

Prof. dr hab. inż. **Tomasz SIWOWSKI**
Politechnika Rzeszowska
Wydział Budownictwa, Inżynierii Środowiska i Architektury
Katedra Dróg i Mostów
35-959 Rzeszów, ul. Poznańska 2
e-mail: siwowski@prz.edu.pl

Regiście
DZIEKAN
Wydziału Inżynierii Lądowej
prof. dr hab. inż. Andrzej Garbacz

Rzeszów, 23.06.2023 r.

Recenzja rozprawy doktorskiej
mgr inż. Grzegorza Banasiaka
pt. „Wpływ modyfikacji składu prętów kompozytowych z włóknami bazaltowymi
na odporność na działanie alkaliów”

1. Przedmiot i podstawa formalna recenzji

Przedmiotem recenzji jest rozprawa doktorska mgr inż. Grzegorza Banasiaka pt. „**Wpływ modyfikacji składu prętów kompozytowych z włóknami bazaltowymi na odporność na działanie alkaliów**”, przygotowana na Wydziale Inżynierii Lądowej Politechniki Warszawskiej. Promotorem rozprawy doktorskiej był prof. dr hab. inż. Andrzej Garbacz, promotorem pomocniczym była dr inż. Maria Włodarczyk.

Recenzję wykonałam na podstawie następujących dokumentów:

- [1] Pismo Przewodniczącego Rady Naukowej Dyscypliny Inżynieria Lądowa, Geodezja i Transport Politechniki Warszawskiej dr. hab. inż. Konrada Lewczuka, prof. uczelni, z dnia 14.04.2023 r.
- [2] Umowa o dzieło na recenzję doktorską zawarta pomiędzy recenzentem a Dziekanem Wydziału Inżynierii Lądowej PW, prof. dr hab. inż. Andrzejem Garbaczem.
- [3] Rozprawa doktorska mgr inż. Grzegorza Banasiaka pt. „*Wpływ modyfikacji składu prętów kompozytowych z włóknami bazaltowymi na odporność na działanie alkaliów*”, Politechnika Warszawska, Warszawa, 2023 r.
- [4] Ustawa z dnia 3 lipca 2018 r. Przepisy wprowadzające ustawę – Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz. U. 2018 r. poz. 1669).
- [5] Ustawa z dnia 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 późniejszymi zmianami).
- [6] Rozporządzenia Ministra Nauki i Szkolnictwa Wyższego z dnia 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 r. poz. 261).
- [7] Rozporządzenie Ministra Edukacji i Nauki z dnia 27 października 2022 r. w sprawie dziedzin nauki i dyscyplin naukowych oraz dyscyplin artystycznych (Dz. U. 2022, poz. 2202).

Zgodnie z treścią ustaw [4] i [5] celem niniejszej recenzji jest ocena spełnienia przez rozprawę doktorską warunków określonych w art.13 ust.1 ustawy [5], a w szczególności odpowiedź na pytania:

- a) czy rozprawa stanowi oryginalne rozwiązanie problemu naukowego;
- b) czy rozprawa wykazała ogólną wiedzę teoretyczną kandydata w dyscyplinie „*inżynieria lądowa, geodezja i transport*”;

- c) czy rozprawa wykazała umiejętność samodzielnego prowadzenia pracy naukowej przez kandydata.

Zgodnie z rozporządzeniem [6] niniejsza recenzja zawiera szczegółowo uzasadnioną ocenę spełniania przez rozprawę doktorską ww. warunków. Ponadto zgodnie z umową [2] recenzja została wykonana wg zasad określonych przez WIL PW i zawartych w §3 p.1 umowy [2].

2. Podstawowe dane o Kandydacie

Mgr inż. Grzegorz Banasiak (dalej – Kandydat) jest absolwentem Wydziału Inżynierii Lądowej Politechniki Warszawskiej, na którym w latach 2008 – 2014 odbył studia na kierunku „budownictwo” w specjalności „konstrukcje budowlane i inżynierskie”. Podczas studiów Kandydat otrzymywał stypendium Rektora dla najlepszych studentów za wyniki w nauce. Stopień magistra inżyniera Kandydat uzyskał w dniu 12.03.2014 roku, a za swoją pracę dyplomową magisterską uzyskał ocenę celującą oraz nagrodę Rektora za najlepszą pracę dyplomową. Równoległe ze studiami na Politechnice Warszawskiej Kandydat odbył studia w latach 2010 – 2014 na kierunku „ekonomia” w specjalności „analizy mikroekonomiczne” w Szkole Głównej Handlowej w Warszawie, uzyskując tytuł licencjata. Po zakończeniu studiów od marca 2014 roku Kandydat pracuje w firmie budowlanej PORR S.A., obecnie na stanowisku kierownika budowy.

