

Bydgoszcz, 17 listopada 2023 r.

Recenzent:

dr hab. inż. Dariusz Bajno prof. PBS
Wydział Budownictwa, Architektury
i Inżynierii Środowiska
Politechniki Bydgoskiej
Al. Prof. S. Kaliskiego 7
85-796 Bydgoszcz
tel.+48 52 340 85 00, kom.+48 502 187 898
e-mail: dariusz.bajno@pbs.edu.pl

Adresat recenzji:

Wydział Inżynierii Lądowej
Środowiska i Geodezji
Politechniki Koszalińskiej
ul. Śniadeckich 2
75-453 Koszalin

RECENZJA ROZPRAWY DOKTORSKIEJ

mgr inż. Mateusza Zakrzewskiego
pt.

„Analiza cech reologicznych kompozytów cementowych na bazie materiałów
odpadowych”.

1. Podstawa formalna

Podstawę formalną do wykonania niniejszej recenzji stanowią:

- Uchwała Senatu Politechniki z dnia 20 września 2023 r. na podstawie art. 14 ust.1-2 i ust. 5-6 ustawy o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz stopniach i tytule w zakresie sztuki (t.j. Dz.U. z 2017 r. poz. 1789 ze zm.) oraz §6 ust. 1-2 Rozporządzenia Ministra Nauki i Szkolnictwa Wyższego z 19 stycznia 2018 r. w sprawie szczegółowego trybu i warunków przeprowadzania czynności w przewodzie doktorskim, w postępowaniu habilitacyjnym oraz w postępowaniu o nadanie tytułu profesora (Dz.U.2018.poz.261) w związku z art. 179 ust. 3 ustawy z dnia 3 lipca 2018 r. Przepisy wprowadzające ustawę – Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz.U. z 2018 r. poz. 1669 ze zm.) oraz §13 ust.2 pkt.2 Statutu Politechniki Koszalińskiej.
- Pismo Rektora Politechniki Koszalińskiej dr hab. Danuty Zawadzkiej, prof. PK z dnia 5 Października 2023 r.
- Umowa o dzieło nr 344 z dnia 10 września 2023 r.

2. Podstawa prawna

Przewód doktorski prowadzony jest zgodnie z:

- Ustawą 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.),
- Rozporządzeniem Ministra Nauki i Szkolnictwa Wyższego z 19 stycznia 2018 r. w sprawie szczegółowego trybu i warunków przeprowadzania czynności w przewodzie doktorskim, w postępowaniu habilitacyjnym oraz w postępowaniu o nadanie tytułu profesora (Dz.U.2018.poz.261).



3. Przedmiot i opis ogólny rozprawy

Przedmiotem recenzji jest rozprawa doktorska mgr inż. Mateusza Zakrzewskiego

pt.

„Analiza cech reologicznych kompozytów cementowych na bazie materiałów odpadowych”, której promotorem jest dr hab. inż. Jacek Domski prof. PK.

Rozprawa została złożona w postaci zwartej, jednostronnie zadrukowanego skryptu łącznie 173 strony plus płyta CD. Jej część zasadniczą Doktorant zamieścił na 43 stronach, kolejne strony stanowi spis bibliografii (str. 44-50), spis pozostałych publikacji wchodzących w skład cyklu w ramach pracy doktorskiej, oświadczenia doktoranta oraz 4-6 pełnych artykułów. Na pracę składa się z 7 rozdziałów (w tym 5 merytorycznych) zawierających 21 rysunków i 25 tabel a także streszczenia w języku polskim oraz angielskim. W bibliografii przywołano 79 pozycji literaturowych (14 w języku polskim i 65 w języku angielskim, w tym 7, gdzie Doktorant wymieniony został jak współautor). W ramach niniejszej rozprawy opublikowano 6 artykułów naukowych o łącznym IF – 22,956 oraz 650 punktach wg wykazu czasopism MEiN. Układ pracy jest logiczny i czytelny, charakterystyczny zarówno dla prac naukowych jak i badawczych.

4. Ocena merytoryczna rozprawy

4.1 Przedmiot, cel i tezy rozprawy

Przedmiotem rozprawy jest ocena możliwości zagospodarowania przemysłowego odpadów ceramiki budowlanej, porcelanowej oraz piasku odpadowego pozyskiwanego z procesu hydroklastyfikacji kruszywa (pozyskiwanego w kopalniach odkrywkowych usytuowanych w północno-zachodniej Polsce) jako zamienników dla kruszywa naturalnego. Ponadto, Doktorant proponuje wykorzystywanie kordu stalowego pozyskiwanego w procesie recyklingu zużytych opon samochodowych jako zamiennika zbrojenia rozproszonego do zbrojenia kompozytów.

Doktorant podzielił pracę na 4 zadania badawcze. Każdemu z zadań przypisał odrębne do zrealizowania cele. W pierwszym z nich, analizie poddał wybrane materiały odpadowe. W zadaniu drugim przeanalizował możliwość zastosowania kordu stalowego jako zamiennika zbrojenia rozproszonego w betonie. W trzecim zadaniu określił podstawowe parametry mieszanek wykonywanych na bazie wybranych materiałów odpadowych w oparciu o obowiązujące normy i wytyczne. W czwartym, ostatnim zadaniu opisał cechy reologiczne wybranych kompozytów cementowych wykonywanych na bazie materiałów odpadowych. Szczegółowe wyniki ww. badań zamieścił w sześciu obszernych publikacjach (P1÷P6).

Głównym celem dysertacji było określenie właściwości cech reologicznych kompozytów cementowych wykonywanych na bazie ceramiki i stali odpadowej, wykorzystując do tego celu autorskie stanowisko badawcze a także niekonwencjonalny system optyczny. W badaniach „długotrwałych” Doktorant skupił się tu na ustalaniu i ocenie wielkości ugięć zarysowań oraz spękań występujących w belkach modelowych, wykonanych w skali naturalnej na bazie wymienionych wyżej kompozytów.

Doktorant sformułował tu dwie tezy, które omówiono w P. 4.2:

4.2 Charakterystyka i ocena rozdziałów rozprawy

Układ rozprawy, którą rozpoczyna streszczenie w języku polskim i angielskim jest logiczny oraz czytelny. Poniżej zamieszczono skrótowy opis poszczególnych rozdziałów.

