



dr hab. inż. Tomasz Tracz, prof. PK
Katedra Inżynierii Materiałów Budowlanych
Wydział Inżynierii Lądowej
Politechniki Krakowskiej
ul. Warszawska 24
31-155 Kraków
e-mail: tomasz.tracz@pk.edu.pl

Kraków, 22 grudnia 2023 r.

RECENZJA

rozprawy doktorskiej

mgr inż. Agnieszki Kocot

"Możliwość alternatywnego zagospodarowania odpadów z tworzyw sztucznych jako kruszywo w kompozytach o spoiwie cementowym lub geopolimerowym"
zrealizowanej pod opieką promotorską Pana dr hab. inż. Tomasza Ponikiewskiego, prof. PŚ
oraz Pani dr inż. Aleksandry Kostrzanowskiej-Siedlarz jako promotora pomocniczego

1. Podstawy opracowania opinii

Podstawę formalną opracowania niniejszej opinii stanowi pismo z dnia 10.10.2023 r. Przewodniczącego Rady Dyscypliny Inżynieria Lądowa Geodezja i Transport Politechniki Śląskiej, Pana dr hab. inż. Marcina Staniek, prof. PŚ, zawierające zlecenie wykonania niniejszej recenzji.

Podstawę merytoryczną opracowania opinii stanowił załączony do zlecenia kompletny tekst rozprawy doktorskiej mgr inż. Agnieszki Kocot pod tytułem jak wyżej.

Podstawę prawną recenzji stanowi Ustawa z dnia 20 lipca 2018 r. Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz.U. z 2018 r. poz. 1669, z późn. zm).

2. Przedmiot recenzji

Przedmiotem recenzji jest rozprawa doktorska autorstwa Pani mgr inż. Agnieszki Kocot pt. Możliwość alternatywnego zagospodarowania odpadów z tworzyw sztucznych jako kruszywo w kompozytach o spoiwie cementowym lub geopolimerowym. Promotorem rozprawy jest dr hab. inż. Tomasz Ponikiewski, prof. PŚ, a promotorem pomocniczym – dr inż. Aleksandra Kostrzanowska-Siedlarz. Rozprawa została przygotowana w Katedrze Procesów Budowlanych i Fizyki Budowli na Wydziale Budownictwa Politechniki Śląskiej w Gliwicach.



3. Charakterystyka rozprawy oraz uwagi ogólne

Recenzowana rozprawa doktorska dotyczy możliwości zagospodarowania odpadów z tworzyw sztucznych jako składników kompozytów cementowych i geopolimerowych. Rozprawa ma typowy charakter opracowania studialno-doświadczalnego. Praca napisana jest w języku polskim i liczy 208 stron formatu A4. Składa się z 10 rozdziałów poprzedzonych objaśnieniem stosowanych symboli i zakończona jest spisem literatury.

W części studialnej w pierwszej kolejności w rozdziale 1 Doktorantka we wstępie przedstawia ogólne informacje wprowadzające do tematyki związanej z zanieczyszczeniem środowiska odpadami. Następnie prezentuje charakterystykę tworzyw sztucznych koncentrując się na właściwościach PET (politereftalan etylenu). W dalszej części znajdziemy obszernie dane dotyczące produkcji odpadów na przestrzeni lat w Polsce opracowane na podstawie raportu „Ochrona środowiska” przygotowywanego rok rocznie przez GUS (Główny Urząd Statystyczny). Autorka nie ograniczając się tylko do danych krajowych prezentuje również dane pochodzące z raportów publikowanych przez organizacje międzynarodowe np. przez Organizację Współpracy Gospodarczej i Rozwoju OECD (Organisation for Economic Cooperation and Development). Ponadto Autorka prezentuje dane dotyczące produkcji jednego z głównych materiałów budowlanych jakim jest cement, jako współodpowiedzialnego za wysoką emisję gazów cieplarnianych.