Kandydat nie ubiegał się wcześniej o nadanie stopnia doktora.

3. Charakterystyka ogólna rozprawy

Przedmiotem rozprawy doktorskiej Kandydata [3] jest **zgodnie z jej tytułem** ustalenie na podstawie badań doświadczalnych wpływu modyfikacji składu prętów kompozytowych z włóknami bazaltowymi na ich odporność na działanie alkaliów. Rozprawa liczy 151 stron, podzielonych na 8 rozdziałów, a także spis najważniejszych symboli, streszczenia w języku polskim i angielskim oraz bibliografię i spis rysunków i tabel. Rozprawa zawiera 82 rysunki, 27 tabel, a bibliografia obejmuje 109 pozycji.

Rozprawa ma charakter **raportu z doświadczalnych badań naukowych** i zawiera w swojej zasadniczej części informacje o: materiale i metodach badawczych (rozdział 5), wynikach badań doświadczalnych (rozdział 6) oraz analizie tych wyników (rozdział 7). Zasadnicza część rozprawy została poprzedzona wprowadzeniem (rozdział 1), ogólną charakterystyką prętów kompozytowych (rozdział 2) ze szczególnym uwzględnieniem prętów z włóknami bazaltowymi (rozdział 3) a także opisem stanu wiedzy nt. trwałości prętów kompozytowych (rozdział 4). Całość rozprawy kończy podsumowanie, zawierające także wnioski końcowe (rozdział 8).

Układ rozprawy, zarówno od strony formalnej, jak również merytorycznej, jest poprawny. Kandydat prawidłowo rozpoczął rozprawę od przeglądu stanu wiedzy nt. głównego przedmiotu jego prac badawczych, tj. prętów kompozytowych, w szczególności z włóknami bazaltowymi, a następnie przedstawił przegląd stanu wiedzy w zakresie trwałości tych prętów, zwracając szczególną uwagę na tytułową odporność na działanie alkaliów. Na bazie wniosków uzyskanych z przeglądu stanu wiedzy Kandydat zaplanował własne badania doświadczalne, przedstawiając je w kolejnych rozdziałach rozprawy w standardowy sposób, opisując kolejno: materiały i metody badawcze, wyniki badań własnych, analizę tych wyników oraz wnioski końcowe z wykonanych badań, zakończone podsumowaniem rozprawy. To jest standardowy

układ raportów z doświadczalnych badań naukowych, który Kandydat właściwie zaadoptował w rozprawie doktorskiej.

Piśmiennictwo wykorzystane przez Kandydata w rozprawie zawiera łącznie 109 pozycji, z czego większość stanowią monografie i artykuły w czasopismach naukowych i materiałach konferencyjnych. W spisie piśmiennictwa wymieniono również 10 norm (głównie amerykańskich) oraz 6 stron internetowych, cytowanych w przeglądzie stanu wiedzy. Wśród cytowanego piśmiennictwa są tylko dwie współautorskie prace Kandydata (z promotorem). Oceniając ogólnie wykorzystane przez Kandydata piśmiennictwo można stwierdzić, że zostało ono dobrane prawidłowo, w liczbie adekwatnej do celu naukowego rozprawy, i zostało wykorzystane efektywnie zwłaszcza w części rozprawy zawierającej przegląd stanu wiedzy, a także w rozdziałach opisujących zastosowane przez Kandydata metody doświadczalne. Kandydat rzetelnie zebrał i przeanalizował wiedzę z większości zagranicznych i krajowych publikacji w zakresie przedmiotu rozprawy oraz norm, zawierających stosowne procedury badawcze. Pewnym mankamentem jest fakt, że zasadnicze piśmiennictwo (zdecydowana większość) pochodzi sprzed 2019 r., co może powodować, że np. wnioski z przeglądu stanu wiedzy i/lub normowe metody badawcze będą częściowo nieaktualne.

