

dr hab. inż. Jacek Korentz, prof. uczelni
Uniwersytet Zielonogórski
Instytut Budownictwa
65-417 Zielona Góra, ul. Licealna 9
e-mail: j.korentz@ib.uz.zgora.pl

RECENZJA

rozprawy doktorskiej mgr inż. Bogusza Jaszcza
pt. „Badania doświadczalne i numeryczne zniszczenia w fazie chłodzenia
słupa żelbetowego poddanego oddziaływaniu podwyższonej temperatury”

1. Podstawa opracowania recenzji

Recenzja została opracowana na prośbę Pana prof. dr hab. inż. Jacka Pielechy, Przewodniczącego Rady Dyscypliny Inżynieria Lądowa, Geodezja i Transport Politechniki Poznańskiej zawartą w piśmie DIL.510.17.2.2026 z dnia 25 marca 2026 r. Podstawę formalną recenzji stanowi Uchwała Rady Dyscypliny Naukowej Inżynieria Lądowa, Geodezja i Transport z dnia 24 marca 2026 r. o powołaniu mnie na recenzenta rozprawy doktorskiej mgr inż. Bogusza Jaszcza pt. „Badania doświadczalne i numeryczne zniszczenia w fazie chłodzenia słupa żelbetowego poddanego oddziaływaniu podwyższonej temperatury”.

2. Przedmiot recenzji

Przedmiotem recenzji jest rozprawa doktorska mgr inż. Bogusza Jaszcza pt. „Badania doświadczalne i numeryczne zniszczenia w fazie chłodzenia słupa żelbetowego poddanego oddziaływaniu podwyższonej temperatury”. Pracę przygotowano na Politechnice Poznańskiej pod kierunkiem prof. dr hab. inż. Mieczysława Kuczmy, pełniącego funkcję promotora i dr inż. Arkadiusza Denisiewicza, pełniącego funkcję promotora pomocniczego.

3. Układ i treść rozprawy

Opiniowana rozprawa liczy 175 stron maszynopisu łącznie ze spisem treści, streszczeniem w języku polskim i w języku angielskim, definicjami, wykazem ważniejszych oznaczeń, bibliografią i załącznikami.

Rozprawa jest podzielona na osiem rozdziałów.

Rozdział pierwszy jest wprowadzeniem w tematykę rozprawy, która dotyczy odporności pożarowej konstrukcji w zakresie destrukcji słupów żelbetowych w fazie chłodzenia. Zawiera cele rozprawy i hipotezy badawcze.

Rozdział drugi będący przeglądem literatury zawiera opis aktualnego stanu badań doświadczalnych słupów w warunkach podwyższonej temperatury i w fazie chłodzenia, który pozwolił na wskazanie luk badawczych i kierunków badań w rozprawie doktorskiej.

Rozdział trzeci jest opisem stanu wiedzy z zakresu zachowania się betonu i stali zbrojeniowej w warunkach podwyższonej temperatury i normowych metod wyznaczenia nośności słupów żelbetowych w warunkach pożaru.

Rozdział czwarty jest opisem programu badań, elementów badawczych i stanowiska badawczego.

Rozdział piąty zawiera opis badań doświadczalnych i uzyskane wyniki badań i ich analizę dla różnych scenariuszy badań.

W rozdziale szóstym przedstawiono autorski model obliczeniowy wyznaczania nośności słupów uwzględniający rozkład temperatury, zachowanie się betonu i prętów zbrojeniowych.

Rozdział siódmy zawiera porównania wyników badań doświadczalnych i analiz MES i jest poświęcony walidacji opracowanego modelu obliczeniowego.

Rozdział ósmy zawiera wnioski ze wskazaniem kierunków dalszych badań.

Zamieszczona w rozprawie bibliografia zawiera 189 pozycji, w tym jedną współautorską pozycję Doktoranta.

