



Warszawa, 6 lutego 2026 roku

Dr hab. inż. Jadwiga Fangrat, prof. instytutu
Zakład Badań Ogniwych
Instytut Techniki Budowlanej
ul. Filtrowa 1
00-611 Warszawa

Recenzja rozprawy doktorskiej

mgra inż. Pawła Majkowskiego

**pt. „Badanie elementów betonowych z zbrojeniem stalowym i kompozytowym wysokich
wytrzymałości pod obciążeniem statycznym i dynamicznym.”**

Podstawą formalną opracowania recenzji jest uchwała Senatu Politechniki Bydgoskiej im. Jana i Jędrzeja Śniadeckich nr 8/512 z dnia 19 listopada 2025 roku. Rozprawa doktorska stanowiąca przedmiot recenzji została przygotowana w Politechnice Bydgoskiej na Wydziale Budownictwa, Architektury i Inżynierii Środowiska. Promotorem rozprawy jest dr hab. inż. Maciej Dutkiewicz, prof. PBS, promotorem pomocniczym dr hab. inż. Jarosław Górecki. Doktorat ma charakter wdrożeniowy, toteż opiekunem pomocniczym w firmie Budimex S.A. był przełożony Doktoranta - mgr inż. Mariusz Hurylski. Ocena rozprawy została dokonana z uwzględnieniem wymagań zawartych w Ustawie z dnia 20 lipca 2018 r. Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (art. 187) (Dz. U. 2024 poz. 1571).

1. Charakterystyka ogólna pracy

Rozprawa doktorska ma charakter wdrożeniowy a została opracowana na podstawie prac teoretyczno-doświadczalnych finansowanych zgodnie z umową DWD/5/0263/2021. Tytuł rozprawy dobrze odzwierciedla jej zawartość, przy czym mam do niego uwagę stylistyczną (p. 2.1). Układ rozprawy uważam za poprawny i właściwy dla dysertacji doktorskiej. Rozprawa liczy 178 stron i składa się z dziewięciu rozdziałów numerowanych. Po wykazie skrótów, symboli i jednostek znajduje się spis treści a następnie streszczenia w języku polskim i angielskim zawierające słowa kluczowe. W rozdziale pierwszym, po krótkim wprowadzeniu Autor przedstawia strukturę rozprawy. Następnie, na podstawie przeglądu 128 publikacji, analizę stanu wiedzy (rozdz.2) obejmującą następujące główne zagadnienia: (1) kierunki badań nad

zbrojeniami wysokiej wytrzymałości; (2) zbrojenia kompozytowe; (3) stal zbrojeniowa wysokiej wytrzymałości; (4) beton. W podsumowaniu studium literaturowego Doktorant zidentyfikował i skrótowo opisał w punktach dotychczasowe ustalenia zespołów badawczych. Za jedno z ważniejszych spostrzeżeń uznać należy konieczność uwzględnienia w modelu obliczeniowym zmienności w szerokim przedziale wartości parametrów wytrzymałościowych zbrojenia kompozytowego w warunkach podwyższonej lub obniżonej temperatury. Autor słusznie zauważa, że zbrojenie kompozytowe FRP jest to materiał „który posiada istotne ograniczenia w stosunku do klasycznie stosowanej stali zbrojeniowej takie jak niski moduł sprężystości przy rozciąganiu, stosunkowo niska wytrzymałość na ściskanie oraz istotna utrata stałości głównych parametrów wytrzymałościowych w warunkach podniesionych temperatur stanowiące wady tego materiału w szczególności w pewnych elementach/modelach pracy konstrukcji.” (str. 62)

Wiedza na temat możliwości i warunków stosowania nowoczesnego typu zbrojenia wysokiej wytrzymałości ze stali B600B i z kompozytów polimerowych FRP jest niepełna, a w publikowanych badaniach osiągane są często rozbieżne wyniki, co utrudnia dalszy rozwój oraz uzasadnia podjętą tematykę przedstawionej do oceny pracy doktorskiej, jako osiągnięcia wypełniającego istotną lukę badawczą. W kolejnym rozdziale opisane zostały hipotezy, cele badawcze i zakres badań. Obecnie nie jest wymagane formułowanie hipotezy lub tezy, ale skoro już została podana, to uważam za stosowne odnieść się do niej w punkcie 2.1. Celem głównym rozprawy jest określenie „możliwości weryfikacji metod wymiarowania i modelowania elementów betonowych z zastosowaniem zbrojenia wysokiej wytrzymałości B600B i GFRP” a cztery dodatkowe cele pomocnicze obejmują określenie: (1) wymaganego stopnia zbrojenia dla płyt, jako elementów wybranych do badań, (2) nośności i własności użytkowych zbrojenia wysokiej wytrzymałości w różnych warunkach eksploatacji, (3) zasad diagnostyki stanu naprężeń i odkształceń, (4) warunków pracy zbrojenia w betonie z włóknem polipropylenowym lub poliwinylowym, w odniesieniu do trwałości i nośności elementu.