4. Ogólna ocena merytoryczna rozprawy

4.1. Geneza i zasadność podjęcia tematu

Ze względu na swoje doskonałe własności mechaniczne oraz trwałość pręty kompozytowe FRP (ang. *fibre reinforced polymer*) są obecnie obiecującą alternatywą dla tradycyjnego zbrojenia stalowego betonowych konstrukcji budowlanych. W zależności od rodzaju włókien zastosowanych do produkcji kompozytu wyróżnia się pręty z włókien szklanych GFRP, węglowych CFRP, aramidowych AFRP oraz bazaltowych BFRP. Matrycę kompozytów w przypadku tych prętów stanowią najczęściej żywice: poliestrowa, winyloestrowa lub epoksydowa. Ze względu na różną budowę ww. kompozytów FRP wykonane z nich pręty różnią się między sobą własnościami mechanicznymi oraz trwałością. Obecnie najszersze zastosowanie w budownictwie mają pręty kompozytowe z włókien szklanych GFRP, głównie ze względu na najlepszą relację wytrzymałości doraźnej do ceny prętów. Jednakże do głównych wad prętów GFRP zalicza się m.in. 3-krotnie niższy od stali moduł sprężystości oraz wrażliwość włókien szklanych na działanie środowiska alkalicznego betonu. Pewną poprawę obu parametrów oferują pręty bazaltowe BFRP przy zachowaniu akceptowalnych na rynku kosztów tych prętów.

Obecnie trwają szerokie poszukiwania **możliwości dalszej poprawy kluczowych parametrów, ograniczających szersze stosowanie prętów kompozytowych**, w tym prętów BFRP. Dwa **główne kierunki** tych poszukiwań to:

- a) hybrydyzacja, tj. stosowanie w prętach kompozytowych jednocześnie różnych włókien, mająca na celu głównie zwiększenie modułu sprężystości kompozytu;
- b) zastosowanie nanomateriałów (nanodomieszek) dodawanych do żywicy, zwieszających przyczepność prętów do betonu oraz ich odporność na agresywne środowisko.

Warunkiem uzyskania skutecznych rozwiązań materiałowych w obu przypadkach jest utrzymanie ceny prętów kompozytowych FRP na akceptowalnym rynkowo poziomie, co ma zasadnicze znaczenie w praktycznym wykorzystaniu w budownictwie prętów powstałych w wyniku ww. modyfikacji kompozytów.

Na tym tle badania naukowe będące przedmiotem rozprawy doktorskiej Kandydata **doskonale wpisują się zarówno w trendy naukowe jak i potrzeby rynkowe** we współczesnym budownictwie. Jako przedmiot rozprawy wybrał Kandydat bowiem pręty z włóknami bazaltowymi BFRP, a przeprowadzone przez niego prace badawcze miały na celu redukcję głównych ograniczeń prętów BFRP zarówno przez hybrydyzację (zastosowanie łącznie włókien bazaltowych i węglowych) jak również przez zastosowanie nanokrzemionki dodanej do żywicy epoksydowej. Dlatego podjęcie przez Kandydata w rozprawie doktorskiej badań naukowych nad prętami hybrydowymi (wg oznaczenia w rozprawie - nHFRP) uważam za szczególnie uzasadnione i potrzebne. Należy także nadmienić, że rozprawa doktorska Kandydata jest jednym z efektów szerokiego programu badawczego nad prętami kompozytowymi typu nHFRP, prowadzonego na Politechnice Warszawskiej przez zespół pod kierunkiem prof. Andrzeja Garbacza i finansowanego z różnych konkursowych projektów naukowo – badawczych (grantów).

4.2. Cele rozprawy

Głównym celem rozprawy doktorskiej i będących jej podstawą badań naukowych było **ustalenie wpływu modyfikacji składu prętów kompozytowych BFRP na ich odporność na działanie alkaliów**. Kandydat założył modyfikację składu prętów kompozytowych BFRP poprzez:

- a) hybrydyzację, tj. substytucję części włókien bazaltowych (zbrojenia kompozytu) włóknami węglowymi o wyższej wytrzymałości i module sprężystości;
- b) dodanie nanokrzemionki do żywicy epoksydowej (matrycy kompozytu) w celu poprawy odporności prętów na działanie alkaliów (tj. środowiska betonu).

Celem badań było ustalenie ilościowe i jakościowe indywidualnego wpływu każdej z ww. modyfikacji, a także sprawdzenie ewentualnej synergii (tj. łącznego wpływu) obu modyfikacji.

