

Koszalin, 03.08.2022 r.

prof. dr hab. inż. Wiesława GŁODKOWSKA  
Katedra Konstrukcji Betonowych i Technologii Betonu  
Wydział Inżynierii Lądowej, Środowiska i Geodezji  
Politechnika Koszalińska

## RECENZJA

pracy doktorskiej mgr inż. Michała DEMBY

pt.: „*Modelling and experimental research of polypropylene fibre reinforced high performance concrete regarding ductility*”

promotor: prof. dr hab. inż. Mieczysław KUCZMA

### Spis treści

1. Podstawa formalna recenzji
  2. Celowość podjęcia tematu
  3. Ogólna charakterystyka pracy
  4. Ocena merytoryczna rozprawy
    - 4.1. Prawidłowość tytułu, postawionych celów naukowych i tezy rozprawy
    - 4.2. Ocena wartości naukowej rozprawy
  5. Uwagi
    - 5.1. Uwagi redakcyjne
    - 5.2. Uwagi krytyczne i dyskusyjne
  6. Podsumowanie i wnioski końcowe
-

## 1. Podstawa formalna recenzji

Podstawą formalną recenzji jest pismo nr RD/d/20/01/2022, w którym Przewodniczący Rady Dyscypliny Inżynieria Lądowa i Transport Politechniki Poznańskiej prof. dr hab. inż. Jacek Pielecha informuje, że Rada Dyscypliny na posiedzeniu w dniu 24 maja 2022 r. podjęła uchwałę o powołaniu mnie na recenzenta w przewodzie doktorskim mgr inż. Michała Demby.

## 2. Celowość podjęcia tematu

Współczesne budownictwo betonowe stawia przed inżynierami trudne do realizacji zadania związane ze spełnieniem wymagań stanów granicznych nośności i użytkowości w zróżnicowanych warunkach oddziaływań statycznych oraz dynamicznych. Mała wytrzymałość na rozciąganie i podatność na propagację rys sprawia, że w niektórych przypadkach, beton wysokiej wytrzymałości staje się materiałem o niewystarczających właściwościach fizyczno-mechanicznych. Im większa wytrzymałość na ściskanie, materiał jest bardziej kruchy, a jego zniszczenie następuje przy niewielkich wartościach odkształceń. Jednym ze sposobów polepszenia właściwości betonu jest stosowanie różnego rodzaju domieszek i dodatków. Rozwiązanie to ma swoje początki w starożytności, kiedy to właściwości kruchych materiałów ulepszano poprzez zastosowanie dodatków w postaci ciętej słomy czy zwierzęcej sierści. Kolejno, dodatki te zastępowano kawałkami drutów, włóknami azbestowymi, a obecnie włóknami szklanymi, stalowymi, węglowymi, bazaltowymi oraz polipropylenowymi. Beton, którego skład jest wzbogacony o zbrojenie rozproszone po osiągnięciu naprężeń niszczących nie ulega nagłemu pęknięciu, ale zachowuje zdolność przenoszenia obciążeń, co bez wątpienia jest najważniejszą cechą decydującą o jego przydatności w konstrukcjach. Poprawianie kruchej natury betonu poprzez dodatek różnego rodzaju włókien przyczyniło się do sformułowania w połowie XX wieku pierwszej teorii drutobetonu i wdrażanie jej do praktyki inżynierskiej.

Najwięcej uwagi w pracach naukowych poświęcono fibrokompozytom ze stalowym zbrojeniem rozproszonym, w mniejszym stopniu ze zbrojeniem syntetycznym. Włókna stalowe wpływają zdecydowanie na poprawę nośności, jak i użytkowości elementów żelbetowych. Wadą jest ich wysoki koszt i podatność na korozję. Włókna syntetyczne (PFRC – Polymer Fibre Reinforced Concrete), mniej popularne, skutecznie powstrzymują rozprzestrzenianie się rys wywołanych skurczem plastycznym świeżego betonu, a tym samym korzystnie wpływają na jego właściwości. Eliminacja rys skurczowych powoduje poprawę szczelności, ogranicza nasiąkliwość betonu i zwiększa jego trwałość. Kompozyty ze zbrojeniem z włókien syntetycznych wykazują dobrą trwałość przy działaniu zmiennych warunków atmosferycznych, zachowują stabilność w większości środowisk agresywnych chemicznie. Cechy te przyczyniły się do wzrostu zainteresowania włóknami polipropylenowymi. Na ich popularność składa się także niższy, niż w przypadku włókien stalowych czy węglowych, koszt i mają także mniejszą wagę. Autor pracy doktorskiej

swoje zainteresowania skupił więc na wpływie włókien polipropylenowych na zachowanie się betonu wysokiej wytrzymałości pod obciążeniem i słusznie, gdyż te zagadnienia nie są jeszcze dostatecznie rozpoznane.