Należy zwrócić uwagę, że Doktorant nie posłużył się ustawowym sformułowaniem „problem naukowy”, jednak jest on wyrażony poprzez hipotezy i zakres badań oraz trafnie sformułowane cele badawcze.

W rozdziale czwartym Autor rozprawy przedstawił część badawczą, w której opisał przedmiot badań, materiały wytypowane do badań, metody badawcze uzupełnione obliczeniami, natomiast w kolejnym rozdziale otrzymane wyniki badań własnych. W rozdziale szóstym Doktorant przedstawił dyskusję otrzymanych wyników obejmującą też ich porównanie z danymi publikowanymi przez inne zespoły badawcze. W kolejnym rozdziale zaprezentował

podsumowanie i wnioski oraz omówił kierunki dalszych badań i potencjał wdrożeniowy. Kolejny rozdział to wykaz cytowanej literatury (131 poz.), w tym 120 artykułów naukowych i referatów konferencyjnych opublikowanych w latach 1993 – 2025. W tej grupie są dwa artykuły afiliowane nazwiskiem Doktoranta. Ponadto wykaz literatury zawiera 6 dokumentów normatywnych krajowych PN-EN i 5 zagranicznych. Zdecydowana większość cytowanych publikacji pochodzi z ostatnich 10 lat. Praca zawiera 50 rysunków i 39 tabel, natomiast nie zawiera ich spisu, co jest raczej nietypowe dla rozpraw doktorskich. Ostatni rozdział zawiera dziesięć załączników z dokumentacją z badań, głównie fotografie, tabele i wykresy.

2. Ocena merytoryczna rozprawy

2.1 Dobór tematu i cele naukowe rozprawy

W budownictwie związek nauki i praktyki inżynierskiej jest nierozzerwalny, przy czym często praktyka wyprzedza naukę. W tym obszarze badań dokonuje się jednocześnie postęp naukowy i technologiczny, w którym uczestniczą z rosnącym zaangażowaniem przedsiębiorcy budowlani, szczególnie poprzez rozwijanie i implementację innowacyjnych technologii. Rozpatrywana dysertacja doktorska odpowiada aktualnym nurtom badawczym w tej dziedzinie.

Porównanie elementów betonowych ze zbrojeniem stalowym i kompozytowym wysokich wytrzymałości wskazuje na istotne różnice w zakresie właściwości mechanicznych, trwałości oraz efektywności kosztowej. Zbrojenie stalowe nadal dominuje w większości tradycyjnych konstrukcji betonowych ze względu na dojrzałość technologii, przewidywalność zachowania i opłacalność. Natomiast kompozyty polimerowe wysokich wytrzymałości znajdują coraz szersze zastosowanie w sytuacjach specjalnych – tam, gdzie wymagana jest wysoka trwałość, mały ciężar własny lub odporność na środowisko agresywne. Choć koszt jednostkowy kompozytów jest wyższy niż stali, ich lekkość oraz brak konieczności konserwacji mogą prowadzić do niższych kosztów eksploatacyjnych w cyklu życia konstrukcji. W zastosowaniach, gdzie ciężar lub odporność środowiskowa ma kluczowe znaczenie, zbrojenie kompozytowe może być rozwiązaniem bardziej opłacalnym. Zbrojenie stalowe charakteryzuje się dużą wytrzymałością na rozciąganie, sprężystością oraz przewidywalnym zachowaniem pod obciążeniem. Stal współpracuje z betonem dzięki zbliżonemu współczynnikowi rozszerzalności cieplnej, co minimalizuje ryzyko uszkodzeń termicznych, przy czym tej zalety nie posiada zwykle zbrojenie FRP. Wprawdzie kompozyty wysokich wytrzymałości (np. GFRP, CFRP, BFRP) wykazują wyższą wytrzymałość na rozciąganie niż stal, ale niższy moduł sprężystości i kruchy charakter zniszczenia. Oznacza to, że elementy z takim zbrojeniem mogą wymagać większych przekrojów lub dodatkowych zabezpieczeń przed nadmiernymi odkształceniami.

