryjnych, że możliwe jest zaprojektowanie kompozytu cementowego z substytutami cementu i materiałem odpadowym o podwyższonej wytrzymałości.

Trzon rozprawy stanowią będą typowe badania laboratoryjne kompozytów betonowych realizowane na: próbkach sześciennych, walcowych oraz na belkach „laboratoryjnych”. Badania strukturalne substytutów cementu oraz materiałów odpadowych prowadzone będą z wykorzystaniem technik mikroskopowych – dokonane zostaną zobrazowania materiałów zastępczych cementu oraz materiałów odpadowych stanowiących zbrojenie rozproszone oraz dokonana zostanie ocena ich składu chemicznego. Celem badań laboratoryjnych, w etapie wstępnym, będzie identyfikacja właściwości naturalnych zamienników cementu do zastosowania w

matrycy cementowej oraz materiałów odpadowych do zastosowania jako zbrojenie rozproszone w kompozycie cementowym. Zatem celem etapu wstępnego jest charakteryzacja fizyczna i mechaniczna składników kompozytu cementowego. Kolejny etap badań doświadczalnych to badania właściwości mechanicznych i termicznych kompozytów cementowych zaprojektowanych i wytworzonych przez autora. Szczegółowej analizie doświadczalnej poddane będą kompozyty, w których w matrycy cementowej dokonano zamiany pewnej określonej masy cementu przez substytut cementu oraz kompozyty z klasyczną matrycą cementową, ale z wprowadzonym zbrojeniem rozproszonym. Celem tego programu badawczego jest ocena wpływu zbrojenia rozproszonego oraz zamienników cementu na efektywne właściwości zmodyfikowanego „dodatkiem” kompozytu cementowego.

Ostatecznym etapem pracy jest zaprojektowanie oryginalnego/autorskiego kompozytu cementowego z wykorzystaniem substytutów cementu w matrycy cementowej oraz zbrojenia rozproszonego w postaci pręcików stalowych.

Rozdział napisany jest zwięźle i jasno. Nie mam uwag krytycznych.

Rozdział 3 prezentuje uzasadnienie podjęcia się tej tematyki badawczej przez autora rozprawy doktorskiej. W uzasadnieniu przytoczono względy ekologiczne – ochrona środowiska przez ograniczenie emisji dwutlenku węgla oraz względy ekonomiczne – wykorzystanie materiałów odpadowych oraz substytutów cementu.

Rozdział napisany jasno. Nie mam uwag krytycznych.

Rozdział 4 prezentuje oryginalne wyniki badań strukturalnych autora których celem była identyfikacja właściwości fizycznych, strukturalnych oraz mechanicznych składników przeznaczonych przez autora do wbudowania w autorski kompozyt cementowy. Najpierw autor charakteryzuje cechy strukturalne i mechaniczne włókien z materiałów odpadowych, tj. z polipropylenu bądź ze szkła bądź ze stali. Włókna polipropylenowe wykonane są z plastikowych odpadów opakowaniowych, włókna szklane otrzymywane są przez proces przepływu stopionego szkła przez ogrzewane elektrycznie, platynowe płyty tulejowe i grawitacyjne rozdzielanie na drobne włókna. Pręciki stalowe uzyskiwane są przez proces cięcia gumy z opon i ich mechaniczne oddzielenie z gumy. Przedstawiane są zobrazowania tych materiałów uzyskane techniką mikroskopii elektronowej oraz skład chemiczny. Autor podaje również zidentyfikowaną wytrzymałość na jednoosiowe rozciąganie tych włókien.

Następnie charakteryzuje cechy strukturalne substytutów cementu. Uzyskane wyniki badań laboratoryjnych to ponownie zobrazowania materiałów uzyskane techniką mikroskopową oraz skład chemiczny badanych materiałów. Technika dyfrakcji laserowej utworzono histogram wielkości cząstek analizowanych zamienników cementu.

Rozdział napisany przejrzysto.