Rozdział 1 – „Wprowadzenie”

Jest ogólnym wprowadzeniem do treści rozprawy, niemniej jednak zasadniczo ujmuje opisywane i rozważane w dalszej części problemy dotyczące możliwości i zasadności wykorzystywania materiałów odpadowych (nie tylko budowlanych) w celu ponownego ich użycia do produkcji innych wyrobów, mających mieć zastosowanie w budownictwie. Nadrzędnym celem dysertacji jest realne wsparcie działań prowadzonych na rzecz ochrony środowiska naturalnego, poprzez m.in. ograniczenie śladu węglowego przy jednoczesnym pozyskiwaniu materiałów odpadowych jako pełnowartościowych dodatków do wytwarzania nowych wyrobów budowlanych. Wiąże się to również z ograniczeniem zużycia energii niezbędnej do wydobywania, przygotowywania i dostaw surowców.

Rozdział 2 – „Przegląd literatury”

Przegląd literatury zawiera analizę aktualnego stanu wiedzy z zakresu dotychczas przeprowadzonych badań w kraju jak i na świecie, a w szczególności dotyczących badań nad dodatkami do betonu, których zastosowanie pozwoliłoby na utrzymanie parametrów betonu tradycyjnego. W dysertacji został on zamieszczony na dwóch stronach i został ujęty w formie skróconej.

Rozdział 3 – „Tezy, cel i zakres pracy”

Doktorant sformułował tu następujące tezy:

Teza 1

Możliwe jest opracowanie takiego kompozytu cementowego, wytworzonego na bazie odpadów pochodzących z fabryk porcelany, pustaków ceramicznych oraz piasku odpadowego, którego właściwości doraźne oraz długotrwałe będą odpowiadały betonowi zwykłemu.

Teza 2

Możliwe jest skuteczne zastosowanie systemu cyfrowej korelacji obrazu do pomiaru wybranych cech reologicznych kompozytów cementowych w elementach belkowych obciążonych długotrwałe.

W mojej opinii, cel/cele pracy zostały poprawnie określone a postawione tezy są właściwe w odniesieniu do dalszej treści rozprawy.

Przedstawione powyżej tezy nie zamykają tu zadania badawczego, lecz dopiero otwierają pewien uporządkowany kierunek dalszych poszukiwań i badań związanych z możliwością stosowania innych dodatków do wyrobów cementowych oraz betonowych, uznawanych obecnie wyłącznie za poprodukcyjny lub porozbiórkowy odpad.

W ramach dysertacji Doktorant podjął się rozwiązania czterech zadań badawczych:

W pierwszym zadaniu poddał analizie wybrane przez siebie materiały odpadowe. Określił ich podstawowe właściwości, w tym m.in. gęstość pozorną, jamistość i nasiąkliwość (dot. kruszywa pochodzących i przygotowanych z odpadów fabrycznych), wytrzymałość na rozciąganie kordu stalowego oraz wpływ dwukierunkowego przegięcia na wytrzymałość ww. włókien.

W drugim zadaniu ocenił możliwość zastosowania kordu stalowego jako zamiennika zbrojenia rozproszonego poddając analizie beleczki badawcze o wymiarach 40x40x160 mm, wykonane z zaprawy cementowej z dodatkiem włókien w ilości: 0,00%, 0,25%; 0,50%, 0,75%, 1,00%, 1,25%, 1,50%. W celu określenia właściwości zapraw zbrojonych kordem stalowym przeprowadził testy wytrzymałościowe polegające na badaniu trzypunktowego zginania beleczek w oparciu o normę PN-EN 196-1 przy jednoczesnym pomiarze ich pionowych odkształceń, co pozwoliło na ustalenie receptur dla kompozytów cementowych wykonywanych na bazie materiałów odpadowych. Wykonał również badania wytrzymałości resztkowej zgodnie z PN-EN

14651, na próbkach ze zbrojeniem rozproszonym w ilości 0,5%, 0,75%, 1,0%, 1,25% oraz 1,5% objętości mieszanki.

Trzecie zadanie polegało na przeprowadzeniu szeregu badań mających na celu ustalenie doraźnych i reologicznych cech wytrzymałościowych dla wybranych kompozytów cementowych na podstawie wytycznych normowych, wykonanych na bazie materiałów odpadowych, co pozwoliło na określenie ich wytrzymałości na ściskanie, wytrzymałości resztkowej, wielkości skurczu i pelzania oraz modułu sprężystości.

W zadaniu czwartym Doktorant określił właściwości reologiczne wybranych kompozytów na podstawie długotrwałych badań belek o wymiarach 100x200x2900mm. Na potrzeby badań zaprojektował on i wykonał autorskie stanowisko badawcze umożliwiające przeprowadzanie badań jednocześnie dla trzech belek, natomiast do pomiaru odkształceń zastosował tradycyjne metody jak również system optyczny. Belki wykonane zostały z kompozytu wytworzonego na bazie materiałów odpadowych, różniącego się zawartością zbrojenia rozproszonego co pozwoliło na szczegółowe porównanie jego cech do cech betonów tradycyjnych.

Rozdział 4 – „Charakterystyka zastosowanych materiałów”

Niniejszy rozdział zawiera obszerne informacje na temat cech materiałów użytych do wytworzenia kompozytów cementowych z materiałów tradycyjnych z dodatkami takimi jak: stłuczka szklana, odpady kopalniane, granulaty pochodzący z zużytych opon, kord pozyskany również z zużytych opon a także odpady z tworzyw sztucznych.

Spoiwo

Jako spoiwo w badanych kompozytach użyto cementu portlandzkiego CEM I 42,5 R charakteryzującego się szybkim przyrostem wytrzymałości na ściskanie. Wykonane próbki już po dwóch dniach osiągały wytrzymałość na ściskanie powyżej 28 MPa (zgodnie z normą PN-EN-196-1 [57]), natomiast po 28 dniach, wyższą niż 42,5 MPa. Wg technologicznej karty produktu cement ten może być stosowany bez względu na porę roku oraz warunki dojrzewania, można go również stosować do wszystkich klas ekspozycji, wyłączając agresywne środowiska chemiczne.

Woda zarobowa

Woda wykorzystana do wykonania wszystkich elementów badawczych pochodziła z lokalnego przyłącza wodociągowego. Jej barwa jak również zapach były zgodne z wymaganiami normowymi.

Plastyfikator

Dodatek włókien stalowych wyraźnie pogarszał urabialność mieszanki betonowej co wymagało dodania domieszki upłynniającej. W tym celu użyto stężonego superplastyfikatora polimerowego SilkaViscoCrete 5-600 o wartości pH z przedziału $4,4 \pm 1,0$, nie zawierającego w swym składzie żadnych chlorków ani też innych związków chemicznych, które mogłyby powodować korozję stali zbrojeniowej oraz włókien.