Doktorant sformułował w rozdziale 3 na stronie 65, hipotezy i cele badawcze. W obecnym stanie prawnym formułowanie hipotez i tez w rozprawie doktorskiej nie jest wymagane, natomiast występuje w ustawie „problem naukowy”, który jednak jest nierozłącznie związany z hipotezami i celami badawczymi. W mojej ocenie są one oryginalne i trafne, a przeprowadzone badania eksperymentalne i teoretyczne, wraz z krytyczną analizą uzyskanych wyników, potwierdzają słuszność postawionych hipotez. Znajduje to poparcie we wnioskach końcowych przedstawionych w rozdziale 7.1.3.

Problem naukowy w takim ujęciu jest istotny poznawczo i ambitny, a jego rozwiązanie ma duży potencjał aplikacyjny i wdrożeniowy. Ponadto problem ten ściśle wpisuje się w obszar dyscypliny Inżynieria lądowa, geodezja i transport.

Podsumowując tę część recenzji, zarówno wybraną tematykę, jak i cele pracy można uznać za uzasadnione, aktualne i wymagające.

2.2 Ocena wartości naukowej rozprawy

Oryginalność przedstawionej do oceny pracy wynika przede wszystkim z jej tematyki dotyczącej właściwości i możliwości zastosowania nowoczesnego zbrojenia wysokiej wytrzymałości, która nie została wcześniej w zaprezentowanym ujęciu podjęta przez inne zespoły badawcze ani krajowe, ani zagraniczne. W rozprawie przedstawiono badania i analizy teoretyczne polegające na kompleksowym sposobie rozwiązania problemu poprzez połączenie analizy teoretycznej, laboratoryjnych badań wytrzymałościowych materiałów wsadowych i badań doświadczalnych na pełnowymiarowych elementach próbnych oraz na zastosowaniu nowoczesnej metodologii badawczej, na przykład cyfrowej korelacji obrazu.

Autor rozprawy wykazał się dobrą orientacją i umiejętnością prowadzenia badań i analiz teoretycznych, nie tylko w zakresie rozwiązań inżynierskich objętych tematyką rozprawy, ale w dużo szerszym wymiarze weryfikacji metod badawczych i obliczeniowych, które mogą być zastosowane w odniesieniu do zbrojenia wysokiej wytrzymałości.

Po analizie rozprawy uważam, że do głównych osiągnięć naukowych Autora można zaliczyć:

- opracowanie oryginalnego programu badań doświadczalnych wspartych analizą teoretyczną (rozdz. 4) i konsekwentne jego zrealizowanie w szerokim zakresie obejmującym ocenę nośności, ugięć i zarysowań płyt betonowych ze zbrojeniem wysokiej wytrzymałości wykonanym ze stali B600B lub kompozytów GFRP.

- wykazanie występowania zapasu nośności dla wszystkich badanych płyt, przy obu rodzajach rozpatrywanego zbrojenia, na podstawie własnych badań doświadczalnych i analiz numerycznych.
- stwierdzenie, na podstawie własnych badań doświadczalnych, istotnych różnic w określaniu ugięć w konfrontacji z metodami teoretycznymi proponowanymi w zalecanym dokumencie o charakterze instrukcji ACE (ang. American Concrete Institute).
- stwierdzenie występowania deficytu informacji zawartych w instrukcji ACE w odniesieniu do zjawiska powstawania rys w płytach ze zbrojeniem GFRP.

Wybrane przez Autora metody badań i analiz uznaję za poprawne, adekwatne do sformułowanych celów pracy, natomiast nieliczne zastrzeżenia i uwagi krytyczne rozwinęłam w kolejnym rozdziale. Uważam jednak, że wykonane badania i analizy teoretyczne pozwoliły na sformułowanie interesujących i cennych wniosków dotyczących nowoczesnego zbrojenia wysokiej wytrzymałości.