Uwagi krytyczne dotyczą głównie prezentacji wyników oraz zakresu wykonanych badań strukturalnych. W zasadzie wszystkie ilościowe wyniki badań laboratoryjnych przedstawione w pracy to wartości średnie. Brak kompletnie analizy statystycznej - nigdzie w pracy, w tym rozdziale i w następnych, nie ma podanej żadnej wartości odchylenia standardowego – szkoda, gdyż nawet dla małej liczebności próby można przecież wykorzystać np. estymator nieobciążony odchylenia standardowego. W tym świetle stwierdzenie autora w tym rozdziale: „...otrzymane wartości w przeprowadzonych badaniach włókien różniły się do ok. 8%...” jest, w sensie naukowym, bardzo lakoniczne. Wątpliwość recenzenta budzą również wyniki

przedstawione w Tab. 1, tj. w tej tabeli wartość grubości włókna jest dużo większa niż wartość obwodu włókna – zwyczajowo obwód włókna jest większy od grubości włókna. Analogiczne tabele są prezentowane w artykułach autora. Może autor inaczej definiuje grubość włókna, jeśli tak to warto byłoby podać definicję tej wielkości stosowaną przez autora w pracy. Kolejna uwaga krytyczna, stanowiąca pewien niedosyt recenzenta, to zakres badań strukturalnych: szkoda, że do charakteryzacji mikrostrukturalnej autor nie wykorzystał badań mikrostrukturalnych cech mechanicznych, np. w testach ultra-nanoindentacji. Możliwe jest wtedy, przy wykorzystaniu bardziej wysublimowanych technik nanoindentacji, oznaczenie parametrów wytrzymałościowych substytutów cementu, poza klasycznie wyznaczanym modułem indentacji.

Rozdział 5 to opis zastosowanej przez autora procedury projektowania składu mieszanki kompozytu cementowego. Dotyczy on kompozytu cementowego referencyjnego do którego będą porównywane następnie wszystkie kompozyty cementowe modyfikowane zamiennikami cementu oraz obecnością zbrojenia rozproszonego.

Rozdział napisany klarownie. Nie mam uwag krytycznych.

Rozdział 6 to prezentacja oryginalnych wyników badań autora wpływu substytutów cementu oraz zbrojenia rozproszonego na właściwości efektywne modyfikowanych kompozytów cementowych. Rozważania autor rozpoczyna od identyfikacji doświadczalnej wpływu substytutów cementowych na właściwości efektywne zmodyfikowanego kompozytu cementowego. Uwzględniane są, w prowadzonych badaniach, trzy wartości zamiany masy cementu przez substytut, tj. 5%, 10% oraz 15% dla każdego z zamienników cementu: zeolitu, metakaolinitu oraz mikrometakaolinitu. Wykonane badania cech mechanicznych, tj.: wytrzymałości na jednoosiowe ściskanie, wytrzymałości na zginanie, wytrzymałości na rozciąganie przy rozłupywaniu oraz modułu Younga potwierdziły, że w zakresach udziałów masowych zamienników cementu do 15% masy cementu:

- wszystkie trzy charakterystyczne wytrzymałości (na ściskanie, zginanie i rozciąganie przy rozłupywaniu) wykazują tendencję wzrostową wraz ze wzrostem udziału masowego zamiennika cementowego w kompozycie; ten wzrost jest na poziomie 5%-10% w stosunku do referencyjnego kompozytu cementowego bez zamienników;
- wartość modułu Younga wykazuje tendencję malejącą wraz ze wzrostem udziału masowego zamienników cementu w kompozycie; ten spadek jest na poziomie 4%-7% w stosunku do referencyjnego kompozytu bez zamienników.

Badania efektywnych właściwości termicznych, metodą impulsową na sześciennych próbkach (150 mm), modyfikowanych kompozytów potwierdziły brak wpływu zamienników cementu na: przewodność cieplną, ciepło właściwe oraz dyfuzyjność cieplną modyfikowanego kompozytu cementowego, przynajmniej w zakresie do 15% udziału masowego zamiennika cementu do pierwotnej masy cementu.

Kolejnym zagadnieniem badawczym rozważanym w tym rozdziale jest identyfikacja doświadczalna wpływu zbrojenia rozproszonego na właściwości mechaniczne i termiczne modyfikowanego kompozytu cementowego. Analizowane są trzy typy materiału tworzącego włókna zbrojenia rozproszonego, tj.: polipropylen, szkło oraz stal. Dwa różne typy włókien polipropylenowych wykorzystano do wytworzenia

kompozytu, tj. z nadanym na powierzchni bocznej żłobieniem oraz bez żłobienia. Stosowano różne masowe udziały procentowe zbrojenia rozproszonego w stosunku do masy cementu. W wyniku sekwencji badań laboratoryjnych autor wskazał, że zbrojenie rozproszone pozytywnie wpływa na wytrzymałość kompozytu, tzn. wartość wytrzymałości jest wyższa niż w analogicznym kompozycie bez zbrojenia rozproszonego.

