



**Politechnika Krakowska**  
Wydział Inżynierii Lądowej



**dr hab. inż. Izabela HAGER, Prof. PK**  
Politechnika Krakowska im. Tadeusza Kościuszki  
Wydział Inżynierii Lądowej  
ul. Warszawska 24  
31-155 Kraków

Kraków, 14 sierpnia 2023

### **Recenzja pracy doktorskiej przedłożonej**

Radzie Naukowej Dyscypliny Inżynieria Lądowa, Geodezja i Transport

Politechniki Warszawskiej

w związku z ubieganiem się

o tytuł **doktora nauk technicznych** w dyscyplinie **inżynieria lądowa, geodezja i transport**

mgr inż. **Małgorzaty Wydra**

### **"Fire resistance of concrete columns reinforced with BFRP bars"**

Promotor: dr hab. inż. **Jadwiga Fangrat**, Prof ITB

Promotor pomocniczy: dr inż. **Wojciech Kubissa**

**Podstawę prawną recenzji stanowi Ustawa z dnia 20 lipca 2018 r. Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (z późniejszymi poprawkami).**

Prezentowana recenzja podzielona została na następujące części:

- I) Ocena układu rozprawy
- II) Kontekst badań i ich cel
- III) Ocena piśmiennictwa
- IV) Szczegółowa ocena merytoryczna poszczególnych części pracy doktorskiej
- V) Lista pytań
- VI) Ostateczny wniosek i oświadczenie podsumowujące

### **Ocena układu rozprawy**

Rozprawa doktorska **"Fire resistance of concrete columns reinforced with BFRP bars"** jest napisana w języku angielskim i składa się z 7 głównych rozdziałów. Zawiera 129 stron, wraz ze spisem symboli, skrótów oraz rysunków, oraz obszerne załączniki liczące 102 strony. Pracę rozpoczyna wprowadzeniem do tematu, przedstawiającym tło i motywację do podjętych badań. Rozdział 2 dotyczy przeglądu literatury, rozdział 3 opisuje problem naukowy jakim

zajęła się w pracy Pani Małgorzata Wydra. Po przeglądzie literatury następuje rozdział 4, prezentujący wykonane eksperymenty. W rozdziale 5 przedstawiono analizy i symulacje numeryczne, które zostały zastosowane przez Kandydatkę. Po tej części następuje rozdział 6 zawierający analizę uzyskanych wyników, a rozdział 7 to podsumowanie i wnioski z uzyskanych wyników.

Rozprawa jest przygotowana z zachowaniem odpowiednich standardów redakcyjnych. Wszystkie rysunki są starannie opracowane i przedstawione w tekście oraz w załącznikach. Język pracy jest spójny, a dokument łatwo się czyta. Praca doskonale prezentuje się w zaproponowanej formie wydawniczej.

### **Kontekst badań i ich cel**

Praca Kandydatki dotyczy tematyki związanej z możliwością wykorzystania w betonowych elementach ściskanych kompozytowych prętów zbrojeniowych FRP. Ze względu na ich charakterystyki mechaniczne wysoką wytrzymałość mechaniczną, niski współczynnik przewodności cieplnej i odporność korozyjną, jak również rosnące ceny stali pręty kompozytowe są uważane za dobrą alternatywę dla zbrojenia metalicznego. Niedogodnością tego rozwiązania jest jednak niska odporność prętów kompozytowych na podwyższoną temperaturę, jaka pojawia się podczas pożaru. Tematyka pracy jest interesująca z punktu widzenia poznawczego, jak również bardzo ambitna ze względu na charakter eksperymentalny i trudność realizacji obszernego programu badawczego. Trudność wynika również ze specyfiki badań prowadzonych pod obciążeniem wysoką temperaturą. Szczególnym wyzwaniem eksperymentalnym było określanie zmian właściwości materiału (prętów kompozytowych z włóknami bazaltowymi – BFRP) w podwyższonej temperaturze i badanie elementu betonowego pełnowymiarowego zbrojonego BFRP w warunkach pożaru.

**Jako cel pracy doktorskiej, Kandydatka uznaje odpowiedź na postawione tzw. „pytania badawcze” zostały sformułowane następująco:**

- 1. Czy osiowo ściskany słup betonowy ze zbrojeniem BFRP może uzyskać odporność ogniową na poziomie umożliwiającym właściwe zaprojektowanie i zastosowanie tego typu zbrojenia prętami kompozytowymi jako alternatywy dla tradycyjnego zbrojenia prętami stalowymi?*
- 2. Czy jest możliwe jest określenie powyżej wskazanej odporności ogniowej z wykorzystaniem dostępnych metod numerycznych na satysfakcjonującym poziomie zgodności z wynikami badań doświadczalnych?*
- 3. Jakie czynniki mogą wpływać na odporność ogniową słupów betonowych ze zbrojeniem BFRP?*

Pierwszy cel związany jest z realizacją wymagającego eksperymentu badawczego – badania ogniowego w pełnej skali, ściskanego słupa betonowego zbrojonego BFRP i określenia jego odporności ogniowej.