Poprawa kruchości betonu jest przedmiotem licznych badań i analiz. O dużym zainteresowaniu tą tematyką świadczy znaczna liczba publikacji, które ukazały się w ostatnich latach, a także tematyka sympozjów i konferencji naukowych. Zachęcające wyniki badań wstępnych i studia literaturowe skłoniły Doktoranta do podjęcia tej tematyki i zaplanowania badań eksperymentalnych oraz numerycznych w tym zakresie. Na tle problemów poruszanych w artykułach i opracowaniach naukowo-badawczych dostrzec można znaczący aspekt poznawczy podjętej przez Doktoranta tematyki (poprawa ciągliwości betonu wysokiej wytrzymałości i zmiana mechanizmu jego zniszczenia) oraz praktyczny podjętego tematu. Wskazuje to na jego wagę, aktualność, a także atrakcyjność. Podjęta w niniejszej dysertacji tematyka jest zgodna z aktualnymi tendencjami badawczymi związanymi z poszukiwaniem materiałów o coraz lepszych właściwościach fizyko-mechanicznych. Temat rozprawy doktorskiej oceniam więc pozytywnie.

### 3. Ogólna charakterystyka pracy

Przedmiotem recenzji jest rozprawa doktorska Pana mgr inż. Michała Demby „*Modelling and experimental research of polypropylene fibre reinforced high performance concrete regarding ductility*”. Promotorem rozprawy jest prof. dr hab. inż. Mieczysław Kuczma.

Przedstawiona do recenzji rozprawa ma charakter badawczy. Napisana jest w języku angielskim. Liczy 162 strony, z czego część zasadnicza (98 stron) podzielona została na 7 rozdziałów. Oprócz części właściwej praca zawiera też dwa załączniki ze szczegółowymi wynikami badań laboratoryjnych. W pracy zamieszczono wykaz stosowanych oznaczeń i skrótów, streszczenia w języku angielskim i polskim oraz spis literatury liczący 212 pozycji. Bibliografia została przygotowana z wydzieleniem norm i raportów (13 pozycji) z listy książek i artykułów (199 pozycji). Autor rozprawy jest współautorem 7 z pozycji wykazanych w Bibliografii. Rozprawa liczy 138 rysunków i 34 tablice. Ich spis został zamieszczony na końcu pracy.

Rozdział 1 (*Motivation*) jest wprowadzeniem do treści rozprawy doktorskiej dotyczącej betonów wysokowartościowych zbrojonych włóknami polipropylenowymi. Doktorant uzasadnia dlaczego niniejsze zagadnienie stało się przedmiotem Jego badań i analiz.

W rozdziale 2 (*Aim and scope of the research*) sformułowano problem naukowy i przedstawiono tezę rozprawy. Wyznaczono drogę osiągnięcia celu naukowego, a mianowicie: badania doświadczalne (będące trzonem pracy), modelowanie i symulacja numeryczna oraz wyznaczenie parametrów ciągliwości w belkach wykonanych z betonu o wysokiej wytrzymałości ze zbrojeniem konwencjonalnym i włóknami polipropylenowymi. Każde z powyższych zadań ogólnie scharakteryzowano, a ich szczegółowe omówienie zawierają kolejne rozdziały od 4 do 6.

Rozdział 3 (*PFRHPC – the state-of-the-art*) to rozległe studia literaturowe na temat składu mieszanki betonowej i kształtowania właściwości betonów o wysokiej wytrzymałości z dodatkiem włókien, głównie polipropylenowych. Przedstawiono także najnowsze osiągnięcia w tej dziedzinie i wskazano kierunki zastosowań takich fibrokompozytów. Pod koniec rozdziału podsumowano różne modele betonu na potrzeby pracy doktorskiej. Opracowanie modelu teoretycznego, który będzie odzwierciedlał zachowanie betonu wysokiej wytrzymałości zbrojonego włóknami polipropylenowymi pod obciążeniem jest wyzwaniem, jakie postawił sobie Doktorant w rozdziale 5 dysertacji.