Podsumowując ocenę wartości naukowej rozprawy stwierdzam, że zrealizowane przez Doktoranta własne badania doświadczalne zostały zaplanowane właściwie. Metodyka zrealizowanych badań nie budzi zastrzeżeń. Badania zostały dobrze i wyczerpująco opisane i udokumentowane. Uzyskane rezultaty badań i obliczeń Autor przedstawił w sposób jasny i czytelny w postaci zestawień tabelarycznych, wykresów i dokumentacji fotograficznej. W mojej opinii przeprowadzona została poprawna interpretacja i krytyczna analiza uzyskanych wyników badań doświadczalnych i analizy teoretycznej, a na tej podstawie sformułowane zostały poprawne i cenne wnioski.

Jako oryginalne rozwiązanie problemu naukowego ustawowo wymagane w przypadku rozpraw doktorskich, można uznać kompleksowe i szerokie ujęcie zagadnienia poprzez połączenie analizy teoretycznej, laboratoryjnych badań wytrzymałościowych materiałów wyjściowych i badań doświadczalnych na pełnowymiarowych elementach próbnym oraz na zastosowaniu nowoczesnej metodologii badawczej, w tym cyfrowej korelacji obrazu.

3. Uwagi do rozprawy

Pomimo wysokiej wartości recenzowanej rozprawy i wskazanych powyżej walorów pracy, Autor nie ustrzegł się ustek i nieścisłości, zarówno w ujęciu formalnym jak i merytorycznym. Niedostatki pracy wymieniam poniżej w podziale na trzy grupy, jako uwagi krytyczne, dyskusyjne i szczegółowe.

3.1. Uwagi krytyczne

a) W tytule rozprawy i dalej w całej pracy występuje niepoprawna fonetycznie forma „z zbrojeniem”. Poprawną formą jest „ze zbrojeniem”. Użycie przyimka „ze” jest wymagane przed słowami zaczynającymi się od zbitki spółgłoskowej, w tym „zb-”, co ułatwia wymowę (zasada eufonii). W języku polskim, gdy przyimek „z” staje przed wyrazem rozpoczynającym się od spółgłosek takich jak z, ż, ż, ś, s, dodajemy „e”, aby uniknąć trudności w wymawianiu.

b) Wysoko oceniam walory naukowe pracy, natomiast jej potencjał aplikacyjny i wdrożeniowy został przedstawiony w sposób niepełny, jak na rozprawę doktorską o charakterze wdrożeniowym. Brakuje wyraźnego określenia, na czym miałyby polegać wdrożenie oraz zarysu przynajmniej wstępnych analiz ekonomicznych i efektywności, prawdopodobnie z uwagi na konieczność ochrony „*know how*” przedsiębiorstwa. Temat pracy doktorskiej wdrożeniowej powinien być ściśle związany z działalnością przedsiębiorstwa, a jej wyniki mają usprawnić jego funkcjonowanie poprzez np. innowacje lub doskonalenie procesów. Zauważam pewien deficyt tego typu stwierdzeń w treści rozprawy, wobec tego trudno jest mi się rzetelnie odnieść do tego aspektu rozprawy.

3.2. Uwagi dyskusyjne

3.2.1. W dyskusji i wnioskach Doktorant odnosi w sposób arbitralny rezultaty własnych badań tylko do wymagań zawartych w dokumencie opracowanym przez American Concrete Institute [19], podczas, gdy w analizie stanu wiedzy i spisie literatury uwzględnione są jeszcze cztery inne analogiczne dokumenty: japoński, włoski i dwa kanadyjskie. Proszę o uzasadnienie tego wyboru.

3.2.2. Omawiając potencjał wdrożeniowy badań w rozdziale 7.1.6 na stronie 140, Autor wymienia w kontekście obojętności elektromagnetycznej „*np. stacje transformatorowe, serwerownie zlokalizowane wewnątrz obiektów*” bez jakiegokolwiek komentarza. Natomiast wobec tych obiektów stawiane są rygorystyczne wymagania w zakresie bezpieczeństwa pożarowego, w tym odporności ogniowej przegród, aby chronić instalacje, sprzęt i dane. Kwestią niezwykle dyskusyjną jest przydatność zbrojenia GFRP w warunkach nawet niewielkiego wzrostu temperatury rzędu 200-300 °C, a tym bardziej warunków pożaru rozwiniętego. Wynika to nie tyle z właściwości samych włókien (szkło jest zasadniczo materiałem kwalifikowanym jako niepalny) co matrycy polimerowej. Proszę o skomentowanie i rozwinięcie tego zagadnienia.