Drugi cel badawczy to odpowiedź na pytanie czy możliwe jest zastosowanie metod numerycznych do oceny odporności ogniowej elementów zbrojonych BFRP. Dodatkowym elementem jest weryfikacja modelu modelowania przy pomocy wyników przeprowadzonego eksperymentu.

Trzeci cel badawczy ma charakter ogólny i dotyczyć ma określenia czynników wpływających na odporność ogniową elementów betonowych zbrojonych BFRP.

Należy podkreślić, że w pracy podjęto również wiele innych wątków badawczych, które nie znalazły odzwierciedlenia w zadanych przez Autorkę "pytaniach badawczych", a dotyczyły przecież dość szerokiego zakresu badań i analiz numerycznych.

### **Ocena piśmiennictwa**

Kandydatka wykorzystała 238 pozycji bibliografii naukowej. Na podkreślenie zasługuje wybór aktualnej literatury przedmiotu oraz liczne odniesienia do najnowszych światowych badań w tej dziedzinie. Najnowsze publikacje wydane w ciągu ostatnich 5 lat (od 2018 r.) stanowią 27% (64 pozycji) całej bibliografii, co przy obecnej wysokiej dynamice obiegu wiedzy w nauce jest wskaźnikiem zadowalającym, biorąc pod uwagę specyfikę poruszanej w doktoracie tematyki.

### **Szczegółowa ocena merytoryczna poszczególnych części rozprawy**

Rozdział pierwszy wprowadza czytelnika w kontekst badawczy, motywację, metodologię i zarysy pracy.

Rozdział drugi zawiera przegląd literatury. Przedstawiono zalety włókien bazaltowych i BFRP oraz główne obszary zastosowań kompozytów polimerowych zbrojonych włóknami mineralnymi: bazaltowymi i szklanymi. Ta część pracy jest bardzo ogólna, i w mojej opinii Autorka zbyt lakonicznie przedstawiła właściwości i specyfikę stosowania prętów kompozytowych BFRP, omawiając min. zastosowania włókien bazaltowych.

Podobnie w podrozdziale 2.1.2 przedstawiającym właściwości FRP poddanych ogrzewaniu, czytelnik spodziewa się znaleźć szczegółowe informacje dotyczące zmian zachodzących w matrycy polimerowej, włóknach bazaltowych jak i zmian właściwości ogrzewanych prętów BFRP. W mojej opinii zabrakło również w przeglądzie literatury, podstawowych informacji dotyczących zmian właściwości betonu wynikających z jego ogrzewania.

W dalszej części Autorka opisuje przegląd metod stosowanych do oceny zmian właściwości materiału. Czy ta część nie powinna stanowić oddzielnego podrozdziału?

W dalszej części przeglądu znajdujemy obszerną tabelę (Tablica 3) przedstawiającą zestawienie dotyczące literaturowych doniesień z zakresu oceny zmian właściwości FRC wynikających z ogrzewania. Zestawiono tu zarówno doniesienia z zakresy badań nad kompozytami z włóknami bazaltowymi, którymi zajmuje się Autorka w swojej pracy, ale są tu obszerne opisy dot. innych typów inkluzji włóknistych (włókna szklane (GFRP), węglowe (CFRP)). Biorąc pod uwagę tematykę pracy zasadne byłoby skoncentrowanie się na wynikach badań dotyczących kompozytów z włóknami bazaltowymi, które stosowane były w pracy.

W rozdziale 2.2 Autorka omawia ważne z punktu widzenia nośności elementów zbrojonych prętami BFRP zagadnienie ich przyczepności do betonu. Niestety również tutaj Autorka nie skoncentrowała swojej uwagi na aspektach związanych z przyczepnością prętów zbrojeniowych do betonu, przedstawiając zagadnienia związane z badaniami m.in. przyczepności taśm wzmacniających z FRP.

W podrozdziale 2.3 Autorka przedstawia doniesienia literaturowe dotyczące badań elementów konstrukcyjnych z różnymi typami zbrojenia prętami FRP głównie z włóknami bazaltowymi i szklanymi. Przedstawia stosowane metody badań – zwracając uwagę na różnorodność podejść eksperymentalnych, co niewątpliwie utrudnia porównania i analizę wyników.

Autorka w podsumowaniu wykonanego przeglądu literatury formułuje trafne spostrzeżenia dotyczące ograniczonych doniesień w zakresie zachowania elementów ściskanych (większość badań dotyczy zginanych belek i płyt zbrojonych FRP). Również dostrzega lukę dotyczącą braku informacji o zachowaniu się ściskanych elementów betonowych zbrojonych FRP w warunkach działania wysokiej temperatury.