Rozdział 4 (*Experimental research*) obejmuje część eksperymentalną pracy i z uwagi na obszerność zawartych w nim informacji składa się z 8 podrozdziałów. W pierwszych czterech podrozdziałach opisano próbki (betonowe i cementowe) użyte w badaniach, zastosowane materiały (tu też zamieszczono wyniki badań cementu i cementu z mikrokrzemionką), podano składy mieszanek betonowych oraz omówiono aparaturę i stanowiska badawcze. Badania betonu przeprowadzono na belkach o wymiarach 12x24x260 cm, 10x10x50 cm, kostkach 10x10x10 cm i walcach o średnicy 10 cm i wysokości 20 cm. Zilustrowano przekroje podłużny i poprzeczny belek pełnowymiarowych. Celem określenia wpływu warunków wykonania elementów betonowych na ich jakość, próbki formowano w laboratorium uniwersyteckim oraz zakładzie prefabrykacji firmy PEKABEX. Biorąc pod uwagę dużą liczbę wariantów badawczych Autor przedstawia na specjalnym rysunku (rys. 4.2 i tabl. 4.2, str. 16) przyjęty sposób interpretacji opisu każdej próbki. Mimo to czytelnik napotyka trudności w interpretacji pojawiających się oznaczeń próbek, o czym więcej w rozdz. 5.1 niniejszej recenzji. W podrozdziale 4.2, str. 19 *Użyte materiały* scharakteryzowano materiały zastosowane w badaniach, podano składy mieszanek betonowych oraz wyniki badań cementu i cementu z krzemionką, gęstości nasypowe kruszywa (2 składy kruszywa o różnym uziarnieniu, różnych producentów, rys. 4.13 i 4.14.). Na podstawie badań wstępnych ustalono ostatecznie stosunek  $w/c=0,25$ , ilość superplastyfikatora w stosunku do masy cementu, równą 3%. Dodatek włókien polipropylenowych wynosił  $20 \text{ kg/m}^3$ . W podrozdziale 4.3 ogólnie opisano aparaturę użytą w badaniach. Na uwagę zasługuje zastosowanie bezdotykowego systemu pomiarowego ARAMIS bazującego na cyfrowej korelacji obrazu. Podrozdział 4.4 zawiera informacje o przeprowadzonych badaniach wstępnych oraz o ostatecznych składach mieszanki betonowej. Podrozdziały 4.5–4.8 skupiają się już na wynikach przeprowadzonych badań. I tak, podrozdział 4.5 dotyczy badań wytrzymałości na ściskanie, które zostało przeprowadzone zarówno na próbkach sześciennych, jak i walcowych. Dodatkowo, dla jednego wariantu badawczego powtórzono badanie po roku czasu. W kolejnym podrozdziale 4.6 omówiono i przedstawiono wyniki badań modułu sprężystości podłużnej oraz współczynnika Poissona. Badanie wykonano stosując metodę A normy PN-EN 12390-13, która pozwala na określenie nie tylko ustabilizowanego, ale również wczesnego modułu Younga. W podrozdziale 4.7 przedstawiono wyniki badań wytrzymałości na rozciąganie przy zginaniu fibrobetonu uzyskane w badaniu trójpunktowego zginania (belki o wymiarach 10

x 10 x 50 cm). Wyraźna różnica w pracy zginanego elementu po uwzględnieniu w jego składzie włókien polipropylenowych została przedstawiona nie tylko na fotografiach, ale również na wykresach siła-przemieszczenie. Zwrócono uwagę, że większy rozrzut wyników uzyskano w przypadku belek wykonanych w zakładzie prefabrykacji niż formowanych w laboratorium uniwersyteckim. Ostatni podrozdział 4.8 dotyczy pełnowymiarowych elementów, którymi są belki o wymiarach 12 x 24 x 260 cm. Zostały one poddane trójpunktowemu zginaniu ze sterowanym przemieszczeniem, które cyklicznie wzrasta (o 1mm ugięcia w środku rozpiętości wraz z każdym kolejnym cyklem obciążenia). Wynikami są otrzymane pętle histerezy na wykresach siła – przemieszczenie. W celu czytelniejszego porównania wyników pomiędzy poszczególnymi wariantami Autor zdecydował się wykorzystać obwiednie takich wykresów. Pomierzono również trwałą część przemieszczenia przy każdym kolejnym cyklu obciążenia – odciążenia. Autor przeanalizował różne warianty badawcze biorąc pod uwagę miejsce przygotowania próbek (warunki laboratoryjne i przemysłowe), rodzaj zastosowanego zbrojenia (tradycyjne, rozproszone, tradycyjne + rozproszone) i rodzaj zastosowanych materiałów (typ pyłu krzemionkowego i kruszyw).