Pył krzemionkowy

W kompozytach wykonywanych na bazie kruszywa z ceramiki białej zastosowano dodatek w postaci pyłu krzemionkowego. Pył krzemionkowy, dodawany do mieszanki betonowej poprawiał działanie plastyfikatora, co w efekcie pozwoliło na zachowanie stosunkowo niskiego stosunku wodno-cementowego. Zastosowanie pyłu krzemionkowego zwiększyło wytrzymałość na ściskanie betonu oraz doprowadziło do wzrostu szczelności stwardniałego betonu a tym samym jego odporności na korozję.



Włókna stalowe

W badaniach zastosowano m.in. stalowe włókna haczykowane o okrągłym przekroju (ϕ 0,8 mm) firmy EKOMET. Długość włókien wynosiła 50 mm natomiast smukłość $\lambda = 62,5$. Alternatywą dla ww. włókien było zastosowanie kordu stalowego pochodzącego z odzysku z zużytych opon samochodowych. Ponadto, do wytworzenia kompozytów cementowych wykorzystano również inne materiały odpadowe.

I tak, jako zamienników do kruszywa użyto:

- odpadów pochodzących z produkcji pustaków ceramicznych,
- odpadów pochodzących z produkcji wyrobów porcelanowych,
- piasku odpadowego pozyskiwanego w procesie hydroklasyfikacji kruszywa.

W kolejnych punktach dysertacji zamieszczono ogólną charakterystykę zastosowanych w badaniach materiałów odpadowych.

Kruszywo odpadowe

Zastosowanie kruszywa pozyskanego z materiałów odpadowych w elementach fibrobetonowych wymagało potwierdzenia ich przydatności poprzez spełnienie dodatkowych warunków w stosunku do kruszywa kwarcytowego, stosowanego w zwykłych betonach co było ściśle powiązane z dodatkiem włókien stalowych decydujących o wyborze wielkości ziaren – użyto tu zarówno kruszywa naturalnego jak i odpadowego pochodzącego z pustaków ceramicznych (ceramika czerwona) oraz wyrobów porcelanowych (ceramika biała).

Dostarczone przez producentów odpady nie nadawały się do zastosowania bezpośrednio do produkcji kompozytów, dlatego też poddano je procesowi kruszenia, mielenia oraz przesiewania w celu uzyskania krzywej uziarnienia jak dla betonu wzorcowego zgodnie z normą PN-EN 1766:2017, "Products and systems for the protection and repair of concrete structures. Test methods. Reference concretes for testing." Wybrano tu krzywą A dla kruszywa o maksymalnym rozmiarze ziaren do 8 mm. W pierwszej fazie badań założono, że całość kruszywa będzie pochodziła z odpadów, lecz z uwagi na pracochłonność i czasochłonność uzyskania frakcji $0,125 \div 2,0$ mm, w drugiej fazie badań w ramach Zadania 4 ww. zastąpiono je piaskiem odpadowym. Piasek odpadowy pochodził z lokalnych kopalni kruszywa grubego.

Kord stalowy

Kord stalowy jest pozyskiwany w procesie recyklingu zużytych opon samochodowych, gdzie opony poddawane są obróbce mechanicznej, podczas której uzyskuje się granulaty gumowy, tekstylny oraz kord stalowy. Ilość kordu zależy głównie od rodzaju opony. Opony do pojazdów lekkich zawierają do 15% stali, a opony do samochodów ciężarowych do 25% stali. Ze względu na różne rodzaje i rozmiary opon, uzyskiwany kord stalowy jest bardzo zróżnicowany pod względem długości, kształtu i średnicy włókien. Niemniej wymiary kordu są zbliżone do wymiarów powszechnie stosowanych włókien stalowych stąd można go było zastosować w mieszankach cementowych bez odrębnej, specjalistycznej obróbki.

Skład kompozytów cementowych na bazie materiałów odpadowych

W badaniach podstawowych przebadano 8 kompozytów cementowych wykonanych na bazie materiałów odpadowych, gdzie dla każdego kompozytu wykonano 6 belek o wymiarach $100 \times 200 \times 2900$ mm, po jednej z dodatkiem zbrojenia rozproszonego w ilości 0,0%; 0,5% oraz 1,0%. Badania te podzielono na dwa etapy. Do wykonania belek użyto cementu portlandzkiego CEM I 42,5 R w ilości 400 kg/m^3 oraz Superplastyfikatora Silka ViscoCrete 5-600 w ilości 1% w stosunku do masy cementu. Dodatkowo w mieszankach zawierających kruszywo pochodzące z odpadów ceramiki białej jako dodatku użyto pyłu krzemionkowego w ilości 8% w stosunku do masy



cementu. Jako zbrojenie rozproszone zastosowano dwa rodzaje włókien: stalowe włókna haczykowane 50/0,8 oraz kord stalowy.

Rozdział 5 – „Metodyka badań”

Doktorant przeprowadził badania w oparciu o normy krajowe i europejskie a także procedury własne. W ramach Zadania 1 określił podstawowe cechy fizyczne kruszyw uzyskanych w procesie kruszenia i mielenia odpadów fabrycznych ustalając ich gęstość pozorną, gęstość nasypową, jamistość oraz nasiąkliwość jak również parametry włókien stalowych oraz kordu stalowego, użytych do wykonania kompozytów cementowych. Ponadto zbadał włókna pod względem ich wytrzymałości na rozciąganie i przeginięcie a także dokonał oceny ich geometrii.

W **zadaniu 2**, w pierwszej kolejności Doktorant ustalił wpływ kordu stalowego na właściwości zaprawy cementowej. Badania mieszanki zawierającej włókna w ilości 0,0%; 0,25%; 0,50%; 0,75%; 1,00%; 1,25%; 1,50% (w stosunku do objętości mieszanki) przeprowadził poszerzając standardową procedurę stosowaną w badaniu beleczek cementowych na zginanie monitorując ich ugięcia w środku rozpiętości, w funkcji obciążenia.

Dla każdej mieszanki wykonano po 9 próbek, w tym 3 bez nacięć i po 3 z nacięciem na głębokość 4 i 8 mm a następnie przeprowadzono badanie wytrzymałości resztkowej w oparciu o normę PN-EN 14651 EN 14651:2005, “Test method for metallic fibre concrete. Measuring the flexural tensile strength (limit of proportionality (LOP), residual).” 2005, będącą podstawą do klasyfikacji fibrobetonów. Badaniom poddano próbki zawierające zbrojenie rozproszone w ilości 0,5%; 0,75%; 1,0%, 1,25% oraz 1,5% na 1m³ objętości mieszanki.