Struktura rozprawy doktorskiej jest poprawna. Układ, kolejność i zakres poszczególnych części rozprawy są odpowiednie. Przedstawiono stan zagadnienia z uzasadnieniem podjęcia tematu pracy i na tej podstawie określono cele i zakres pracy i sformułowano hipotezę badawczą. Następnie opisano zakres wykonanych badań doświadczalnych, przedstawiono wyniki przeprowadzonych badań i ich analizę, zaproponowano model obliczeniowy i przeprowadzono jego walidację. Rozprawa kończy się posumowaniem z wnioskami i wskazaniem kierunków dalszych badań.

- (1) W rozprawie zamieszczono ponad dwadzieścia cytatów blokowych głównie w języku angielskim, a także niemieckim i dodatkowo w języku polskim z artykułów wykazanych w bibliografii. Rozprawa jest napisana w języku polskim, zatem powinny być zamieszczone tłumaczenia tych cytatów albo tylko odpowiednie komentarze bez cytatów.

4. Ocena rozprawy

4.1. Tematyka rozprawy

Tematyka rozprawy doktorskiej jest z zakresu odporności pożarowej konstrukcji żelbetowych. Doktorant skupił się przede wszystkim na nośności słupów żelbetowych w fazie chłodzenia. Jest to bardzo istotne zagadnienie, ponieważ w fazie chłodzenia słupy żelbetowe są również narażone na utratę nośności, co może prowadzić do ich zniszczenia nawet po pozornie przetrwanym pożarze. Takich badań w literaturze przedmiotu jest niewiele. Ponadto brakuje normowych metod oceny fazy chłodzenia na nośność słupów. Z tego względu wybór tej tematyki jest właściwy i celowy. Prace badawcze z tego zakresu mają duże znaczenie poznawcze i praktyczne.

Aby osiągnąć ten cel, przeprowadzono obszerny przegląd aktualnego stanu wiedzy na temat odporności pożarowej konstrukcji żelbetowych we wszystkich fazach pożaru: inicjacji, rozwoju, pełnego rozwinięcia i chłodzenia. Zaprogramowano obszerny program badań doświadczalnych i numerycznych. Rozważany problem badawczy jest mało znany, nie do końca zbadaany i bardzo ważny. Praca wypełnia lukę w badaniach i stanowi próbę oceny nośności słupów żelbetowych w fazie chłodzenia. Oceniam temat podjęty w rozprawie doktorskiej jako

bardzo istotny do rozważań naukowych, a uzyskane wyniki badań i wynikające z nich wnioski bardzo użyteczne w praktyce budowlanej.

4.2. Ocena merytoryczna

W rozprawie Doktorant podjął się weryfikacji hipotezy badawczej według której możliwe jest wywołanie kontrolowanego zniszczenia słupa żelbetowego w fazie chłodzenia pod stałym obciążeniem i zmiennym oddziaływaniem podwyższonej temperatury.

Głównymi celami rozprawy są: 1 - wywołanie w warunkach laboratoryjnych zniszczenia obciążonego słupa żelbetowego w fazie chłodzenia, 2 - stworzenie programu obliczeniowego do projektowania słupów w warunkach pożaru.

W ramach pierwszego celu wykonano obszerne badania doświadczalne słupów w warunkach normalnych, w warunkach rosnącej temperatury bez i z obciążeniem zewnętrznym i w warunkach malejącej temperatury. Realizacja tego celu wymagała od Doktoranta przeglądu aktualnego stanu wiedzy, analizy dostępnych wyników badań i przede wszystkim właściwego zaprogramowania badań doświadczalnych.

Drugim celem, stanowiącym uzupełnienie badań laboratoryjnych było opracowanie autorskiego programu obliczeniowego służącego do symulacji zachowania się słupów żelbetowych w warunkach pożaru i wspomagania ich projektowania w takich warunkach.

Aby zweryfikować hipotezę badawczą i zrealizować cele badawcze Doktorant podzielił rozprawę na analizę stanu wiedzy, badania doświadczalne w czterech etapach, opracowanie modelu obliczeniowego i walidację modelu.