W świetle przedstawionej genezy i zasadności podjęcia tematu (p.4.1) tak postawiony cel rozprawy jest oczywiście jak najbardziej **adekwatny i uzasadniony**. Jednakże pewną wątpliwość budzi wybór pierwszego sposobu modyfikacji składu prętów w kontekście oczekiwanego efektu jej zastosowania, tj. zwiększenia odporności prętów na działanie alkaliów. Hybrydyzacja (substytucja części włókien) tylko pośrednio i w niewielkim stopniu może wpływać na trwałość prętów, za którą w decydującym stopniu odpowiada żywica (matryca). Hybrydyzacja poprawia bowiem własności mechaniczne prętów, lecz za ich stałą i niezmienną w czasie wartość w alkalicznym środowisku betonu odpowiada głównie żywica. Pewien wpływ hybrydyzacja ma na tzw. trwałość zmęczeniową, lecz nie ona jest przedmiotem rozprawy. Natomiast w pełni uzasadniony jest wybór drugiej z modyfikacji składu kompozytu BFRP, w założeniu mający poprawić odporność matrycy na alkaliczne środowisko betonu. Niezależnie od wyżej sformułowanej wątpliwości formalnej cel naukowy rozprawy **jest istotny i ważny** z punktu widzenia upowszechnienia zastosowania prętów kompozytowych FRP w budownictwie.

4.3. Przegląd stanu wiedzy

Przegląd stanu wiedzy w przedmiocie rozprawy jest zawarty w rozdziałach 2, 3 i 4 i stanowi ok. 40% jej treści. Obejmuje on ogólną charakterystyką prętów kompozytowych (rozdział 2), szczególną charakterystykę prętów z włóknami bazaltowymi BFRP (rozdział 3), a także podsumowanie stanu wiedzy nt. trwałości prętów kompozytowych (rozdział 4). Przegląd obejmuje krajowe (nieliczne) i zagraniczne prace naukowe z lat 1995 - 2019. W rozprawie brak

jest podsumowania przeglądu, zawierającego chociażby uzasadnienie przyjętych kierunków badań własnych Kandydata.

Przeгляд zawiera bardzo dużo różnych informacji, lecz ich układ jest trochę chaotyczny, co utrudnia wykorzystanie zebranych w przeglądzie informacji w ocenie prac własnych Kandydata. Np. rozdział 3, który zgodnie z tytułem powinien dotyczyć prętów bazaltowych, zawiera także ogólne informacje nt. wszystkich prętów kompozytowych (p.3.1), a także ogólne informacje nt. nanododatków (p.3.1), hybrydyzacji (p.3.2) oraz standaryzacji badań prętów (p.3.3). Najmniej jest w tym rozdziale informacji nt. prętów bazaltowych, będących przedmiotem rozprawy. Podobnie w rozdziale 5 informacje związane z trwałością włókien, żywicy i prętów kompozytowych tylko w bardzo małym stopniu dotyczą włókien bazaltowych i/lub prętów BFRP (por. tabele 2, 3 i 5). Bardzo dobrze opracowana przez Kandydata tabela 5 (s.63 – 64 w rozprawie), zawierająca podsumowanie 16 publikacji z badań trwałościowych z lat 1995 – 2012, zawiera tylko jedną (!!!) pozycję dotyczącą prętów BFRP (poz. [86] w rozprawie) oraz tylko jedną pozycję dotyczącą kompozytu modyfikowanego nanododatkami (poz. [24] w rozprawie). Zapewne przyczyną tego stanu rzeczy jest fakt, że tabela nie zawiera przeglądu dość licznych już publikacji, które ukazały się w kolejnych dziesięciu latach (2012 - 2022) i dotyczą badań prętów bazaltowych¹, hybrydyzacji prętów kompozytowych² lub zastosowania nanododatków³ w ich składzie.

Brak podsumowania przeglądu wiedzy oraz dość niewielu informacji w nim zawartych nt. bezpośredniego przedmiotu rozprawy, **nasuwają następujące pytania** (do p.5.1.1 rozprawy):

- a) dlaczego Kandydat jako przedmiot swoich badań wybrał pręty bazaltowe BFRP o matrycy z żywicy epoksydowej;
- b) na jakiej podstawie Kandydat przyjął taki a nie inny sposób hybrydyzacji (rodzaj włókien, proporcja ilości włókien, układ włókien w przekroju);
- c) na jakiej podstawie Kandydat przyjął taki a nie inny nanomateriał do modyfikacji żywicy epoksydowej oraz jego ilość w składzie kompozytu.