Zadanie nr 3 polegało na określeniu podstawowych parametrów, doraźnych i reologicznych, wybranych kompozytów, wykonanych na bazie materiałów odpadowych. Badanie wytrzymałości na ściskanie wykonano na 6 próbkach dla każdego kompozytu. Moduł sprężystości został określony na 3 próbkach. Skurcz oraz pęcznienie określono dla mieszanek na bazie kruszywa pochodzącego z odpadów ceramiki czerwonej.

Zadanie 4 polegało na określeniu wybranych cech kompozytów cementowych na bazie materiałów odpadowych pod obciążeniem długotrwałym. Pomiar wielkości ugięć, zarysowania oraz deformacji belek przeprowadzono na stanowisku autorskim w czasie 1000 dni przy niekonwencjonalnym podejściu do pomiarów wybranych parametrów. Szczegóły stanowiska badawczego Doktorant opisał w punkcie 5.1 dysertacji (poniżej). Pomiar deformacji powierzchni oraz zarysowań przeprowadził z wykorzystaniem systemu optycznego.

5.1 Stanowisko do badania belek poddanych obciążeniu długotrwałemu

Do określenia cech wybranych kompozytów obciążonych długotrwanie Doktorant zaprojektował i wykonał autorskie, niewielkie stanowisko badawcze, umożliwiające badanie możliwie dużej liczby elementów. Miało to znaczenie w sytuacji, gdy badania miały trwać co najmniej kilka lat. Autorskie stanowisko umożliwiało jednoczesne badanie trzech belek o wymiarach 100x200x2900mm. Trzy belki, o różnym stopniu zawartości zbrojenia rozproszonego, umieszczone zostały w pionie, jedna ponad drugą, z tą różnicą, że belka środkowa została ustawiona w pozycji odwróconej. Głównym elementem stanowiska była dźwignia o długości 2500mm i przekroju wykonanym z dwóch prętów stalowych o średnicy 50 mm każdy. Na końcu dźwigni zamontowano żeliwne krążki o łącznej masie 110 kg. Po dwa stanowiska ustawiono na stalowych stendach wykonanych z dwóch zespawanych kształtowników IPE450. Podpory i punkty przyłożenia obciążenia wykonano z pełnych wałków stalowych o średnicy 50 mm.

Wszystkie belki zostały poddane próbie czteropunktowego zginania. Rozstaw sił wynosił 900 mm a rozstaw podpór 2700 mm. Belka B1 o największej zawartości zbrojenia rozproszonego (1,0%) została umieszczona na podporach znajdujących się na stalowej belce. Następnie ułożono

belkę o zbrojeniu rozproszonym 0,5% (B2). Jako ostatnią na stanowisku umieszczano belkę nie zawierającą zbrojenia rozproszonego. Poza ww. zbrojeniem rozproszonym we wszystkich belkach zastosowano zbrojenie tradycyjne, składające się z dwóch prętów o średnicy 10 mm (stal RB500), ulokowanych w strefie rozciąganej. Belki były pozbawione strzemion, co pozwoliło na obserwację deformacji ich strefy ściskanej. Obciążenie długotrwałe zostało dobrane tak, aby wielkość momentu przęsłowego przekraczała wielkość momentu rysującego we wszystkich przypadkach. Ww. wielkości Doktorant przedstawił zestawieniach tabelarycznych.

Podczas badań, dla każdego stanowiska, przeanalizowano zachowanie się belek pod obciążeniem doraźnym oraz określono ich odkształcenie pod obciążeniem długotrwałym. W badaniach doraźnych belki obciążano stopniowo, zwiększając obciążenia, zgodnie ze schematem przedstawionym w tabeli 12 dysertacji. Po każdym zwiększeniu obciążenia dokonywano pomiarów za pomocą urządzeń manualnych. Fazy obciążeń I, II i III realizowane były kolejno w odstępach 7-dniowych. Po obciążeniu belek do wybranego poziomu zakończono pomiary doraźne. Następnie w jednakowych odstępach czasu wykonywano pomiary w celu określenia wzrostu ugięć i odkształceń w czasie.

Powierzchnie boczne belek zostały odpowiednio dostosowane do metod pomiarowych. Na jednej powierzchni naklejono mosiężne repery, które posłużyły do pomiaru odkształceń belek, a których wielkość ustalono za pomocą ekstensometru nasadowego o bazie pomiarowej 250 mm i rozdzielczości 0,001 mm. Ugięcia belek oraz podpór pomierzono za pomocą suwmiarki o dokładności 0,05 mm. Pomiar szerokości rozwarcia rys wykonywano na wysokości lokalizacji zbrojenia rozciąganego za pomocą mikroskopu optycznego o 36-krotnym powiększeniu. Druga powierzchnia została przystosowana do pomiarów optycznych poprzez zaszpachlowanie jej porów i pokrycie czarno-białym deseniem pozwalającym na określenie pozycji poszczególnych jej punktów za pomocą systemu cyfrowej korelacji obrazu.

Zastosowanie systemu cyfrowej korelacji obrazu do pomiarów długotrwałych

Do określenia długotrwałych właściwości kompozytów cementowych zastosowano niekonwencjonalny i innowacyjny system optyczny, oparty na technice cyfrowej korelacji obrazu.

Dokładność pomiarowa systemu cyfrowej korelacji obrazu

Dokładność pomiaru odkształceń układu optycznego zależy od takich czynników jak: jakość obiektywu, wielkość obszaru pomiarowego, jakość wzoru na powierzchni, ustawienie kamer względem obiektu, zmiany oświetlenia i jest mniejsza niż ekstensometru. Niemniej jednak dla prowadzonych badań dokładność ta była wystarczająca.

Rozdział 6 – „Analiza wyników badań”

W artykułach wchodzących w skład cyklu w ramach pracy doktorskiej Doktorant zaprezentował badania i analizy wykraczające poza założone zadania przedstawione w punkcie 3 (Tabela 1). Stąd w niniejszej dysertacji zaprezentował jedynie najistotniejsze z punktu widzenia realizacji zadań ich wyniki, pomijając analizę wyników wytrzymałości resztkowych w celu stworzenia modelu matematycznego kompozytu cementowego z dodatkiem kordu stalowego oraz wyniki uzyskane w artykułach P1 i P2 dotyczące włókien, które nie zostały ostatecznie wykorzystane do wytworzenia kompozytów w badaniach głównych.