Przegląd literatury, stan wiedzy. Doktorant dokonał obszernego przeglądu literatury przedmiotu. Bazował na publikacjach historycznych i najnowszych publikacjach dotyczących badań zachowania się słupów w warunkach podwyższonych temperatur w tym także z uwzględnieniem fazy chłodzenia.

Analiza badań doświadczalnych wykazała, że wpływ na odporność pożarową słupów mają między innymi: zabezpieczenia zewnętrzne, przekrój słupa i jego długość, rodzaj kruszywa, sposób zbrojenia, ilość zbrojenia, rozstaw strzemion, grubości otuliny, wytrzymałości betonu, a także warunki obciążenia. Doktorant opisał także rozwój metod projektowania słupów w warunkach pożaru i ich porównania z badaniami doświadczalnymi. Na podstawie analizy wyników badań nośności resztkowej i odkształcalności słupów w różnych fazach pożaru w tym w fazie chłodzenia Doktorant wskazał na istnienie luki badawczej dotyczącej możliwości wystąpienia opóźnionego zniszczenia słupa żelbetowego w fazie chłodzenia.

(2) Brakuje podsumowania wyników badań słupów w warunkach podwyższonej temperatury.

W dalszej części Doktorant skoncentrował się na związkach opisujących zachowanie się betonu i stali zbrojeniowej w warunkach podwyższonej temperatury wskazując wpływ podwyższonych temperatur na: właściwości termiczne, wytrzymałość na ścislenie i rozciąganie, odkształcenia termiczne i stosowane związki konstytutywne. Zamieszczony jest także opis normowych metod wyznaczania nośności słupów żelbetowych w warunkach pożaru. Rozdział zakończony jest przykładem analizy rozkładu temperatur w przekroju słupa dla różnych wartości wilgotności betonu i przewodności cieplnej wykonanej autorskim programem *Strefuś*, który wykazał jak duży wpływ na końcowy wynik analizy pożarowej mają dane wejściowe (gęstość, wilgotność, przewodność cieplna).

- (3) Str.61-62. Alternatywą dla prętów stalowych są pręty kompozytowe FRP, w tym pręty na bazie włókien szklanych GFRP między innymi z matrycą z żywicy epoksydowych, a nie pręty epoksydowe.

Badania doświadczalne. Celem badań było wywołanie zniszczenia obciążonego słupa żelbetowego w fazie chłodzenia. Aby zrealizować ten cel Doktorant zaprogramował cztery etapy badań tj. badania: w warunkach normalnych, w warunkach rosnącej temperatury otoczenia bez obciążenia zewnętrznego, w warunkach rosnącej temperatury otoczenia i stałym obciążeniem zewnętrznym i warunkach rosnącej, a następnie malejącej temperatury otoczenia i stałym obciążeniu zewnętrznym.

Badania przeprowadzono na słupkach o wymiarach 80mm x 80mm x 500mm z betonu o średniej wytrzymałości na ściskanie 52.67 MPa, zbrojonych w narożach prętami ϕ 6mm i 8mm klasy B500B i strzemionami 5mm x 5 mm co 50mm wyciętych z profilu RK60x5, zakończonych blachami stalowymi grubości 30mm ze specjalnym osprzętem w komorze termicznej zintegrowanej z maszyną wytrzymałościową INSTRON 8804.

- (4) Dlaczego nie przeprowadzono badań wytrzymałościowych prętów zbrojenia i strzemion?