Autorka dostrzega, iż jednym z kluczowych czynników wpływających na odporność ogniową ściskanych elementów betonowych zbrojonych BFRP będzie miała ograniczona odporność matrycy polimerowej na temperaturę, jakość strefy stykowej beton pręt BFRP, stosunkowo niski moduł sprężystości i niska wytrzymałość na ściskanie prętów w porównaniu z ich wytrzymałością na rozciąganie.

Rozdział trzeci przedstawia sformułowany przez autorkę problem naukowy oraz ramowy program obszernych badań doświadczalnych i zakres przeprowadzonych analiz numerycznych.

Autorka wskazuje na oryginalność przeprowadzonych badań opierającą się przede wszystkim na tematyce, natomiast na oryginalności rozwiązania wyraża się poprzez kompleksowość w zakresie: podejścia eksperymentalnego skali badań od skali mikro do badań pełnoskalowych elementów konstrukcyjnych, jak również stosowanych licznych metod doświadczalnych. Niewątpliwą zaletą opracowania jest również realizacja równolegle eksperymentu jak i analiz numerycznych, co pozwoliło Autorce na walidację przyjętego modelu numerycznego.

W rozdziale czwartym obszernie opisano i zilustrowano metodykę badań i zastosowane procedury doświadczalne jak również wyniki zrealizowanych doświadczeń. Ta część pracy liczy 34 strony stanowi cenny wkład autorki w zrozumienia zachowania się ściskanych elementów betonowych zbrojonych prętami BFRP. Autorka przeprowadziła badania temperatury szklenia matrycy polimerowej. Analiza wyników przeprowadzonych doświadczeń pozwoliła na określenie wartości temperatury szklenia dla żywicy epoksydowej stosowanej w ściskanych prętach BFRP. Dostrzeżono, że jest ona znacznie niższa niż wartość sugerowana w literaturze dla prętów tego typu poddanych rozciąganiu (ok 400° C). Temperatura krytyczna jest znacząco niższa od wartości temperatury krytycznej dla stalowych prętów zbrojeniowych 500 °C według uproszczonej metody wyznaczania odporności ogniowej według PN-EN 1992-1-2:2004.

Autorka zaproponowała sposób realizacji doświadczeń mających na celu określenie wytrzymałości na ściskanie prętów BFRP jak również metod zmierzających do określenia wpływu temperatury 50, 100, 200°C na charakterystyki wytrzymałościowe BFRP.

Zaobserwowano znaczącą redukcję wytrzymałości na ściskanie wraz ze wzrostem temperatury - o 93% i 91% odpowiednio w temperaturze 100°C oraz o 81% i 75% w temperaturze 200°C, odpowiednio dla metody A i B.

W dalszej części opisano badania i analizy numeryczne (rozdział piąty) dla słupów w skali zredukowanej ze zbrojeniem prętami BFRP poddanymi ściskaniu osiowemu i mimośrodowemu. Badania i analizy przeprowadzono w temperaturze pokojowej.

Głównym punktem badań była realizacja badania odporności ogniowej słupa w pełnej skali ze zbrojeniem prętami BFRP ogrzewanego według scenariusza normowej krzywej pożarowej obciążonego do poziomu 1/3 obciążenia maksymalnego. Niestety ta, niewątpliwie interesująca część eksperymentu nie została wyczerpująco opisana. Szkoda, że zdjęcia bez właściwego komentarza nie zostały zamieszczone w tekście pracy, a zostały jedynie przedstawione w załączniku.

Mama nadzieję, że podczas obrony ten ważny element pracy zostanie szczegółowo omówiony i skomentowany.

Rozdział szósty pracy to dyskusja dotycząca uzyskanych wyników badań i rozdział siódmy podsumowuje pracę.