Charakterystyka wybranych cech materiałów odpadowych użytych w badaniach.

Zadanie 1.

W artykule P1 Doktorant zaprezentował wyniki parametrów włókien produkowanych seryjnie oraz kordu stalowego, które poddał próbie dwukierunkowego przeginania. Określił tu maksymalną ilość przegięć dla każdego rodzaju włókien jak również zbadał wpływ określonej liczby przegięć (maksymalnie 20 przegięć pojedynczego włókna) na wytrzymałość włókien na rozciąganie.

Ocena możliwości zastosowania kordu stalowego jako zbrojenia rozproszonego betonu.

Zadanie 2.

Istotny wpływ dodatku kordu zaobserwował dla wytrzymałości na zginanie określonej dla maksymalnego obciążenia. Wyraźne zwiększenie tej wartości odnotował dla zapraw z dodatkiem włókien w ilości 1,25% i 1,50%. Badania przeprowadzone na próbkach o wymiarach $40 \times 40 \times 160$ mm wykazały dobre właściwości materiałów zbrojonych kordem stalowym. W artykule wskazano wartość 0,75% jako optymalną ilość kordu stalowego.

Badania wykazały, że kord stalowy posiada wysokie parametry takie jak, wytrzymałość na rozciąganie oraz odporność na dwukierunkowe przeginięcie, stąd z mechanicznego i geometrycznego punktu widzenia kord stalowy, może być stosowany jako zamiennik do tradycyjnego zbrojenia betonu. Na podstawie przeprowadzonych badań i analiz Doktorant sformułował następujące wnioski dotyczące bezpośrednio włókien odpadowych:

- kord stalowy jest pełnowartościowym, ekologicznym zamiennikiem włókien polipropylenowych, zapewniającym znacznie wyższą wytrzymałość na zginanie i wyższy współczynnik wytrzymałości równoważnej na zginanie,
- zastosowanie kordu stalowego jako zbrojenia rozproszonego pozwala na poprawę racjonalnej gospodarki odpadami oraz zmniejszenie zapotrzebowania na energię niezbędną do ponownego jego przetopienia.

Analiza, na podstawie wytycznych normowych, doraźnych i reologicznych cech wybranych kompozytów cementowych na bazie materiałów odpadowych.

Zadanie 3.

W celu określenia podstawowych parametrów wytrzymałościowych wybranych kompozytów na bazie materiałów odpadowych badaniom poddano próbki cylindryczne o wymiarach 150×300 mm (rys. 6.6). Zbadano po 3 próbki w celu określenia modułu sprężystości oraz po 6 próbek do określenia wytrzymałości na ściskanie dla każdego kompozytu. Uzyskane wyniki przedstawiono w tablicy 18 dysertacji, natomiast szczegóły dotyczące badania i przygotowania próbek opisano w artykule P5. Na podstawie powyższych rezultatów sformułowano następujące wnioski:

- kruszywa produkowane z odpadów z ceramiki białej, czerwonej oraz z piasku odpadowego mogą być wykorzystywane w produkcji kompozytów cementowych o właściwościach odpowiadających betonowi zwykłemu,
- dodatek kordu stalowego do betonu poprawia jego wytrzymałość na ściskanie, niemniej jednak bezpośredni wpływ kordu stalowego na moduł sprężystości musi być określony po zbadaniu większej liczby próbek.

Analizując wyniki przedstawione w artykule P4 sformułowano następujące wnioski:

- stosując kruszywo otrzymane z odpadów powstających podczas produkcji pustaków ceramicznych można uzyskać kompozyt o parametrach zbliżonych do betonu zwykłego,
- odkształcenia testowanych kompozytów wywołane skurczem były zbliżone do wyników obliczonych na podstawie procedury zawartej w Eurokodzie 2,
- wadą kompozytów cementowych wykonywanych na bazie kruszywa z odpadów ceramiki czerwonej są znacznie większe odkształcenia w stosunku do betonu zwykłego, stąd zaleca się intensywniejszą pielęgnację takich kompozytów oraz zastosowanie dodatków ograniczających skurcz betonu,

- skurcz i pęcznienie badanych kompozytów zależą głównie od rodzaju użytego kruszywa, natomiast liczba próbek poddanych badaniom była zbyt mała by można było jednoznacznie ocenić wpływ rodzaju i ilości zbrojenia na wielkości odkształceń spowodowanych skurczem i pęcznieniem kompozytów,
- deformacje spowodowane skurczem oraz pęcznieniem nie ustabilizowały się w ciągu 1 roku, co wymaga kontynuacji badań, natomiast kolejne wyniki badań nieopublikowane w artykule P4 wykazały, że stabilizacja następuje po około 800 dniach co znajduje odzwierciedlenie w wielkościach ugięć belek kompozytowych wykonanych z zastosowaniem kruszywa z ceramiki czerwonej.

Analiza wybranych cech reologicznych kompozytów cementowych na bazie materiałów odpadowych z wykorzystaniem nowatorskiego stanowiska badawczego.

Zadanie 4.

W zadaniu 4 wyznaczono dwa cele. Pierwszym z nich było określenie cech reologicznych wybranych kompozytów cementowych wykonanych na bazie materiałów odpadowych natomiast w drugim dostosowanie wybranej metody obliczeniowej do rodzaju i parametrów badanych kompozytów. Na podstawie uzyskanych wyników zarysowania określono współczynnik modyfikujący metodę obliczania szerokości rozwarcia rys zawartą w Eurokodzie 2.

Analiza wybranych cech kompozytów na bazie materiałów odpadowych pod obciążeniem długotrwałym

W artykułach P5 oraz P6 zaprezentowano analizy i wyniki głównych badań. Analizie poddano ugięcia, zarysowanie oraz deformację belek znajdujących się pod obciążeniem długotrwałym tj. w okresie 1000 dni. W etapie I analizie poddano długotrwałe ugięcie określane za pomocą manualnych metod pomiarowych. Uzyskane wyniki porównano z wynikami obliczonymi na podstawie metody normowej zawartej w Eurokodzie 2 oraz na podstawie metod zaprezentowanych przez Tana i Bywalskiego.