Właściwości cieplne kompozytu ze zbrojeniem rozproszonym silnie zależą od rodzaju zastosowanego materiału w zbrojeniu, tj.:

- zbrojenie rozproszone ze stali indukuje wzrost przewodności cieplnej kompozytu, wzrost ciepła właściwego oraz spadek dyfuzyjności cieplnej;
- zbrojenie rozproszone ze szkła jak również z polipropylenu indukuje spadek przewodności cieplnej i spadek ciepła właściwego kompozytu oraz wzrost dyfuzyjności cieplnej kompozytu.

Rozdział napisany przejrzysto. Uwagi krytyczne dotyczą, przede wszystkim, prezentacji oraz zakresu wykonanych badań. Ponownie autor nie uzupełnia wyników badań o analizę statystyczną. Trudno jest więc jednoznacznie stwierdzić, bez znajomości chociażby wartości odchylenia standardowego, na temat reprezentatywności wartości średnich używanych do wnioskowania zależności jakościowych. Szkoda, że autor nie zbadał właściwości mechanicznych i termicznych składników kompozytu, tzn. materiału zbrojenia rozproszonego oraz substytutów cementu. Zdaniem recenzenta, przedstawienie wartości parametrów termicznych materiałów zbrojenia rozproszonego, stanowiłoby naturalne uzasadnienie/przewidywanie uzyskanych parametrów termicznych kompozytu. Pozwoliłoby to również zaproponować/zweryfikować powszechnie stosowane metody mikro-mechaniki analitycznej do predykcji, w terminach udziału frakcyjnego zbrojenia rozproszonego, właściwości efektywnych zmodyfikowanego kompozytu cementowego – np. metoda samo-uzgodnionego pola, metoda Mori-Tanaki, itd.

Szkoda, że autor nie oznaczał również wpływu zbrojenia rozproszonego na tzw. „ciągłość” kompozytu cementowego – bez zbrojenia rozproszonego kompozyt cementowy wykazuje tzw. cechy „kruche”.

Brak również uzasadnienia dlaczego autor ograniczył w badaniach modyfikowanych kompozytów względny udział masowy substytutów cementu do 15% skoro indukują one wzrost parametrów mechanicznych kompozytu cementowego?

Recenzent dostrzegł również błąd redakcyjny, tzn. w artykułach autora włókna polipropylenowe zielone są opisane jako te bez dodatkowego żłobienia natomiast z dodatkowym żłobieniem są włókna polipropylenowe białe – w rozszerzonym 66 stronicowym opisie jest odwrotnie.

Rozdział 7 to konsekwencja autorskich badań przedstawionych we wcześniejszych rozdziałach. Wykorzystując otrzymane wyniki wpływu zamienników cementu oraz zbrojenia rozproszonego na właściwości efektywne kompozytu cementowego autor projektuje oryginalny skład nowego kompozytu cementowego. Stosuje w nowym kompozycie równoczesne wykorzystanie trzech zamienników cementu, każdy w proporcji wagowej 5% w stosunku do masy cementu w referencyjnym kompozycie oraz zbrojenie rozproszone z pręcików stalowych w proporcji wagowej 1.5% do masy cementu w kompozycie referencyjnym. Ten optymalny kompozyt został wyselekcjonowany z przebadanych 20 różnych oryginalnych receptur kompozytu

cementowego. W każdym z nich stosowano pojedynczo lub równocześnie zamienniki cementu w matrycy cementowej oraz trzy rodzaje zbrojenia rozproszonego.

Rozdział napisany jest dobrze. Nie mam, w zasadzie, uwag krytycznych poza jedną: W podpisie pod Rys.21 autor używa błędnie: "Krzywe naprężenie-odkształcenie określone doświadczalnie dla (a) trzypunktowego zginania ..." – o którą składową naprężenia i odkształcenia oraz w którym miejscu zginanej beleczki chodzi autorowi; w przypadku zginanej belki jest to niejednorodne pole naprężenia i niejednorodne pole odkształcenia, zatem nie ma jednoznaczności i taki podpis jest niewłaściwy.

3. Ocena pracy

Recenzowana praca dotyczy zagadnienia ważnego, aktualnego, trudnego i interesującego, tj.: oceny możliwości wykorzystania materiałów zamiennych dla cementu do wytworzenia wysokowartościowego kompozytu betonowego o zmodyfikowanej matrycy cementowej ze zbrojeniem rozproszonym wytworzonym z materiałów odpadowych.