W rozdziale 5 (*Modelling*) zawarto sformułowanie problemu określenia związków konstytutywnych dla betonu zbrojonego włóknami polipropylenowymi. Celem przedstawionych w nim analiz było opracowanie modelu obliczeniowego, który będzie opisywał zachowanie belek wykonanych z betonu o wysokiej wytrzymałości z dodatkiem włókien polipropylenowych. Do rozwiązania postawionego problemu skorzystano z modelu betonu Concrete Damage Plasticity związanego z teorią plastyczności. Model ten szczegółowo omówiono i wykorzystano w prowadzonych w środowisku ABAQUS symulacjach. Dla przygotowanego modelu przedstawiono wykresy siła - przemieszczenie w wariantach bez i z zbrojeniem rozproszonym w postaci włókien polipropylenowych. Przeprowadzono również test wrażliwości (podrozdział 5.4) siatki elementów skończonych przy założeniu czterech różnych wielkości elementu skończonego.

Rozdział 6 (*Ductility of FPRHPC beams*) dotyczy zagadnienia ciągliwości. Autor przywołując stosowną literaturę opisuje miary ciągliwości, a mianowicie: współczynnik ciągliwości, energię pęknięcia, długość charakterystyczną, długość ciągliwości i wskaźniki wytrzymałości. W kolejnych rozważaniach odnosi się do badań doświadczalnych i obliczeń analitycznych, aby porównać omawiane parametry uzyskane w różnych wariantach badawczych. Ciągliwość belek laboratoryjnych określa poprzez wyznaczenie wskaźników wytrzymałości. W przypadku belek pełnowymiarowych ciągliwość zdefiniowano poprzez wyznaczenie energii pęknięcia, długości charakterystycznej, długości ciągliwości oraz wskaźników wytrzymałości. W rezultacie przedstawiono wpływ zastosowanego zbrojenia rozproszonego w postaci włókien polipropylenowych na wartość wspomnianych miar ciągliwości.

Wnioski końcowe, będące potwierdzeniem tezy rozprawy doktorskiej zawarto w rozdziale 7 (*Conclusions and future research*). Z uwagi na obszerność problematyki podjętej przez Doktoranta rozprawa ta nie obejmuje wszystkich kwestii. Autor

dostrzegając niedostatki podaje dalsze kierunki badań. W wyniku przeprowadzonej wnikliwej analizy rezultatów badań w niniejszym rozdziale zawarto także szereg wniosków szczegółowych.

Podsumowując rozdział recenzji dotyczący *Ogólnej charakterystyki pracy* stwierdzam, że treść jest zgodna z tytułem. Tytuł rozprawy jest aktualny i interesujący, tak z poznawczego, jak i praktycznego punktu. Przyjęty układ pracy uważam za logiczny oraz właściwy, typowy dla prac o charakterze badawczym, a mianowicie: wprowadzenie w tematykę pracy, sformułowanie problemu naukowego i postawienie tezy, studia literaturowe w zakresie przedmiotu pracy, zaplanowanie eksperymentu i materiałów do badań, stanowisko badawcze, wyniki badań eksperymentalnych i ich analiza, model obliczeniowy, wnioski końcowe. Jednakże niektóre treści rozprawy powinny ulec uporządkowaniu. Do tej kwestii odniosę się w pkt. 5.1 recenzji. Rozprawę doktorską zilustrowano dużą liczbą rysunków i tabel. Na podkreślenie zasługuje staranność oraz czytelność wykonanych rysunków i wykresów. Cytowana literatura jest obszerna, zarówno ta dawniejsza, jak i współczesna. Przeprowadzone badania eksperymentalne i analiza wyników badań własnych są o cechach poznawczych.

#### **4. Ocena merytoryczna rozprawy**

##### **4.1. Prawdliwość tytułu, postawionych celów naukowych i tez rozprawy**

Tytuł rozprawy jest adekwatny do przedmiotu i treści rozprawy. Zasługuje na pozytywną ocenę, gdyż jest aktualny i interesujący, tak z poznawczego, jak i praktycznego punktu.