Rozdział 2 to w zasadzie zasadnicza część przeglądu literatury i prezentacja dostępnych w literaturze danych. Autorka rozpoczyna ten rozdział od omówienia wpływu dodatku tworzywa sztucznego PET występującego w różnych postaciach na właściwości zapraw i betonów. Zdecydowała się przedstawiać zgromadzone dane w dużych tabelach a następnie tuż pod nimi zamieszczać statystyczną analizę zgromadzonych danych. Podrozdział 2.1.4 nieco odstający tematem od pozostałych, dotyczy charakterystyki spoiw aktywowanych alkalicznie. Ostatni podrozdział rozdziału 2 to ciekawe informacje o stosowanych przez wielu badaczy modyfikacji tworzyw sztucznych jako składników zapraw i betonów.

Rozdział 3 to podsumowanie analizy literatury. Biorąc pod uwagę obszerność analizowanych danych, podsumowanie jest raczej skromne.

Cele i tezy pracy zostały zaprezentowane w rozdziale 4. Głównym celem pracy była ocena „zasadności stosowania” tworzyw sztucznych jako komponentów składu kompozytów cementowych lub aktywowanych alkalicznie. W moim przekonaniu sformułowanie „zasadności stosowania” winno być oparte o jakieś kryteria, które jednoznacznie wskazywałyby ową „zasadność”. Kolejnym celem było znalezienie sposobu na zminimalizowanie negatywnego wpływu kruszywa odpadowego na wytrzymałość zapraw. Wydaje się jednak, po lekturze całości pracy iż zaproponowane cele nie w pełni pokrywają zrealizowany zakres prac badawczych.

Autorka na podstawie rozpoznanej literatury zaproponowała dwie tezy badawcze. Pierwsza mówiąco tym, że tworzywo sztuczne jako substytut kruszywa naturalnego w kompozytach cementowych może mieć pozytywny wpływ na wybrane parametry wytrzymałościowe lub trwałościowe, a druga, że istnieje metoda



pozwalająca na stosowanie odpadów z tworzywa sztucznego jako kruszywa w kompozytach cementowych lub aktywowanych alkalicznie, bez redukcji parametru wytrzymałości na ściskanie. Tez pierwsza choć jasno sformułowana wydaje się mieć raczej słabe podstawy w zaprezentowanym przeglądzie literatury. Druga teza w swej treści jest niejasna, a dokładniej trudno przewidzieć o jakiej metodzie Autorka myśli. Na szczęście dla wyjaśnienia tezy drugiej Autorka proponuje cztery hipotezy pomocnicze które nie pozostawiają wątpliwości jakie zagadnienia będą przedmiotem prac badawczych. Rozdział 4 kończy prezentacja zakresu badań własnych.

Obszerny rozdział 5 poświęcono przedstawieniu charakterystyki materiałów stosowanych w badaniach oraz omówieniu metod badawczych. W pierwszych dwóch podrozdziałach Autorka prezentuje koncepcję badań i rodzaje badanych kompozytów. Koncepcję badań zamieszcza na schemacie a szczegółowe zróżnicowanie składów analizowanych kompozytów wraz z przypisanym zakresem badań w tabelach 11 i 12. Zakres zarówno zróżnicowania serii badawczych jak również stosowanych metod jest wystarczający. Poziomą szczegółowość opisów jest adekwatny do stopnia skomplikowania metod badawczych.