- W warunkach normalnych uzyskano średnią nośność próbek z prętami ϕ 6 wynoszącą 347 kN, a z prętami ϕ 8 wynoszącą 392 kN.
- W warunkach rosnącej temperatury otoczenia do 600°C bez obciążenia zewnętrznego, po schłodzeniu, zanotowano średni spadek nośności próbek z prętami ϕ 8 do 253 kN tj. o 64.5%. Swobodne wydłużenie próbek zmieniało się w granicach 4.16 mm ÷ 5.56 mm, a swobodne odkształcenia termiczne $FTS = 0.00832 \div 0.01112$ ^A.
- W warunkach stałego obciążenia 270 kN i temperatury otoczenia rosnącej do 600°C trzykrotnie doszło do zniszczenia próbek tuż przed i trzykrotnie po osiągnięciu temperatury 600°C. Natomiast maksymalne skrócenie termiczne próbek pod obciążeniem wynosiło 0.5 mm, a odkształcenia termiczne pod obciążeniem $LITS = 0.001$ ^A.

- (5) Właściwą miarą odkształcalności są odkształcenia, a nie skrócenie, czy też wydłużenie zwłaszcza w kontekście definicji FTS i LITS. Odkształcenia pozwalają na bezpośrednią ocenę wytrzymałości betonu i stali zbrojeniowej.

- W warunkach stałego obciążenia 250 kN, 260 kN i 270 kN, rosnącej temperatury otoczenia do 600°C i chłodzenia do 20°C zbadano siedem próbek. Doktorant uznał, że w fazie chłodzenia udało się doprowadzić do zniszczenia jednej próbki pod obciążeniem 250 kN, co było między innymi efektem niezamierzonych odstępstw od przebiegu testu. Jedna próbka uległa zniszczeniu jeszcze w fazie ogrzewania pod obciążeniem 270 kN. W pozostałych przypadkach doszło do istotnych uszkodzeń próbek w postaci znacznych ubytków otuliny betonowej.

Model obliczeniowy. Doktorant wykorzystując MES opracował autorski program *PHD-Lab* do analizy odkształceń elementów żelbetowych w warunkach pożaru, w którym wykorzystano normowe właściwości termiczne betonu i stali zbrojeniowej, a także ich normowe związki konstytutywne dla parametrów mechanicznych materiałów zastosowanych w badaniach.

Walidacja modelu. Walidację modelu przeprowadzono dla wszystkich zbadanych próbek w

^A Obliczenia Recenzenta (dla $l = 500$ mm)

czterech etapach badań dla różnych kruszyw i modeli stali oraz dodatkowo w piątym etapie dla różnych obciążeń i modeli stali.

- W warunkach normalnych wyniki badań wykazały wystarczającą zgodność analizy MES z wynikami badań doświadczalnych.
- W warunkach rosnącej temperatury otoczenia do 600°C bez obciążenia zewnętrznego, po schłodzeniu zanotowano dobrą zgodność średniej nośności próbek uzyskanych z analiz MES dla modelu betonu z kruszywem wapiennym (248 kN) z wynikami badań doświadczalnych (253 kN). Dla modelu betonu z kruszywem krzemianowym różnica ta była duża (206 kN). Porównania wydłużenia próbek wykazały bardzo dobrą zgodność w trzech przypadkach, a w pozostałych różnice były większe maksymalnie o 34.6%.
- W warunkach stałego obciążenia 270 kN i temperatury otoczenia rosnącej do 600°C doszło w pięciu przypadkach do wcześniejszego zniszczenia modelu obliczeniowego niż stało się to w badaniach (od 4 min. do 12 min.), a w jednym przypadku później (4 min.). Porównania zmian długości próbek w doświadczeniach ze zmianami ich długości w modelu obliczeniowym w fazie ogrzewania wykazały właściwe analityczne odwzorowanie odkształceń termicznych, a także, że są one mniejsze dla wszystkich analizowanych modeli stali według EC kr 1, EC kr 3 i NIST. Najlepszą zbieżność uzyskano dla modelu stali EC2 kr 3.
 - (6) Brakuje bardzo ważnej informacji w jakiej dokładnie temperaturze doszło do zniszczenia próbek. Należy domyślać się, że w pięciu przypadkach przed i jednym po osiągnięciu temperatury 600°C.
 - (7) Skąd przyjęto parametry modelu EC2 kr 3?
 - (8) Bardzo ciekawe byłyby porównania uzyskanych wyników analiz z wynikami uzyskanymi z wykorzystaniem programów komercyjnych.
 - (9) Ciekawe byłyby analizy dla słupów w rzeczywistej skali a także porównania obliczeń z wynikami innych badań doświadczalnych.
- W warunkach chłodzenia przy stałym obciążeniu analizowano nośność próbek dla trzech wcześniejszych modeli stali. W dwóch przypadkach doszło do zniszczenia modelu obliczeniowego w fazie chłodzenia pod obciążeniem 260 kN i 270 kN dla modelu stali EC2 kr 1. Dla pozostałych przypadków obciążenia i modeli stali zniszczenie modeli obliczeniowych miało miejsce w fazie nagrzewania.
- Dodatkowe analizy parametryczne wykazały, że: wpływ spadku obciążenia początkowego na opóźnienie czasu zniszczenia w fazie chłodzenia, modelami stali można programować zniszczenie w fazie chłodzenia, zniszczenie w fazie chłodzenia zależy od tempa powrotu właściwości mechanicznych stali i ubytku wytrzymałości betonu w fazie chłodzenia.
 - (10) Jak zostało zdefiniowane zniszczenie próbek?