Celem naukowym (wyznaczono 3 zadania) podjętym przez Doktoranta jest analiza wybranych właściwości stwardniałego fibrobetonu wysokiej wytrzymałości ze zwiększoną ilością włókien polipropylenowych, modelowanie i symulacja numeryczna oraz określenie parametrów ciągliwości w belkach PFRHPC takich, jak: współczynnik ciągliwości, energię pęknięcia, długość charakterystyczną, długość ciągliwości i wskaźniki wytrzymałości. Sposób ich realizacji uważam za naukowy oraz prowadzący do udowodnienia postawionej tezy, a mianowicie:

*„Wzmocnienie z włókna polipropylenowego znacznie poprawia zachowanie w warunkach zginania i ciągliwość belek z betonu wysokiej wytrzymałości”*

(„The polypropylene fibre reinforcement significantly improves the flexural behaviour and ductility of high performance concrete beams”).

Po przestudiowaniu rozprawy doktorskiej stwierdzam, że teza rozprawy została sformułowana poprawnie.

## 4.2. Ocena wartości naukowej rozprawy

Doktorant wykonał wartościowe badania, które należycie opisał i udokumentował licznymi rysunkami i tablicami. Łącznie zbadał 132 próbki. Przeprowadzone badania eksperymentalne, analityczne i analiza uzyskanych wyników są o cechach poznawczych i aplikacyjnych. Wskazują na to sformułowane wnioski szczegółowe znajdujące się w poszczególnych rozdziałach części eksperymentalnej i zostały usystematyzowane w rozdziale zamykającym rozprawę, jak i wnioski końcowe potwierdzające przyjętą hipotezę naukową. Stwierdzam, że badania doświadczalne, z wyjątkiem liczby próbek (zbyt mała liczba) w wariantach badawczych, zostały zaplanowane właściwie, co pozwoliło na osiągnięcie założonych celów naukowych, a tym samym udowodnienie tezy rozprawy. Warto zwrócić uwagę, że w badaniach tych autor wykorzystał aż trzy różne systemy pomiarowe: system pomiarowy prasy INSTRON, liniowy czujnik przemieszczeń oraz bezdotykowy system pomiarowy ARAMIS. W pracy zamieszczono również mapy odkształceń poziomych uzyskane za pomocą systemu bazującego na cyfrowej korelacji obrazu. Badania zostały przeprowadzone bardzo sumiennie i starannie z wykorzystaniem najnowszej aparatury pomiarowej. Wnioski sformułowane w pracy, na podstawie analizy wyników badań, obliczeń i studiów literaturowych w mojej ocenie, są poprawne. Należy podkreślić, że modelowanie numeryczne i badania eksperymentalne betonu o wysokiej wytrzymałości, zbrojonego włóknem polipropylenowym o wysokiej zawartości, są nieliczne. Opracowując model numeryczny Doktorant posłużył się modelem betonu Concrete Damage Plasticity. Jako narzędzie wybrał program ABAQUS. Dobór norm, metod i stanowisk badawczych oraz narzędzi wspomagających przeprowadzenie badań, ich analizę, a także opracowanie wyników oceniam bardzo pozytywnie.

Podsumowując stwierdzam, że Doktorant wniósł istotny wkład w rozwiązanie postawionego zagadnienia, wykazując że włókna polipropylenowe zastosowane, jako zbrojenie rozproszone w zginanych elementach żelbetowych, wykonanych z betonu wysokiej wytrzymałości, w istotny sposób wpływają na ich ciągliwość. Doktorant poprzez swoje badania eksperymentalne i analizy numeryczne wskazał rozwiązanie mające na celu polepszenie właściwości betonu, jaką jest jego kruchość. Dodatek włókien polipropylenowych wprawdzie nie poprawia w sposób znaczący nośności takich przekrojów, ma jednak istotny wpływ na jego wytrzymałość na rozciąganie. Przekształca on kruchy beton w materiał quasi-plastyczny, który charakteryzuje się możliwością redystrybucji naprężeń rozciągających po zarysowaniu na pobliskie włókna. Zatem po osiągnięciu naprężeń niszczących beton wysokiej wytrzymałości z dodatkiem włókien polipropylenowych nie ulega nagłemu pęknięciu, ale zachowuje zdolność przenoszenia obciążeń, co bez wątpienia jest najważniejszą cechą, decydującą o przydatności tego materiału w konstrukcjach.