Bardzo rozbudowany rozdział 6 zajmuje połowę objętości pracy i jest poświęcony prezentacji wyników badań własnych. Najczęściej przyjęto następujący schemat prezentacji: wprowadzenie, wyniki w formie wykresów i opis zaobserwowanych zmienności, tendencji itp. W pierwszej kolejności Autorka zajmuje się oceną wpływu rodzaju odpadów z tworzyw sztucznych na właściwości zapraw a następnie prezentuje wyniki badań wpływu stopnia rozdrobnienia płatków PET na właściwości zapraw. Zmienność serii badawczych w poszczególnych cechach nie zawsze była identyczna, co zapewne wynikało z merytorycznych powodów jednak stosownych wyjaśnień często brakowało w tekście pracy. Bardzo interesujące są rezultaty obserwacji SEM zapraw zawierających w swym składzie tworzywa sztuczne, dostarczają one informacji niezwykle przydatnych w wyjaśnieniu obserwowanych tendencji jakie występują na podstawie w badań wielu cech zarówno mechanicznych jak i trwałościowych. Kolejne podrozdziały poświęcone są prezentacji wyników badań energii pęknięcia, mrozoodporności oraz przepuszczalności jonów chlorkowych. Wyniki badań odporności na uderzenia zapraw są pierwszymi które częściowo potwierdzają główną tezę postawioną w ocenianej rozprawie doktorskiej, o pozytywnym wpływie kruszywa z tworzywa sztucznego na parametry kompozytów cementowych. Rezultaty badań mrozoodporności są bardzo obszerne i dostarczają wielu cennych spostrzeżeń. W dalszej kolejności Autorka prezentuje wyniki badań przepuszczalności jonów chlorkowych. Cecha ta jest często kluczowa w ocenie potencjalnej odporności kompozytów w środowisku środków odladzających. Podrozdziały 6.6 i 6.7 Autorka dedykuje ocenie modyfikacji chemicznej lub mechanicznej płatków PET jako składników zapraw. Okazuje się, że obie modyfikacje w sposób istotny wpływają na właściwości zapraw, niestety najczęściej wytrzymałość obniżając. W przypadku modyfikacji chemicznej płatków PET wykonano obszerne obserwacje SEM które koncentrowały się na opisie strefy stykowej PET - matryca kompozytu. Wnioski z tych analiz są bardzo trafne i skonfrontowane z literaturą. Zakres modyfikacji mechanicznej był obszerny jednak podobnie jak przy modyfikacji chemicznej nie osiągnięto znaczącego wzrostu wytrzymałości. Kolejny podrozdział to bardzo



obszerne badania wpływu płatków PET na właściwości kompozytów aktywowanych alkalicznie (geopolimerów). Zakres zmienności składów był bardzo rozbudowany. W pierwszej kolejności badania dotyczyły zapraw w których cement zastępowano metakolinem, oceniano gęstość i wytrzymałość oraz prowadzono obserwacje SEM. Doktorantka w tej części po raz pierwszy zaprezentowała analizy obrazu z wykorzystaniem programu ImageJ które pozwalały na ocenę charakterystyki porowatości badanych kompozytów. W dalszej części pracy badania prowadzono na zaprawach geopolimerowych z dodatkiem różnych aktywatorów. Również i w tych badaniach zakres zmienności składu był rozbudowany. Czasami miałem wrażenie, szczególnie w trakcie lektury opisów pod wynikami badań, że Autorka skupiała się mocniej na opisie efektu zmiany składu a mniej na ocenie wpływu płatków PET. Jest to zapewne spowodowane realizacją tak rozbudowanego zakresu badań własnych. Ostatnią grupą materiałową którą Doktorantka zajmowała się w swej pracy były zaprawy aktywowane alkalicznie, zróżnicowane pod kątem rodzaju spoiwa i stosunkiem wodno-spoiwowym. Niestety, wbrew oczekiwaniom również i w tym przypadku najczęściej obecność płatków PET prowadziła do spadku wytrzymałości. Zakres badań tych kompozytów obejmował również obserwacje SEM często połączone z oceną struktury opartą o analizę obrazu.

Rozdział 7 to prezentacja wniosków końcowych. Zaprezentowane wnioski obejmują całość zrealizowanego zakresu badań i przeprowadzonych analiz. Ostatni rozdział 8 jest pewnego rodzaju krótkim podsumowaniem całej pracy.

Załączony do rozprawy spis literatury w tym norm zawiera 146 pozycji. Ponad połowa tj. 32% cytowanych prac pochodzi z ostatnich 5 lat a 69% z ostatnich 10 lat, co dobrze ilustruje zainteresowania badaczy tą tematyką w ostatnim okresie oraz dowodzi aktualności problemu badawczego jaki jest przedmiotem niniejszej dysertacji. Praca zawiera 62 tabele oraz 134 rysunki, które wymagały od Doktorantki poświęcenia ogromu pracy na ich przygotowanie.

Podsumowując stwierdzam, że układ rozprawy, kolejność prezentowanych wyników, sposób ich prezentacji oraz poprawność językowa nie budzi moich zastrzeżeń. Dobór pozycji literaturowych jest wystarczający i dobrze dopasowany do tematyki rozprawy.