Analizując uzyskane wyniki ugięć belek sformułowano następujące wnioski:

- dla mieszanek zawierających kruszywo pochodzące z czerwonych odpadów ceramicznych przewidywanie ugięcia wymaga wprowadzenia odpowiednich korekt wszystkich metod obliczeniowych, ponieważ wartości uzyskane z obliczeń są zdecydowanie niższe od wartości uzyskanych w badaniach,
- ugięcie belek zawierających odpady porcelanowe (WC, WSC) najlepiej obrazuje metoda przedstawiona przez Tan, gdzie obliczone wartości ugięć po 1000 dniach są bardzo zbliżone lub nieznacznie niższe od uzyskanych wyników badań – przy pewnej jej modyfikacji można ją wykorzystać do projektowania zoptymalizowanych konstrukcji.

Kolejną badaną cechą kompozytów była deformacja strefy ściskanej pod wpływem długotrwałe działającego obciążenia. Z uwagi na brak zbrojenia w strefie ściskanej zjawisko pęcznienia i skurczu w tej strefie było przede wszystkim zależne od składu kompozytów.

Analiza rezultatów zaprezentowanych w artykule P5 pozwoliła na sformułowanie poniższych wniosków:

- kruszywa produkowane na bazie białych odpadów ceramicznych oraz z piasku odpadowego mogą być wykorzystywane do produkcji betonu o właściwościach odpowiadających zwyklemu betonowi,
- dla mieszanek zawierających kruszywa na bazie piasku odpadowego i odpadów z czerwonej ceramiki (Sc, RC, RSC) szerokość rys można obliczyć metodą wg PN-B, jednak uzyskane w ten

sposób wartości były, w większości przypadków, nieco zaniżone, stąd ze względu na bezpieczeństwo konstrukcji budowlanych, należy stosować tę metodę obliczeniową z uwzględnieniem odpowiednich współczynników,

- dla mieszanek z kruszywem wykonanych na bazie białej ceramiki (WC, WSC) najkorzystniejsze wyniki obliczeń szerokości rozwarcia rys uzyskano metodą wg EC2, natomiast dla mieszanek z kruszywem ceramiki czerwonej uzyskane tą metodą wartości odbiegają od wyznaczonych w badaniach średnio o ponad 50% - przypadku belek wykonanych na bazie kruszyw odpadowych, metoda wg normy PN-B daje zawyżone wartości szerokości rozwarcia rys w porównaniu z wynikami uzyskanymi z badań laboratoryjnych,
- obliczenia średniego rozstawu rys najlepiej przeprowadzać metodą przedstawioną przez Vandewalle, która daje wartości najbardziej zbliżone do uzyskanych w badaniach, niemniej jednak wartości te nadal pozostawały zawyżone co oznacza, że analizując rozstaw rys, ze względów bezpieczeństwa konstrukcji, nie należy preferować tej metody bez odpowiednich poprawek.

W artykule P6 sformułowano kolejne wnioski dotyczące wyników badań głównych przeprowadzonych w ramach niniejszej dysertacji:

- zaproponowane stanowisko badawcze może być z powodzeniem wykorzystywane do prowadzenia dalszych badań długoterminowych właściwości kompozytów cementowych i betonowych – ponieważ różnice w obciążeniu poszczególnych belek są stosunkowo niewielkie, stąd porównanie właściwości badanych mieszanek jest zasadne,
- układ optyczny znacznie ułatwia pomiar szerokości rozwarcia rys i ich lokalizację przy dokładności większej niż przy pomiarach z zastosowaniem mikroskopu. Zaletą układu optycznego jest możliwość analizy odwrotnej. Po wykryciu rysy przez system optyczny, znając jej lokalizację, można przeanalizować poprzednie obrazy, aby dokładnie określić, kiedy się pojawiła. Dokładność systemu jest wystarczająca do określenia odkształceń powierzchni belek.
- analizowane kompozyty cementowe z kruszywem z surowców odpadowych posiadają podstawowe parametry wytrzymałościowe odpowiadające betonom z kruszyw naturalnych.

Modyfikacja metody obliczeniowej szerokości rozwarcia rys zawartej w PN-EN 1992-1-1

Na podstawie studiów literaturowych oraz po przeprowadzeniu analizy uzyskanych wyników Doktorant zdecydował się na modyfikację metody zawartej w normie PN-EN 1992-1-1. Metoda zaproponowana w normie Eurokod 2 dotycząca obliczania szerokości rys uwzględnia podstawowe parametry obliczanych elementów betonowych takie jak wymiary, ilość zbrojenia oraz działające na element obciążenie.

W analizie stanu granicznego zarysowania belek, za maksymalną szerokość rysy (dla każdej belki) przyjęto większą wartość uzyskaną z pomiarów metodami opisanymi wcześniej. Przyjęto, że obie zastosowane metody odpowiednio określają pomierzoną szerokość rys, a różnice między nimi mogą wynikać z faktu, że mierzone są różne powierzchnie belek.

W drugim etapie badań potwierdzono, że zaproponowane współczynniki przybliżają obliczone wartości szerokości rozwarcia rys w belkach wykonanych z odpowiednich kompozytów, do wartości pomierzonych w badaniach.

Ostatecznie sformułowano następujący wniosek:

Zastosowanie współczynników korekcyjnych pozwoli na dokładniejsze przewidywanie szerokości rozwarcia rys w elementach konstrukcyjnych a tym samym umożliwi projektowanie bardziej zoptymalizowanych konstrukcji. Współczynniki korekcyjne mogą być stosowane przy zawartości kruszywa odpadowego powyżej 50%.

Rozdział 7 – „Podsumowanie i wnioski”

Rozdział ten zawiera podsumowanie i wnioski wypracowane na bazie przeprowadzonych badań studialnych, doświadczalnych oraz obliczeń numeryczno - analitycznych.

Przeprowadzone badania oraz analizy, zaprezentowane w cyklu artykułów potwierdzają postawione w niniejszej dysertacji tezy:

1. możliwe jest opracowanie takiego kompozytu cementowego, wytworzonego na bazie odpadów pochodzących z fabryk porcelany, pustaków ceramicznych oraz piasku odpadowego, którego właściwości doraźne oraz długotrwałe będą odpowiadały betonowi zwykłemu.,
2. możliwe jest skuteczne zastosowanie systemu cyfrowej korelacji obrazu do pomiaru wybranych cech reologicznych kompozytów cementowych w elementach belkowych obciążonych długotrwałe.