Opiniowana dysertacja dowodzi, że Doktorant wykazał się umiejętnością formowania problemu naukowego, planowania oraz przeprowadzania eksperymentu przy użyciu

tradycyjnych i nowoczesnych technik badawczych i obliczeniowych, opracowania wyników badań, formułowania wniosków na podstawie analizy wyników, a także studiów literaturowych. Wnioski końcowe zostały sformułowane poprawnie i są potwierdzeniem zrealizowanego celu naukowego. Przeprowadzone badania doświadczalne, numeryczne i analiza uzyskanych na drodze eksperymentalnej i obliczeniowej wyników są o cechach poznawczych.

## 5. Uwagi

Podczas czytania i analizowania treści rozprawy, nasunęły mi się uwagi redakcyjne, krytyczne i dyskusyjne. Uwagi przedstawione poniżej nie obniżają wartości merytorycznej i ogólnej pozytywnej oceny rozprawy. Są one o charakterze dyskusyjnym, ale też i porządkowym. Najważniejsze z uwag przedstawiam poniżej w takiej kolejności, w jakiej nasunęły mi się podczas studiowania rozprawy.

### 5.1. Uwagi redakcyjne

➤ Studiując część doświadczalną rozprawy odczuwam brak dwóch podrozdziałów, które są istotne w pracach doświadczalnych, a mianowicie: *Plan i zakres badań* oraz *Wykonanie i pielęgnacja elementów próbnych*. Treści, które można byłoby uporządkować i zamieścić w tych rozdziałach przewijają się przez cały rozdział 4 rozprawy. Informacje o przyjętej liczbie elementów próbnych dla poszczególnych grup betonu, oznaczenie tych grup, termin badania, rodzaj badania (np. ściskanie, zginanie), oznaczenie serii próbek, itp. są nieuporządkowane. Powinny znaleźć się na początku rozdziału 4 co znacznie poprawiłoby percepcję treści tego rozdziału. Przy obecnym układzie czytelnik z każdą przeczytaną stroną pracy dowiaduje się, jakie kolejne składniki mieszanki betonowej będą badane, czy będą z dodatkiem włókien, czy też bez włókien, długość włókien, które elementy będą wykonane w warunkach laboratoryjnych, a które w przemysłowych. Sporządzenie więc zbiorczej tabeli i zatytułowanie jej, np.: *Program badań wiodących (belki pełnowymiarowe) i towarzyszących (właściwości betonu i jego składników)* znacznie ułatwiłoby percepcję treści. Ponadto brakuje podstawowych informacji o warunkach wykonania i pielęgnacji elementów próbnych, takich jak: temperatura i wilgotność względna powietrza przechowywania elementów próbnych wykonanych w warunkach laboratoryjnych i przemysłowych, kolejność dozowania i mieszania składników, czasy mieszania, czas wibrowania. Wymienione parametry technologiczne są ważne aby np. móc porównywać swoje wyniki badań doświadczalnych z wynikami innych badaczy. Warunki wykonania i pielęgnacji mają przecież duży wpływ na kształtowanie właściwości badanego kompozytu. Proszę aby o te informacje wzbogacić prezentację rozprawy doktorskiej podczas publicznej obrony.

➤ Prowadząc dyskusję wyników badań Doktorant często traktuje ją jakościowo, a nie ilościowo. Podaje, że różnice między rozpatrywanymi wielkościami fizycznymi są np.



„dość mniejsze”, „większe”, zamiast opisać je procentowo (dla przykładu: str. 56, 9 w. od góry).

- Autor w pracy podaje, że w badaniach użyto włókna polipropylenowe o długości 48 mm, np. str. 36, a na str. 16 informuje, że są to włókna długości 50 mm. Z danych producenta wynika, że długość włókien wynosi 48 mm.
- Nie podano źródła rys. 4.29, nie jest on przecież dziełem Autora.
- Uważam, że podrozdział 4.6 z uwagi na zawarte w nim treści, powinien brzmieć: „Wyznaczenie modułu sprężystości i współczynnika Poissona”, zamiast „Wyznaczenie parametrów materiału”. Obecny tytuł podrozdziału jest bardzo ogólny i nie odzwierciedla właściwie jego treści.