Proszę, aby Doktorant podczas publicznej obrony odniósł się do wyżej wymienionych uwag dyskusyjnych.

3.3. Uwagi szczegółowe

- Str. 14 i dalej w pracy „*temperatur*” – w języku polskim, odmiennie do języka angielskiego, temperatura występuje w liczbie pojedynczej; powinno być „*temperatury*”.
- Str. 64 „*włókien [...] poliwinylowych alkoholu PVA*” – niefortunne sformułowanie. Powinno być raczej „*włókien z alkoholu poliwinylowego PVA*”. Chodzi o poli(alkohol winylowy) PVA z ang. *polyvinyl alcohol*.

W rozprawie występują stosunkowo nieliczne błędy edytorskie. Poniżej wymieniam niektóre z nich dostrzeżone podczas lektury pracy:

- Str. 63, „*muszę ugruntować tego materiału*,”
- Str. 65, „*zbrojeniem wytrzymałości stal B600B*,”
- Str. 83 i następne, „*W skutek*” – błędna forma,
- St. 126, „*w każdej z grupa badawczych*,”
- Str. 136 „*eksperymentalnych z stanem*,”
- Str. 142 pozycja literatury [34] jest niekompletna.

Wymienione powyżej niedostatki i kwestie dyskusyjne nie zmieniają mojej wysokiej oceny rozprawy. Treść rozprawy w pełni potwierdza zdobyte kompetencje oraz profesjonalizm i dojrzałość naukową Doktoranta.

4. Podsumowanie

Po zapoznaniu się z recenzowaną rozprawą stwierdzam, że jej treść jest zgodna z tytułem, a przyjęty układ i sposób przedstawienia treści jest logiczny i spójny oraz właściwy dla rozpraw doktorskich. Praca napisana jest zasadniczo poprawną polszczyzną, została zilustrowana odpowiednią liczbą rysunków i tabel, a jej szata graficzna nie budzi zastrzeżeń. Dobór pozycji bibliograficznych jest aktualny, kompletny i adekwatny.

Oceniając wartość naukową rozprawy stwierdzam, że zrealizowane przez Doktoranta własne badania doświadczalne i teoretyczne zostały zaplanowane właściwie, ze względu na założone cele i przedstawiony problem naukowy. Metodyka zrealizowanych badań nie budzi zastrzeżeń, a badania zostały bardzo dobrze i starannie opisane i udokumentowane. Uzyskane rezultaty Autor przedstawił w sposób adekwatny, spójny i czytelny. W mojej opinii przeprowadzona została poprawna interpretacja i krytyczna analiza uzyskanych rezultatów a na tej podstawie sformułowane zostały prawidłowe i cenne wnioski.

5. Konkluzja kwalifikacyjna

W świetle przedstawionej powyżej oceny stwierdzam, że przedstawiona do recenzji rozprawa doktorska mgr inż. Pawła Majkowskiego pt. „Badanie elementów betonowych z zbrojeniem stalowym i kompozytowym wysokich wytrzymałości pod obciążeniem statycznym i dynamicznym” stanowi, w moim przekonaniu, interesujące, sumienne i cenne osiągnięcie naukowe o potencjale aplikacyjnym i wdrożeniowym oraz twórczy i oryginalny wkład w rozwój wiedzy w dyscyplinie Inżynieria lądowa, geodezja i transport. Stwierdzam, że **Autor określił problem naukowy i przedstawił jego oryginalne rozwiązanie. Doktorant wykazał się ogólną wiedzą teoretyczną w dyscyplinie Inżynieria lądowa, geodezja i transport oraz umiejętnością samodzielnego prowadzenia pracy naukowej.**

Podsumowując, stwierdzam, że wymagania ustawy z dnia 20 lipca 2018 roku – Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce, stawiane rozprawom doktorskim są spełnione na wysokim poziomie i wnioskuję o dopuszczenie mgr inż. Pawła Majkowskiego do dalszych etapów postępowania doktorskiego. Jednocześnie, ze względu na wybitne walory merytoryczne, oryginalność, bardzo staranne opracowanie, aktualność tematyki, duży potencjał aplikacyjny i wdrożeniowy oraz istotny wkład w rozwój dyscypliny **wnioskuję o wyróżnienie** tej rozprawy doktorskiej.

Jadwiga Fangrat