Podsumowanie. W podsumowaniu Doktorant zawarł wnioski, wymienił oryginalne elementy rozprawy i wskazał kierunki dalszych badań.

- Wnioski są następujące: w fazie chłodzenia dochodzi do istotnych uszkodzeń próbek w postaci znacznych ubytków otuliny betonowej i możliwa jest całkowita utrata zdolności do dalszego przenoszenia zadanego obciążenia, zaproponowany model obliczeniowy pomimo uproszczeń dobrze odwzorowuje wyniki badań doświadczalnych.
- Oryginalnych elementy rozprawy to: laboratoryjne zniszczenie „słupa żelbetowego” w fazie

chłodzenia po osiągnięciu temperatury 600°C, wielokrotne powtórzenia każdego badania, opracowany program obliczeniowy *PHD-Lab* do analizy i prognozowania zachowania się słupów żelbetowych w warunkach pożaru, opracowany program obliczeniowy *Srefuś* do generowania rozkładu temperatury w przekroju żelbetowym.

- Jako kierunki przyszłych badań wskazał: zmianę sposobu podparcia próbek w badaniach doświadczalnych na sztywno sztywne, pomiar wszystkich przemieszczeń, umieszczenie termopar wewnątrz próbek, badania próbek w fazie chłodzenia bez obciążenia zewnętrznego, zwiększenie zakresu oddziaływania temperatury, zastosowanie krzywej pożarowej ISO i badania tempa odzyskiwania temperatury przez stal.

4.3. Uwagi techniczne

Rozprawa zawiera usterki o charakterze technicznym, do których zaliczam:

1. Str.49. „*Prawa strona równania (3.49) jest w literaturze często określana mianem LITS (ang. load-induced thermal strain) czyli odkształceniami termicznymi wywołanym obciążeniem.*” Tłumaczenie skrótu LITS nie jest zrozumiałe i wprowadza czytelnika w błąd. Powinno być ‘odkształcenia termiczne wywołane pod obciążeniem’ albo krócej ‘odkształcenia termiczne pod obciążeniem’.
2. Znaczenie skrótów LITS i FTS powinno być zamieszczone sekcji *Definicje i oznaczenia*.
3. Str. 86. “*Uzyskane wartości wydłużenia próbek są większe niż uzyskane analitycznie w rozdziale 8*”. Str. 136 “*Na przykładzie próbki 21.8, w kolejnym etapie przeprowadzono analizy wpływu różnych parametrów na końcowy rezultat i moment zniszczenia próbki.*” Organizacja prac naukowych powinna być taka, aby nie zachodziła konieczność odwołań w przód, mogą być odwołania wstecz.
4. Str.88. Brakuje odwołania do Rys. 5.5.
5. Dokładność wyników do drugiego miejsca po przecinku jest zbyt duża (np. 252.67 kN).
6. W cytatach blokowych nie stosuje się cudzysłowów.