4.4. Zastosowane metody badawcze

Badania doświadczalne przeprowadzone przez Kandydata w ramach rozprawy doktorskiej zostały wykonane na trzech rodzajach prętów kompozytowych o średnicy nominalnej 8 mm: prętach bazaltowych BFRP, prętach hybrydowych HFRP (75% bazalt, 25% węgiel) oraz prętach modyfikowanych nanokrzemionką nHFRP (3% nanokrzemionki).

Badania zostały przeprowadzone **wg procedur zawartych w amerykańskiej normie ACI** (poz. [15] w rozprawie) i obejmowały:

- a) wyznaczenie / sprawdzenie cech geometrycznych i masy badanych prętów;
- b) badanie wytrzymałości na rozciąganie prętów przed sezonowaniem (próbki kontrolne);
- c) badania wytrzymałości na ścinanie prętów przed sezonowaniem (próbki kontrolne);
- d) badanie wytrzymałości na rozciąganie prętów po sezonowaniu wg trzech procedur A, B i C wg normy ACI;
- e) badania wytrzymałości na ścinanie prętów po sezonowaniu wg procedury A wg normy ACI.

¹ Sagar, B., & Sivakumar, M. V. N. (2021). Performance evaluation of basalt fibre-reinforced polymer rebars in structural concrete members—a review. *Innovative Infrastructure Solutions*, 6, 1-18.

² Mirdarsoltany, M., Abed, F., Homayoonmehr, R., & Alavi Nezhad Khalil Abad, S. V. (2022). A **comprehensive review** of the effects of different simulated environmental conditions and hybridization processes on the mechanical behavior of different FRP bars. *Sustainability*, 14(14), 8834.

³ Rudenko, A., Biryukov, A., Kerzhentsev, O., Fediuk, R., Vatin, N., Vasilev, Y., ... & Szlag, M. (2021). Nano- and micro-modification of building reinforcing bars of various types. *Crystals*, 11(4), 323.

Procedury sezonowania prętów A, B i C wg normy ACI różnią się środowiskiem, w którym jest umieszczony pręt (roztwór, beton) oraz stopniem wstępnego odkształcenia pręta (0, 0,2%). We wszystkich procedurach A, B i C wg normy ACI sezonowanie prętów powinno odbywać się przez okres 6 miesięcy w temperaturze 60°C. Wyznaczenie odporności prętów na alkalia polega na wyznaczeniu zmiany masy i/lub wytrzymałości na rozciąganie prętów przed i po sezonowaniu (wg adekwatnej procedury A, B i C).

W przypadku procedury A Kandydat uzupełnił badania w stosunku do normy ACI poprzez dodatkowe porównanie zmiany wytrzymałości na ścinanie prętów (dodatkowa ocena matrycy). W przypadku procedur B i C Kandydat **zmodyfikował (w stosunku do wymagań normy ACI) zarówno harmonogram i warunki sezonowania próbek jak również stanowisko badawcze i metodę badań**. Kandydat opracował i wykonał własne stanowisko badawcze dla procedur B i C w celu optymalizacji czasu i kosztów badania. Podstawowym odstępstwem od wymagań normy ACI była rezygnacja z uwzględnienia wpływu temperatury środowiska na odporność prętów na alkalia. Sezonowanie i badania wg procedur B i C Kandydat przeprowadził w temperaturze pokojowej 20°C, zamiast w wymaganej temperaturze 60°C. Ponadto Kandydat skrócił badania prętów wg procedury B z 6 do 3 miesięcy. Obie zmiany procedur normowych wg ACI Kandydat tłumaczy **koniecznością optymalizacji czasu i kosztów badań**.

W opisie metod badawczych brakuje wyjaśnienia sensu fizycznego różnic poszczególnych procedur (A, B i C) badań odporności na alkalia. Są to zapewne: wpływ pełzania (procedura A vs. procedury B i C) oraz wpływ środowiska symulowanego roztworem vs. środowisko rzeczywiste betonu (procedura A i B vs. procedura C). Ponadto szerszego komentarza wymagała także rezygnacja przez Kandydata z uwzględnienia wpływu temperatury środowiska 60°C na odporność prętów na alkalia w przypadku procedur B i C – jaki to miało wpływ na końcową ocenę odporności prętów.