Wyniki uzyskane we wszystkich badaniach potwierdziły, iż zaproponowany skład kompozytów cementowych wykonywanych na bazie materiałów odpadowych pozwala na otrzymanie materiałów o parametrach wytrzymałościowych odpowiadających betonom zwykłemu. Zarówno piasek odpadowy, odpady porcelanowe jak i kord stalowy mogą być wykorzystywane do produkcji kompozytów o odpowiednich parametrach wytrzymałościowych. W przypadku odpadów uzyskanych z produkcji pustaków ceramicznych, badania należy kontynuować w celu poprawy niektórych ich cech. M.in. należałoby poprzez zastosowanie odpowiednich dodatków lub wzmożoną pielęgnację zredukować odkształcenia powodowane skurczem oraz pęczaniem. **Zastosowanie systemu optycznego w badaniach długotrwałych dało zadowalające rezultaty. Wyniki uzyskane tą metodą nie odbiegały od wartości uzyskanych za pomocą mikroskopu czy ekstensometru nasadowego.** Niedogodnością takiego rozwiązania była konieczność każdorazowego dostosowywania parametrów systemu do pomiarów tj. ustawianie pozycji kamer, regulacja kąta ich nachylenia oraz kalibracja systemu. Pomimo tego, łączny czas pomiaru za pomocą systemu optycznego był krótszy w porównaniu do czasu przeznaczanego na pomiary „ręczne”. Istotną zaletą pomiarów wykonanych przy użyciu systemu optycznego jest możliwość wstecznej analizy oraz graficzne przedstawienie wyników. W trakcie analiz można powrócić do dowolnego momentu pomiarowego. Przykładem tego jest analiza zarysowań konstrukcji, które początkowo są trudne do dostrzeżenia w systemie. Po zlokalizowaniu miejsca zarysowania łatwiejszym jest określenie momentu, w którym dokładnie doszło do ich pojawienia się w elemencie. Zaprojektowane i wykonane stanowisko przeznaczone do obciążania długotrwałego belek w skali naturalnej jest skuteczną propozycją badania cech reologicznych. Odpowiednio dobrane obciążenie doprowadziło do zarysowania we wszystkich badanych elementach. Ugięcia belek były wyraźne, a dystans pomiędzy nimi umożliwiał kontynuowanie badań. Elementy stalowe stanowiska nie uległy nadmiernym deformacjom przez cały okres badania.

Kontynuacja badań

Ponieważ wyniki badań przeprowadzonych w ramach niniejszej dysertacji uzyskano dla ograniczonej liczby próbek, to w celu dalszej weryfikacji zaproponowanych współczynników wymagana jest ich kontynuacja przy zwiększonej liczbie badanych elementów z użyciem konkretnych kompozytów np. cementowych z dodatkiem piasku odpadowego (o frakcjach $0,125 \div 2,0\text{mm}$) przy uwzględnieniu aspektu ekonomicznego związanego z przygotowywaniem kruszywa pochodzącego z odpadów. Kontynuacja badań wymaga również polepszenia parametrów badawczych stanowiska pomiarowego.

Rozdział 8 – „Bibliografia”

W bibliografii przywołano 79 pozycji literaturowych (14 w języku polskim i 65 w języku angielskim, w tym 7, gdzie Doktorant jest współautorem). W ramach niniejszej rozprawy opublikowano 6 artykułów naukowych o łącznym IF – 22,956 oraz 650 punktach wg MEiN.

Załączniki

Rozprawę zamyka wspomnianych wyżej 6 załączników w postaci artykułów, publikowanych w wysoko punktowanych czasopismach.

Załączniki zawierają wyniki badań, które wykorzystano w zasadniczej części pracy i które posłużyły do przeprowadzenia analiz i sformułowania wniosków końcowych.

5. Uwagi krytyczne

Przedstawione w niniejszym punkcie uwagi krytyczne nie obniżają wartości merytorycznej recenzowanej rozprawy i jednocześnie jej pozytywnej oceny. Część uwag zamieszczono już w punkcie 4 recenzji. Należy je traktować jeszcze jako formę dyskusji naukowców oraz praktyków, którzy podejściem naukowo – badawczym dążą do ulepszenia pewnych już ustabilizowanych rozwiązań materiałowo – technicznych, w tym przypadku dotyczących stosowania materiałów będących odpadami do produkcji zapraw i betonów kompozytowych. Mam nadzieję, że uwagi te znajdą zrozumienie Doktoranta i ukierunkują jego przyszłe działania badawczo naukowe w celu jego wdrożenia w praktyce budowlanej.

Inne uwagi krytyczne i pytania jakie nasunęły się podczas recenzowania pracy:

Praca została napisana poprawnym językiem pod względem stylistycznym i gramatycznym. Recenzent wskazuje tu na niedociągnięcia edycyjne, w tym interpunkcyjne i literowe, które są w niewielkim stopniu zauważalne, lecz nie mają merytorycznego wpływu na jej jakość i zrozumienie.

- 5.1 Tytuł rozprawy nie oddaje w pełni zakresu przeprowadzonych badań i analiz chociaż jest poprawny i odpowiada celom w niej postawionym.
- 5.2 Brak jest zbiorczego wykazu oznaczeń na wstępie dysertacji.
- 5.3 Mało czytelny jest przegląd literatury – zabrakło tu jej szerszego przywołania wraz z objaśnieniami i odniesieniem się do zakresu zainteresowań i badań Doktoranta. Nie przy wszystkich odwoływaniach w tekście wskazywano na konkretną publikację, często zapisując, iż badania wykonywano zgodnie z procedurami normowymi lub wg normy..., lub też powołując się jedynie na nazwiska ich autorów.
- 5.5. Czy w zadaniu nr 1 przebadano wszystkie materiały wchodzące w skład użytych kompozytów?
- 5.6. Jak jest zastosowanie autorskiej metody określania wytrzymałości na rozciąganie przy zginaniu (tabela 9) w zadaniu nr 2?
- 5.7. Dlaczego badanie skurczu i pęcznienia w zakresie zadania nr 3 ograniczono wyłącznie do okresu jednego roku a nie tak jak to ma miejsce w badaniu belek (zadanie 4) do 1000 dni? Z jakich też względów do badań w zadaniu 3 przyjęto tylko część z zaproponowanych kompozytów do analizy cech reologicznych? Dlaczego badanie pęcznienia i skurczu realizowano na podstawie instrukcji ITB a nie wg aktualnych norm?
- 5.8. Z jakich względów do badań w zakresie zadania nr 4 przyjęto belki o stopniu zbrojenia włóknami 0,5 i 1,0% i w stosunku do jakiego materiału jest to udział. Z czego wynika przyjęta ilość dozowanych włókien?