## 5.2. Uwagi krytyczne i dyskusyjne

- Doktorant niewłaściwie nazywa wytrzymałość fibrobetonu wyznaczoną w badaniu belek laboratoryjnych 10x10x50 cm. Nie jest to wytrzymałość na zginanie tylko wytrzymałość na rozciąganie przy zginaniu. Otóż w próbie zginania 3-punktowego, a takie badanie przeprowadzono, maksymalna wartość naprężenia rozciągającego, osiągnięta w dolnej części włókna badanej belki, określana jest, jako wytrzymałość na rozciąganie przy zginaniu. W próbie tej zniszczenie następuje bezpośrednio pod punktem przyłożenia obciążenia, gdy wyczerpana zostanie właśnie ta wytrzymałość.
- W moim odczuciu, biorąc pod uwagę doświadczenia własne i innych badaczy, liczba elementów próbnych użytych do określenia właściwości betonu, który jest materiałem niejednorodnym, jest zbyt mała, aby uznać ją za reprezentatywną. Liczbę próbek, która w sposób naukowo uzasadniony pozwoli na określenie wartości badanej cechy można wyznaczyć z rozkładu *t-Studenta* zakładając w analizie tolerancję  $v=10\%$  i poziom istotności  $\alpha=0,05$ . Uważam, że nie będzie to liczba 3 próbek - w przypadku badania wytrzymałości na rozciąganie przy zginaniu, wytrzymałości na ściskanie, czy też modułu sprężystości betonu i współczynnika Poissona. Na podstawie uzyskanych pomiarów Autor przecież buduje model numeryczny, ocenia ciągliwość elementów wykonanych z betonu zbrojonego włóknami. W sumie przeanalizowano dużo wariantów badawczych. Doktorant przebadał łącznie 132 próbki, co wyróżnia Jego badania. Ale do określenia i oceny właściwości zaprojektowanego, nowego fibrokompozytu 3 próbki to jednak za mało. Doktorant również zauważa ten problem przy obliczaniu średniej wartości modułu sprężystości, czy też wytrzymałości na rozciąganie przy zginaniu kiedy ma do dyspozycji tylko 2 wyniki, gdyż jeden z trzech nie należy do populacji, odpowiednio: tabl. 4.23 i tabl. 4.26. Przy kolejnym planowaniu eksperymentu, mając do czynienia z materiałem niejednorodnym, myślę, że Doktorant wyznaczy niezbędną liczbę próbek, która w sposób naukowo uzasadniony pozwoli mu na określenie średniej wartości badanej cechy.

➤ Str. 52, tabl. 4.26 zestawiono wyniki badań belek 10x10x50 cm podając siłę niszczącą i wytrzymałość na rozciąganie przy zginaniu. Wartość średnią, odchylenie standardowe i współczynnik zmienności dla wariantu I-1 obliczono na podstawie trzech pomiarów, uwzględniając wynik nie należący do populacji (belka I-1-b1), na co wskazał mi test Dixona. Jest to dobry przykład, który pokazuje czym skutkuje przyjęcie zbyt małej liczby próbek, nie popartej żadną wstępną analizą statystyczną, np. testem t-Studenta.

Przyjęta w eksperymencie mała liczba próbek do wyznaczenia średniej wartości badanych cech betonu nasuwa pytanie w kontekście przedstawionych powyżej uwag. Czym kierował się Doktorant przyjmując taką a nie inną liczbę elementów próbnych i dlaczego układając plan eksperymentu uznał ją za wystarczającą?

➤ Dostrzegam niedostatki w badaniu belek pełnowymiarowych, a mianowicie:

W analizie belek pełnowymiarowych ze zbrojeniem rozproszonym i bez włókien zabrakło mi opisu morfologii rys, analizy i opisu faz pracy elementu zginanego z włóknami polipropylenowymi, wyznaczenia momentu rysującego, określenia wpływu włókien polipropylenowych na redukcję rozwartości rys, czy ugięcie elementu. Przecież optyczny system pomiarowy ARAMIS można z powodzeniem wykorzystać do badania i śledzenia procesu powstawania i propagacji rys, czyli zarysowania elementów w całym zakresie obciążeń, w sposób ciągły podczas obciążeń rosnących monotonicznie, jak i zmiennych, pod kątem momentu rysującego, odległości między rysami oraz liczby i szerokości rozwarcia rys, czy ugięć. Zebranie takich informacji podczas badań pozwoliłoby na sporządzenie pełnego opisu pracy zginanego elementu ze zbrojeniem klasycznym i rozproszonym. Mają one nie tylko dużą wartość poznawczą, ale i wskazują na przydatność praktyczną i ewentualne kierunki zastosowań betonu wysokiej wytrzymałości z dodatkiem włókien polipropylenowych o zwiększonej zawartości.