4.5. Wyniki badań i ich analiza

Rozdział 6 zawiera wyniki przeprowadzonych przez Kandydata badań doświadczalnych w zakresie odporności na alkalia. Wyniki zostały podane w rozprawie w postaci wykresów „siła – przemieszczenie” dla wybranych próbek danej serii, w postaci tabelarycznych zestawień zawierających wyznaczone wytrzymałości na rozciąganie i ścinanie wraz z odchyleniami standardowymi i współczynnikami zmienności dla poszczególnych serii oraz w postaci przykładowych zdjęć zniszczenia próbek w poszczególnych seriach badań. Wyniki zestawiono kolejno dla prętów BFRP, HFRP oraz nHFRP. Za wyjątkiem wyników dla prętów BFRP Kandydat nie opatrzył pozostałych wykresów ani zdjęć żadnym komentarzem, co utrudnia identyfikację powodu, dla którego dany wykres i/lub zdjęcie znalazło się w rozprawie. Ze względów formalnych w rozdziale 6 powinny znajdować się także wyniki badań wytrzymałościowych badań próbek kontrolnych, które znajdują się w rozdziale wcześniejszym (p. 5.1.3 w rozprawie).

W rozdziale 7 zawarta jest przeprowadzona przez Kandydata analiza otrzymanych wyników badań doświadczalnych. **Jest to najważniejsza część rozprawy, zawierające jej oryginalne osiągnięcia**. Kandydat na wykresach zależności wytrzymałości od okresu sezonowania próbek pokazał bezwzględną (w MPa) i względną (w %) zmianę wytrzymałości na rozciąganie oraz wytrzymałości na ścinanie prętów kompozytowych BFRP, HFRP i nHFRP dla trzech procedur sezonowania (A, B i C). Analizę wytrzymałości na rozciąganie prętów BFRP uzupełniono dodatkowo przez porównanie z wynikami podobnych badań zaczerpniętych z piśmiennictwa (rys.78 w rozprawie).

Bardzo ważne z punktu widzenia realizacji głównego celu jest **porównanie na jednym wykresie spadku masy i wytrzymałości na rozciąganie** prętów BFRP, HFRP i nHFRP dla trzech procedur sezonowania (A, B i C). Niestety Kandydat zamieścił w rozprawie takie porównanie tylko dla spadku masy i wyłącznie w procedurze A (rys. 81 w rozprawie), nie podając jednak ani procedury badawczej ani wyników pomiarów tego parametru. Brak podobnych wykresów dla procedur B i C (jeżeli takie badania były robione). Największym jednak ograniczeniem analizy jest **brak analogicznych wykresów dla wytrzymałości na rozciąganie prętów BFRP, HFRP i nHFRP, sporządzonych kolejno dla procedur A, B i C**. Dane do takich wykresów znajdują się w tabelach w rozdziale 6. Wykres taki Kandydat sporządził dla wytrzymałości na ścinanie (rys. 82 w rozprawie), aczkolwiek niepotrzebnie użył formy 3D; wykres 2D – jak poprzednie w rozprawie, byłby bardziej czytelny.

Opisy zamieszczone w rozdziale 7 są w dużej części powtórzeniem informacji pokazanych na wykresach (łącznie z liczbami), a nie ich twórczą interpretacją i analizą, jak wskazuje tytuł rozdziału. Główne pytania, **na jakie zabrakło w rozprawie odpowiedzi** po analizie rys. 77, 79 i 80 są następujące:

- czy wpływ temperatury (procedura A) jest główną przyczyną znacznie większej redukcji wytrzymałości na rozciąganie prętów BFRP, HFRP i nHFRP w środowisku alkalicznym?
- czy wpływ pełzania (procedura B i C) powstrzymuje redukcję wytrzymałości na rozciąganie prętów BFRP, HFRP i nHFRP w środowisku alkalicznym?
- środowiska B i C w praktyce nie różnią się pod względem redukcji wytrzymałości na rozciąganie dla prętów HFRP i nHFRP; skąd zatem anomalie w analogicznym wykresie dla prętów BFRP (np. wzrost wytrzymałości po 1 i 2 miesiącu w procedurze B)?
- która z procedur (A, B i C) w sposób bardziej wiarygodny oddaje rzeczywistą redukcję wytrzymałości na rozciąganie prętów BFRP, HFRP i nHFRP w środowisku alkalicznym?