4. Ocena merytoryczna rozprawy

Tytuł rozprawy „Możliwość alternatywnego zagospodarowania odpadów z tworzyw sztucznych jako kruszywo w kompozytach o spoiwie cementowym lub geopolimerowym” sugeruje, że ocena możliwości zagospodarowania odpadów będzie realizowana w kompozytach cementowych lub geopolimerach. W opinii recenzenta „lub” jest niezręcznym spójnikiem i nie oddającym rzeczywistego zakresu pracy z uwagi na fakt, iż badania prowadzono zarówno na kompozytach cementowych jak i na geopolimerach.

Część studialna prezentowana na 60 stronach jest opracowana starannie, porusza wiele aspektów związanych ogólnie z wpływem dodatków tworzywa sztucznego PET na właściwości kompozytów cementowych.



Zakres omówionych zagadnień wprowadza czytelnika do prezentacji w dalszej części pracy badań, wyników i ich analiz. Dobrany zakres cytowanych osiągnięć innych badaczy jest trafny i wystarczający.

W opinii recenzenta tak obszerny przegląd literatury, zawierający dużo zbiorczych zestawień danych zawartych w tabelach powinien skłonić Autorkę do obszernej dyskusji o prezentowanych w publikacjach efektach, zjawiskach i tendencjach. Niestety w wielu miejscach tej części pracy takiej dyskusji Doktorantka nie przeprowadziła.

Odnoszę jednak wrażenie, że struktura rozdziałów i podrozdziałów mogła być nieco bardziej dopracowana, tak aby nie mieszać w jednym podrozdziale np. opisu metod badawczych i metod modyfikacji płatków PET.

Czytelnik, w trakcie lektury niniejszej dysertacji ma poczucie silnego związku Doktorantki z pracą, co objawia się w wielu miejscach informacjami o charakterze czysto organizacyjnym. Każdy kto samodzielnie realizował badania eksperymentalne jest świadomy wielu trudności technicznych i organizacyjnych jakie napotyka w laboratorium. Mam zatem przekonanie, że Doktoranta włożyła wiele wysiłku i poświęciła dużo czasu na realizację wszystkich prezentowanych w pracy rezultatów badań własnych. Na pochwałę zasługuje również fakt, iż Doktoranta posługuje się mocno zaawansowanymi metodami badawczymi np. skaningowym mikroskopem elektronowym SEM JSM-IT100 wyposażonym w system aQUANTAXEDX firmy BRUKER z oprogramowaniem ESPRIT 2.

W opinii recenzenta, w wielu miejscach prezentacji rezultatów badań własnych brakuje naukowej dyskusji o zaobserwowanych zmianach, tendencjach czy przyczynach tych zmian. Taka dyskusja, szczególnie na wyczerpującym poziomie zawierająca odniesienia do rezultatów innych badaczy cytowanych w części studialnej, była by zapewne wartościowym uzupełnieniem ocenianej pracy.

Doktoranta z dużą sprawnością posługuje się narzędziami do statystycznej oceny zbiorów wyników wykorzystując zaawansowane narzędzie jakim jest program STATISTICA. Z jednej strony oceniam bardzo dobrze takie analizy, jednak nie we wszystkich przypadkach jestem przekonany o celowości tych analiz. Przykładowo w pkt. 6.1.6 Doktoranta jak sądzę tworzy jeden zbiór wyników badania wytrzymałości na ściskanie zapraw, o różnym składzie, a więc zapraw zawierających w składzie tworzywa sztuczne różnego rodzaju w różnych ilościach i opracowuje histogram częstotliwości (rys. 31) z zaznaczeniem krzywej rozkładu normalnego.

Doktoranta w wybranych przypadkach dokonuje analizy obrazów SEM z wykorzystaniem programu ImageJ, co jest dowodem zdobycia przez Doktorantkę umiejętności prowadzenia i interpretacji skomplikowanych analiz struktur porowatych.