4.4. Uwagi końcowe

Recenzowana rozprawa doktorska dotyczy istotnych i aktualnych dla budownictwa zagadnień związanych z odpornością konstrukcji żelbetowych w warunkach pożaru i stanowi uzupełnienie aktualnego stanu wiedzy w tym zakresie. Oprócz wartości poznawczych dysertacja ma duże znaczenie praktyczne w projektowaniu konstrukcji żelbetowych w warunkach pożaru. Rozprawa zawiera bardzo interesujące badania, analizy i ustalenia dotyczące zachowania się słupów żelbetowych w warunkach pożaru w tym w fazie chłodzenia. Oryginalny problem naukowy przedstawiony w rozprawie został rozpoznany, właściwie zdefiniowany i rozwiązany. Poziom merytoryczny rozprawy oceniam bardzo wysoko.

Wymienione uwagi krytyczne w niczym nie umniejszają wartości merytorycznej rozprawy, którą oceniam bardzo wysoko. Doktorant powinien traktować uwagi Recenzenta jako wskazówki i wytyczne w dalszej działalności badawczej, a także w aktywności publikacyjnej.

Mgr inż. Bogusz Jaszcak przedstawił bardzo ciekawe rozwiązanie problemu naukowego wykazując się ogólną wiedzą i umiejętnością samodzielnego prowadzenia badań naukowych. Na podstawie obszernego przeglądu stanu wiedzy wyznaczył cele naukowe rozprawy i jej zakres, wskazał hipotezę badawczą i opracował bardzo szeroki program badań doświadczalnych i numerycznych, których zakres pozwolił na realizację wyznaczonych celów rozprawy i wery-

fikację hipotezy badawczej.

Podsumowując ocenę merytoryczną rozprawy do istotnych osiągnięć naukowych Doktoranta zaliczam: (1) trafnie dobrany temat rozprawy doktorskiej, (2) zaprogramowanie i zrealizowanie obszernego programu badań, (3) wykorzystanie nowoczesnych technik i metod badawczych, (4) opracowania autorskich programów komputerowych, (5) gruntowną analizę wyników badań pozwalającą na właściwe wnioskowanie (6) oryginalne wyniki badań, (7) aplikacyjny charakter wyników badań.

5. Podsumowanie i wniosek końcowy

Recenzowana rozprawa doktorska stanowi oryginalne rozwiązanie postawionego problemu naukowego w dyscyplinie Inżynieria Lądowa, Geodezja i Transport. Doktorant wykazał się obszerną wiedzą z zakresu dyscypliny naukowej i umiejętnością samodzielnego prowadzenia badań naukowych.

Przedłożona do recenzji rozprawa mgr inż. Bogusza Jaszcza pt. „Badania doświadczalne i numeryczne zniszczenia w fazie chłodzenia słupa żelbetowego poddanego oddziaływaniu podwyższonej temperatury”, opracowana pod kierunkiem prof. dr hab. inż. Mieczysława Kuczmy, pełniącego funkcję promotora i dr inż. Arkadiusza Denisiewicza pełniącego funkcję promotora pomocniczego spełnia wymagania stawiane rozprawom doktorskim określone w Ustawie Prawo o szkolnictwie wyższym z dnia 20 lipca 2018 r. (tekst jednolity DzU z 2022 r., poz.574 z późniejszymi zmianami).

W związku z powyższym stawiam wniosek o przyjęcie rozprawy doktorskiej i wnoszę o dopuszczenie mgr inż. Bogusza Jaszcza do publicznej obrony recenzowanej rozprawy doktorskiej.