### Lista pytań

- 1) W swojej pracy doktorskiej przedstawiła Pani kilka metod badawczych, które z nich stanowią autorskie propozycje, a które są odzwierciedleniem metod zaczerpniętych z literatury? Jeśli mogłaby Pani krytycznie odnieść się do zrealizowanych badań, czy któreś z nich można było pominąć? Jakże badania chciałaby Pani powtórzyć lub uzupełnić?
- 2) Czy stosowane pręty były produktem komercyjnym? Dlaczego w pracy nie znalazły się karty produktu i właściwości mechaniczne deklarowane przez producenta?
- 3) Przewidując możliwość wystąpienia eksplozywnego złuszczenia się betonu (spalling) zaproponowała Pani zastosowanie włókien PP. Czy ich efektywność okazała się satysfakcjonująca, jaki był zasięg spallingu? Czy można oszacować głębokość odprysków? Jakże według Pani są przyczyny wystąpienia spallingu w betonie klasy C30/37?
- 4) W pracy informacje dotyczące samego betonu są ograniczone. Jaki był typ kruszywa, czy stosowano dodatki mineralne? Jaki był rodzaj włókien PP - fibrylowane czy monofilamentowe?).
- 5) Zapłon matrycy polimerowej nastąpił po 150 min od rozpoczęcia badania, na stronie 124 znajdujemy konkluzje dotyczące możliwości uzyskania odporności ogniowej elementów na poziomie 4 godzin. Proszę o komentarz.
- 6) Wśród czynników wpływających na odporność ogniową ściskanych elementów betonowych wymienia Pani: poziom obciążenia, wielkość mimośrodów oraz odstęp między strzemionami (str.126). Jakże inne parametry dopisze Pani do tej listy? Niewątpliwie brakuje wyróżnienia grubości otuliny.
- 7) W obliczeniach uwzględniła Pani pełzanie termiczne oraz przejściowe odkształcenia termiczne. Jaki typ zarysowania faworyzuje obecność obciążenia ściskającego podczas ogrzewania elementów ściskanych? Czy w kontekście palności matrycy organicznej zbrojenia kompozytowego ten typ zarysowania stanowi szczególne zagrożenie?
- 8) Czy niska wytrzymałość prętów kompozytowych na ściskanie, w Pani opinii, okazała się mieć duży wpływ na zachowanie się ściskanych elementów betonowych zbrojonych FRP podczas ogrzewania?
- 9) W swojej pracy poświęciła Pani dużo czasu i energii na określenie wpływu wielkości mimośrodu na nośność słupów betonowych zbrojonych FRP. Jakże jest znaczenie wyników tych badań w kontekście tematu Pani pracy: „Fire resistance of concrete columns reinforced with BFRP bars”?

## Ostateczny wniosek i oświadczenie podsumowujące

Przedstawiona rozprawa doktorska Pani Małgorzaty Wydra spełnia wszystkie wymagane kryteria stawiane tego typu opracowaniom tj.:

- jest oryginalnym rozwiązaniem postawionego problemu naukowego, jakim jest ocena odporności ogniowej słupów betonowych zbrojonych prętami kompozytowymi z włóknami bazaltowymi.
- wykazuje ogólną wiedzę teoretyczną Kandydatki w dyscyplinie inżynieria lądowa, geodezja i transport w szczególności w zakresie prowadzenia eksperymentu i modelowania numerycznego;
- potwierdza zdolność Doktorantki do prowadzenia samodzielnych badań, potwierdzoną również licznymi publikacjami współautorskimi, w których w większości jest pierwszym autorem;
- należy podkreślić, iż uzyskane wyniki badań posiadają praktyczne zastosowanie w inżynierii lądowej.

Do najważniejszych zalet recenzowanej rozprawy należą:

- unikatowy charakter podjętego tematu, w tym wypełnienie luki badawczej w temacie badań zachowania betonowych elementów ściskanych zbrojonych BFRP;
- zastosowanie szerokiego wachlarza metod doświadczalnych w tym autorskich procedur badawczych;
- rzetelne opracowanie uzyskanych wyników i dokumentacja wyników (obszerne załączniki);
- umiejętność formułowania wniosków naukowych.

Podsumowując, mogę stwierdzić, że recenzowana rozprawa doktorska **Pani Małgorzaty Wydra, spełnia wymogi Ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce** (z późniejszymi zmianami). Obszerne badania doświadczalne i wyniki modelowania numerycznego prowadzone przez Kandydatkę, oraz różnorodność narzędzi badawczych zastosowanych podczas realizacji programu badań, jak również ich realizacja w kilku ośrodkach badawczych znacznie poszerzyły kompetencje Kandydatki, wzbogacając jej umiejętności poznawcze.

**Pani Małgorzata Wydra**, autorka rozprawy pt.: **"Fire resistance of concrete columns reinforced with BFRP bars"**, przedłożonej na Radzie Dyscypliny Inżynieria Lądowa, Geodezja i Transport Politechniki Warszawskiej, wykazała się umiejętnością prowadzenia

badań naukowych. Przedstawiona rozprawa doktorska stanowi oryginalne rozwiązanie problemu naukowego w dziedzinie nauk technicznych w dyscyplinie inżynieria lądowa, geodezja i transport. Biorąc powyższe pod uwagę, w pełni spełnia wymogi Ustawy. Wnioskuje o dopuszczenie jej do obrony publicznej.

Z poważaniem

Miejsce: Kraków

Data: 14.08.2023

A handwritten signature in blue ink, consisting of several overlapping loops and strokes, positioned above the printed name.

**Dr hab. inż. Izabela Hager**  
Profesor Politechniki Krakowskiej