Prowadzone w ramach pracy liczne modyfikacje tworzy PET zarówno chemiczne jak i mechaniczne nie przyniosły oczekiwanego wzrostu cech mechanicznych zapraw cementowych w składzie których obecny był PET. Badania prowadzone na kompozytach aktywowanych alkalicznie również nie pozwalają potwierdzić pozytywnego wpływu płatków PET na wytrzymałość tych kompozytów. Można zatem przyjąć, że druga teza pracy została potwierdzona jedynie częściowo w nielicznych przypadkach. Nie ujmuje to jednak celowości



realizacji tak obszernych badań doświadczalnych których rezultaty mają dużą wartość poznawczą i mogą być wykorzystane w praktyce.

Podsumowując program oraz zakres przeprowadzonych badań własnych został opracowany poprawnie i wystarczająco obszernie, stosownie do postawionych celów.

5. Uwagi, spostrzeżenia i wątpliwości recenzenta

Poniżej zamieszczam uwagi, spostrzeżenia lub wątpliwości o różnym poziomie istotności, które powstały w trakcie lektury rozprawy. Wiele z nich to uwagi pozytywne, podkreślające walory recenzowanej pracy.

- 1) Rysunki 2, 7, 8, 42 – kilka rysunków jest prezentowana w pracy w zbyt dużym rozmiarze nie adekwatnym do ilości danych zawartych na wykresach. Pewna optymalizacja przyczyniła by się do nienadużywania niepotrzebnie przestrzeni dysertacji.
- 2) W części studialnej Doktorantka opracowała wiele zestawień pochodzących z danych literaturowych, między innymi takich jak: Tabela 2 - Analiza literatury, dane badań wytrzymałości na ściskanie (5 stron), Tabele 6 - Analiza literatury, dane badań wytrzymałości na ściskanie (5 stron) oraz lepkości plastycznej wielu mieszanek, Tabela 6 - Analiza literatury, udarność (2 strony), Tabela 9 - Analiza literatury, gęstość objętościowa (3 strony), Tabela 10 - Analiza literatury, badanie betonoskopem (1 strona) . Zdaniem recenzenta takie zestawienia świadczą o dużym zaangażowaniu Doktorantki w opracowanie studialnej części recenzowanej pracy. Aczkolwiek ilość informacji zawarta w tabelach jest nieco przytłaczająca i wymaga obszernego i szczegółowego omówienia, czego w recenzowanej pracy nieco zabrakło.
- 3) Raport dotyczący ochrony środowiska opracowany i publikowany przez GUS na który powołuje się Autorka w rozdziale 1.3 pochodził z 2019 roku. Aktualnie dostępny jest raport z 2022 roku. Natomiast dane dotyczące globalnej produkcji cementu pochodziły z 2018 roku. Pomimo długiego jak sądzę czasu redakcji pracy, cytowane dane powinny pochodzić, jeśli są oczywiście dostępne, z jak najnowszego okresu.
- 4) Analiza statystyczna zawarta w części studialnej prezentowana na rysunkach 12, 13, 14, 15, 17, 18, 19, 22 oraz 23 jest niepoprawna merytorycznie. Błędem jest łączenie wielu cech w ramach jednego zbioru wyników i prezentacji tych wyników w formie histogramu częstotliwości z oczekiwaną krzywą rozkładu normalnego.
- 5) Rysunek 20 to bardzo ciekawa prezentacja wpływu zawartości tworzywa sztucznego w różnej postaci, na wytrzymałość na ściskanie kompozytów cementowych. Źródłem tego wykresu były wyniki badań zamieszczonych w 11 publikacjach.
- 6) Podrozdział 2.1.3, Tabela 6 zamieszczona na stronach od 44 do 48 (5 stron) zawiera obszerne zestawienie wpływu wielu czynników charakteryzujących skład kompozytów na ich wytrzymałość na rozciąganie. Komentarz Autorki do przedstawionych danych zawarty w pięciu liniijkach tekstu jest w