- 5.9. Czy stanowisko do badań właściwości długotrwałych belek rzeczywiście jest autorskim rozwiązaniem, czy też w literaturze można znaleźć rozwiązania podobne? Czy każda z belek obciążona jest tak samo (jest taka sama wartość obciążenia)? Czy obciążenie wywołane układem dźwigniowym na stanowisku rzeczywiście nie zmienia się w czasie?
- 5.10. Jaki wpływ na przeprowadzone badania długotrwałe belek miała zmiana wilgotności i temperatury? Czy uwzględniano zmianę tych parametrów w analizach obliczeniowych? Jeżeli tak to w jaki sposób?
- 5.11. Zastosowany system cyfrowej korelacji obrazu do pomiarów długotrwałych był wielokrotnie wykorzystywany podczas pomiarów różnych belek. Oznacza to, że był on wielokrotnie przestawiany i kalibrowany. Można by stwierdzić, że praktycznie nigdy nie był w tym samym położeniu, odległości, itd. od badanej belki. W jaki sposób uwzględniano zmianę położenia systemu na wartości odkształceń belek.
- 5.12. Brak jest informacji w dysertacji o weryfikacji uzyskanych wyników z przeprowadzonych badań? W jaki sposób stwierdzono, że uzyskane wyniki są wiarygodne? Jakie błędy były popełniane podczas poszczególnych badań? Czy były one brane pod uwagę w analizie wyników z badań?
- 5.13. Czy zaproponowana modyfikacja metody normowej w zakresie obliczania szerokości rozwarcia rysy ma uniwersalny charakter, czy też jest jednostkowym rozwiązaniem (poprzez wprowadzenie odpowiedniego współczynnika)?
- 5.14. Czy wyniki badań ugięć belek nie mogłyby stanowić podstawy do zaproponowania jakiejś modyfikacji lub własnej metody obliczeń? Z czego wynika propozycja jedynie modyfikacji metody obliczania szerokości rozwarcia rys wg PN-EN?
- 5.15. Proszę również o określenie procentowego zaangażowania w poszczególne publikacje wchodzące w skład cyklu publikacji w ramach rozprawy doktorskiej

Uwagi redakcyjne

W przedstawionym konspekcie rozprawy doktorskiej jest kilka błędów językowych i stylistycznych. Doktorant jest niekonsekwentny przy opisie tabel i rysunków. Część z nich jest w języku polskim a część w języku angielskim. Można by ujednolicić język w treści doktoratu.

Przykładowe błędy/niedociągnięcia w tekście:

- brak wyjaśnienia oznaczeń krzywych na rysunku 4.2.
- Tabela 8 – niepotrzebna jednostka w kolumnie **Kształt/wymiary próbki**
- brak objaśnień skrótów na rysunkach 6.7 oraz 6.8
- w niektórych miejscach brakuje cytowań np. str. 34 ostatni wiersz

6. Wnioski

Przedmiotem recenzji jest rozprawa doktorska mgr inż. Mateusza Zakrzewskiego pt. „Analiza cech reologicznych kompozytów cementowych na bazie materiałów odpadowych”, której promotorem jest dr hab. inż. Jacek Domski prof. PK. Dysertacja stanowi oryginalne rozwiązanie zadania naukowego dotyczącego możliwości zastosowania domieszek porecyklingowych lub odpadowych do produkcji zapraw i betonów a tym samym wyrobów konstrukcyjnych wykonywanych na bazie cementu.

W mojej ocenie cel przyjęty w rozprawie został osiągnięty natomiast tezy zbudowane przez Doktoranta zostały potwierdzone. Tematyka rozprawy wybitnie wpisuje się również w proces

zrównoważonego wykorzystywania zasobów naturalnych poprzez ograniczenie ich pozyskiwania w naturalnym środowisku. Kierunek badań Doktoranta wychodzi to naprzeciw oczekiwaniom i wymaganiom Unii Europejskiej jak również spełnia jeden z wymogów ustawy Prawo budowlane w zakresie art. 5 ust.1. Doktorant dokonał tu szerokiej analizy z zakresu możliwości wykorzystywania odpadów wytwarzanych zarówno w produkcji materiałów ceramicznych, pochodzących z recyklingu opon samochodowych jak również w przyszłości z rozbiórek obiektów budowlanych w celu wyprodukowania kompozytów cementowych o właściwościach odpowiadającym współcześnie stosowanym tradycyjnym betonom.

Zagospodarowanie odpadów budowlanych i innych jest obecnie jednym z głównych rozwiązań mających na celu ograniczenie wydobycia i przerobu surowców ograniczania powierzchni/kubatur miejsc deponowania odpadów nieprzetwarzanych. Doktorant uzasadnia w dysertacji potrzebę stosowania ww. dodatków do nowych wyrobów betonowych jako zamienników dotychczas stosowanych surowców i wyrobów, ponieważ przy odpowiednim ich dobraniu mogą zagwarantować parametry wytrzymałościowe „tradycyjnym” zaprawom i betonom obecnie stosowanym. Cennym elementem pracy jest stworzenie własnego, autorskiego stanowiska badawczo-pomiarowego, przystosowanego do jednoczesnego badania kilku belek, wykorzystującego niekonwencjonalny optyczny system pomiaru ich odkształceń. Doktorant jest świadomy konieczności ulepszenia stanowiska badawczego pozwalającego na powiększanie jego możliwości badawczych oraz szybszą i prostszą obróbkę uzyskiwanych wyników.

Rozprawa jest jeszcze pionierskim podejściem do zagadnień ponownego wykorzystania odpadów pochodzących z różnych źródeł i różniących się właściwościami jako pełnowartościowych surowców, lecz tak jak wskazuje Doktorant po przeprowadzeniu stosownych badań, analiz obliczeniowych oraz uzasadnień.

7. Sentencja recenzji

Recenzowana rozprawa doktorska mgr inż. Mateusza Zakrzewskiego pt. „Analiza cech reologicznych kompozytów cementowych na bazie materiałów odpadowych” **spełnia wymogi** stawiane w Ustawie z 14 marca 2003 r. o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki (Dz.U.2003, nr 65, poz.595, z późn. zm.) oraz w Rozporządzeniu Ministra Nauki i Szkolnictwa Wyższego z 19 stycznia 2018 r. w sprawie szczegółowego trybu i warunków przeprowadzania czynności w przewodzie doktorskim, w postępowaniu habilitacyjnym oraz w postępowaniu o nadanie tytułu profesora, **stąd wnoszę o dopuszczenie jej do publicznej obrony.**

Z poważaniem

dr hab. inż. Dariusz Bajno prof. PBŚ