➤ Doktorant podsumowując wyniki analiz numerycznych i badań doświadczalnych (rozdz. 5.3 rozprawy, str. 80, 3 w. od dołu) stwierdza, że wyniki uzyskane z analizy numerycznej są cyt.: „*nieco większe niż uzyskane z badań doświadczalnych i jest to zgodne z oczekiwaniami*”. Uzyskane różnice między wynikami eksperymentalnymi a obliczeniowymi są niewielkie co wskazuje na dobrą zgodność odpowiedzi modelu numerycznego i eksperymentu. Mnie jednak zaniepokoiło stwierdzenie, że właśnie takiej relacji Doktorant oczekiwał, tzn., że obliczeniowe wartości analizowanych wielkości fizycznych są większe od doświadczalnych. Przy nieistotnej różnicy między wartościami średnimi, tak jak uzyskano w analizach własnych, ten kierunek nie ma znaczenia. Jednak gdy różnice są istotne statystycznie to np. projektowana nośność przekroju, moment rysujący, ugięcie maksymalne, czy nawet wartości cech materiału są po stronie niebezpiecznej. Tak zaprojektowany element może ulec zniszczeniu, zarysowaniu zanim osiągnie wartości określone numerycznie, jako graniczne.

- W pracach naukowych nie należy używać nazw handlowych produktów przyjętych do badań, gdyż informacje mogą przyczynić się do reklamy produktu lub być antyreklamą. Uwaga dotyczy nazwy handlowej włókien polipropylenowych, superplastyfikatora i kruszywa.
- Czy zniszczenie próbek fibrobetonu wysokiej wytrzymałości z dodatkiem włókien polipropylenowych, pokazanych przykładowo na fot. 4.24 i fot. 4.37, nastąpiło wraz z zerwaniem włókien, czy zostały one wyciągnięte z matrycy? Takich informacji brakuje przy analizie sposobu zniszczenia elementów próbnych i próby wyjaśnienia sposobu zniszczenia. Proszę o stosowny komentarz.
- Do dalszych kierunków badań dodałabym określenie optymalnej zawartości włókien polipropylenowych w betonie wysokiej wytrzymałości. Najważniejszym zadaniem technologicznym jest dobranie takiego składu fibrokompozytu, który zapewniałby maksymalny wzrost wartości cech fizyko-mechanicznych przy zachowaniu odpowiedniej urabialności, konsystencji oraz optymalnych kosztów.

## 5. Podsumowanie i wniosek końcowy

Autor zaplanował obszerny program badań stawiając przed sobą do realizacji ambitne cele naukowe. Konsekwentnie je realizuje, udowadniając tym samą postawioną tezę naukową. W mojej opinii niniejsza dysertacja wnosi w przedmiotowym temacie znaczny wkład w rozwój wiedzy w dziedzinie inżynierii materiałów budowlanych w zakresie cementowych fibrobetonów wysokiej wytrzymałości ze zwiększoną ilością włókien polipropylenowych, mając znaczenie naukowe i praktyczne. Recenzowana rozprawa doktorska stanowi oryginalne rozwiązanie postawionego problemu naukowego, a Doktorant wykazał się ogólną wiedzą teoretyczną z zakresu inżynierii materiałów budowlanych w dyscyplinie naukowej Inżynieria Lądowa i Transport, a także umiejętnościami samodzielnego planowania i prowadzenia pracy naukowej. Należy nadmienić, że uwagi zawarte w punkcie 5 recenzji nie obniżają w żadnym stopniu wartości merytorycznej i ogólnej pozytywnej oceny rozprawy doktorskiej. Są o charakterze dyskusyjnym, ale też i porządkowym. Powinny pomóc Autorowi podczas planowania kolejnych prac badawczych i przygotowywania artykułów do czasopism naukowych.

Po zapoznaniu się z pracą doktorską Pana mgr inż. Michała Demby „*Modelling and experimental research of polypropylene fibre reinforced high performance concrete regarding ductility*” stwierdzam, że opiniowana rozprawa spełnia wymagania Ustawy o stopniach i tytule naukowym z dnia 14 marca 2003 r., z późniejszymi zmianami, stawiam więc **wniosek o dopuszczenie jej do publicznej obrony oraz wyróżnienie.**