Badania prowadzono wieloetapowo, tzn. najpierw zaprojektowano i wytworzono referencyjny kompozyt cementowy, bez żadnych domieszek, dla którego zidentyfikowano właściwości fizyczne, mechaniczne oraz termiczne. Kolejne etapy to zaprojektowanie i wytworzenie kompozytu cementowego z wymianą określonej masy cementu w matrycy cementowej przez materiał zastępczy – stosowaną w badaniach wielkość wymiany cementu ograniczono do 15% pierwotnej masy cementu zastosowanej w referencyjnym kompozycie cementowym. Wykorzystano trzy zamienniki cementu, tj.: metakaolinit, mikrometakaolinit oraz zeolit. Oczywiście dla wytworzonych nowych z „wymianą cementu” kompozytów cementowych zidentyfikowano w sposób laboratoryjny, analogicznie jak dla referencyjnego kompozytu cementowego, właściwości fizyczne, mechaniczne oraz termiczne. Umożliwiło to autorowi dokonanie analizy porównawczej: nowy kompozyt-kompozyt referencyjny i w konsekwencji ocenę ilościową i jakościową wpływu zamienników cementowych na właściwości zmodyfikowanych kompozytów cementowych. W analogiczny sposób dokonano w pracy identyfikacji zbrojenia rozproszonego na właściwości efektywne kompozytów cementowych. W tym etapie badań referencyjny kompozyt cementowy modyfikowany był jedynie przez „wprowadzenie”, do jego mikrostruktury, zbrojenia rozproszonego. W pracy analizowano wpływ trzech typów zbrojenia rozproszonego, tzn. w postaci włókien polipropylenowych, włókien szklanych oraz „pręcików” stalowych. Analiza porównawcza była analogiczna jak dla kompozytu z zamiennikami cementu w matrycy cementowej.

Zidentyfikowany wpływ poszczególnych zamienników cementu oraz zbrojenia rozproszonego na właściwości mechaniczne i termiczne kompozytów z matrycą cementową pozwolił autorowi, w konsekwencji, zaprojektować i wytworzyć nowy oryginalny kompozyt cementowy w którym zastosowano równocześnie trzy zamienniki cementu, tj. zeolit, metakaolinit oraz mikrometakaolinit, każdy w udziale masowym 5% pierwotnej masy cementu. Jako zbrojenie rozproszone zaproponowano wykorzystanie pręcików stalowych, tzn. wykorzystano materiał „odzyskany” ze zużytych opon samochodowych.

Przedstawione badania laboratoryjne i ich wyniki oraz wykonane analizy porównawcze są oryginalnym osiągnięciem Autora. Zastosowanie konsekwentnego podejścia laboratoryjnego, z wykorzystaniem testów jednoosiowego ściskania na próbkach sześciennych, rozłupywania na próbkach walcowych jak również testów trójpunktowego zginania na belkach „laboratoryjnych” pozwoliło autorowi w sposób obiektywny zaproponować autorski skład kompozytu betonowego z wykorzystaniem zamienników cementu oraz materiałów odpadowych jako zbrojenie rozproszone.

Prezentowane w pracy wyniki i stwierdzenia stanowią oryginalne rozwiązania problemu naukowego w dyscyplinie inżynieria lądowa, geodezja i transport. Recenzowana praca doktorska potwierdza również ogólną wiedzę autora w dyscyplinie inżynieria lądowa, geodezja i transport oraz Jego gotowość do prowadzenia samodzielnych badań naukowych.

Wyszczególnione przez recenzenta, przy omawianiu treści rozprawy, uwagi krytyczne czynią jedynie pewien „niedosyt” co do prezentacji, ale nie mają wpływu na jakość sformułowanych w dysertacji wniosków końcowych oraz na ostateczną pozytywną ocenę recenzowanej pracy.

4. Wniosek końcowy

Uważam, że oceniana rozprawa doktorska spełnia wymogi Ustawy (Dz.U. z 2018 r., poz. 1668) i wnioskuję o dopuszczenie mgr inż. Mateusza Jackowskiego do publicznej obrony rozprawy doktorskiej pt. „Kompozyt cementowy z częściowym wykorzystaniem naturalnych substytutów i materiałów odpadowych”.