- mojej opinii zbyt skromny. Można odnieść wrażenie niepełnego wykorzystania tak cennych danych, które zapewne są podstawą wielu tendencji wpływu przedmiotowych dodatków na ocenianą wytrzymałość.
- 7) W niektórych tabelach np. tabela 6 na str. 45, znajdują się inne rezultaty badań dla różnych serii o tym samym składzie (pozycja bibliografii [66]). Prawdopodobnie występuje jakieś zróżnicowanie składów serii badawczych jednak takich informacji zabrakło w tabeli. Podobne spostrzeżenia dotyczą tabeli 9 na str. 51 (pozycja bibliografii [55]).
 - 8) Na stronie 96 w ostatnim akapicie Autorka opisuje sposób badania wytrzymałości na ściskanie i zginanie zapraw bezcementowych. Do tej pory, tego rodzaju badania prowadzone były przy stałym przyroście naprężenia w czasie, natomiast w tym opisie prezentowane jest podejście sterownia przemieszczeniem w czasie. Niestety brak jest wyjaśnienia powodów tej odmienności w procedurze badawczej.
 - 9) Na rys. 59 znajdują się wyniki wytrzymałości na zginanie wtórne. W mojej opinii takie badania mają raczej niewielką przydatności praktyczną.
 - 10) Wysoko oceniam umiejętność posługiwania się narzędziami statystycznymi, prowadzenia testu Kruskala-Wallisa, testu Scheffego, korelacji rang Spearmana, czy jednoczynnikowej analizę wariancji Anova.
 - 11) Wyniki badań mrozoodporności prezentowane były na wykresach (rys. 64, 69, 70, 71, 72, 73, 74, 75, 76, 77, 78, 81, 83, 85 i 86) w których każdorazowo na osi poziomej zamieszczono wiek próbek. W moim przekonaniu, merytorycznie poprawnie byłoby stosowanie opisu osi poziomej jako liczba cykli mrozoodporności.
 - 12) Na str. 132 na rys. 84 zawarte są wyniki wytrzymałości na ściskanie zapraw po badaniu mrozoodporności, które wskazują, że wytrzymałość próbek zamrażanych jest nieco większa od wytrzymałości próbek kontrolnych. Efekt ten występuje jedynie w zaprawach zawierających w składzie płatki PET i jest co najmniej zaskakujący.
 - 13) Prezentowane w podrozdziale 6.5 wyniki badań przepuszczalności jonów chlorkowych są bardzo ciekawe i nieco zaskakujące w pierwszym kontakcie. Zaproponowane przez Autorkę podsumowanie tych badań iż „Przeprowadzone badanie może potwierdzić tezę o poprawie parametrów trwałościowych kompozytów cementowych, po zastosowaniu alternatywnego kruszywa.” budzi moją wątpliwość. Z uwagi na fakt, iż w przypadku stosowania PET w składzie kompozytów, a więc stosowania składnika o niskiej przewodności, skutkuje to zapewne spadkiem wielkości przepływu ładunku elektrycznego wraz ze wzrostem obecności PET w tych kompozytach. Ten efekt mógł obniżyć wartość przepływającego ładunku elektrycznego w kompozytach i tym samym prowadzić do błędnego spostrzeżenia, iż obecność PET prowadzi do zmniejszania przepuszczalności jonów chlorkowych.



6. Podsumowanie i wniosek końcowy

Podjęta w rozprawie doktorskiej Pani mgr inż. Agnieszki Kocot tematyka, jest bardzo aktualna i w ostatnich latach stała się obiektem zainteresowań wielu badaczy. Autorka rozprawy wniosła duży wkład nowej wiedzy dotyczącej wpływu obecności tworzyw sztucznych PET w składzie kompozytów cementowych oraz aktywowanych alkalicznie. Doktorantka przeprowadziła obszerny przegląd literatury, sformułowała cele badawcze i zaproponowała stosowny program badań własnych. Zrealizowała szeroki zakres doświadczalnych badań własnych dostosowany do postawionych celów.

W moim przekonaniu Autorka wykazała się wystarczającą znajomością stanu wiedzy dotyczącej tematyki rozprawy oraz potwierdziła, iż posiada umiejętności planowania badań doświadczalnych, ich realizacji, ale przede wszystkim opracowania szczegółowej analizy uzyskanych rezultatów.

Biorąc pod uwagę wszystko co wyżej, przedłożoną rozprawę oceniam **pozytywnie w całości spełniającą wymagania** Ustawa z dnia 20 lipca 2018 r. Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz.U. z 2018 r. poz. 1669, z późn. zm), w związku z czym **wnioskuję o dopuszczenie** jej do publicznej obrony.

dr hab. inż. **Tomasz Tracz**
prof. Politechniki Krakowskiej