Jednakże kluczowa dla realizacji głównego celu rozprawy jest analiza porównawcza spadku masy i redukcji wytrzymałości na rozciąganie i ścinanie **łącznie dla prętów BFRP, HFRP i nHFRP** w poszczególnych środowiskach alkalicznych (A, B i C). W ten sposób najlepiej można pokazać ustalony na podstawie badań Kandydata wpływ zastosowanych modyfikacji składu na odporność prętów BFRP na działanie alkaliów. Tych wykresów w analizie zabrakło, zamiast tego Kandydat przeprowadził wybiórczą analizę opisową, bazując na danych w tabelach z wynikami poszczególnych badań. Można było z nich łatwo wygenerować tabelę jak niżej, pokazującą **ilościowy i jakościowy wpływ zastosowanych modyfikacji na parametry mechaniczne poszczególnych prętów**.

Procedura sezonowania (środowisko)	Rodzaj prętów		
	BFRP	HFRP	nHFRP
	Redukcja wytrzymałości na rozciąganie [%]		
A (6 m-cy, t=60°C)	63,3	67,0	40,8
B (6 m-cy, t=20°C)	86,3	87,1	94,2
C (3 m-ce, t=20°C)	99,1	94,4	98,3
	Redukcja wytrzymałości na ścinanie [%]		
A (6 m-cy, t=60°C)	19,2	65,4	29,5

Z analizy danych w tabeli wynika, że Kandydat wyciągnął prawidłowe (choć dość ograniczone) wnioski wynikające z badań. Brakuje jednak w rozprawie m.in. szerszej analizy wpływu temperatury (procedura A vs. B&C), pełzania (procedura A vs. B&C) oraz rzeczywistego środowiska prętów (procedury A&B vs. C) na uzyskane wyniki badań, zależne od zastosowanych modyfikacji składu kompozytu. Należy jednak przyznać, że w świetle

zrealizowanego programu badawczego oraz uzyskanych wyników badań **nie było to zadanie łatwe**. Świadoma rezygnacja z wpływu temperatury uzasadniona przez Kandydata m.in. możliwością przetestowania autorskiego urządzenia badawczego znacząco utrudniła rzetelną ocenę wpływu badanych modyfikacji z uwzględnieniem ww. czynników.

Dla porządku należy dodać, że w rozdziale 7 brakuje analizy wyników badań wytrzymałościowych próbek kontrolnych (bez wpływu sezonowania), która pokazałaby **wpływ przedmiotowych modyfikacji na główne parametry mechaniczne prętów BFRP** (wytrzymałość na rozciąganie, moduł sprężystości, wytrzymałość na ścinanie). Lakoniczne dane na ten temat znajdują się dopiero w podsumowaniu (s.131 w rozprawie) i potwierdzają spodziewane fakty, że hybrydyzacja zwiększa ok. 30% wartości parametrów mechanicznych prętów BFRP, a dodatek nanokrzemionki nie ma na nie praktycznie żadnego wpływu.

4.6. Podsumowanie rozprawy

Podsumowanie rozprawy zawiera powtórzenie wniosków ilościowych, sformułowanych przez Kandydata w rozdziale 7. Podsumowanie jest uzupełnione o sugerowane przez Kandydata kierunki dalszych badań. Wśród nich są: ocena wpływu stopnia substytucji na trwałość prętów HFRP, udoskonalenie procesu wzbogacania żywicy w nanododatki oraz analizy ekonomiczne i środowiskowe prętów BFRP i HFRP w cyklu życia (LCA). Dyskusyjne są wnioski podane w p. 7 i 8 podsumowania (s.133 w rozprawie). Kandydat podkreśla w nich korzyści płynące z zastosowania autorskiego urządzenia badawczego oraz zmodyfikowanego harmonogramu badań. Jednakże zdaniem recenzenta **pominięcie wpływu temperatury (urządzenie) oraz skrócenie badań w procedurze C (harmonogram) przyniosło więcej szkód niż pożytku dla końcowych efektów naukowych rozprawy**. Pomimo tego, w wyniku przeprowadzonych badań doświadczalnych Kandydat uzyskał efekty pozwalające na realizację głównego celu rozprawy, a stopień jego realizacji można uznać za **satysfakcjonujący**.

4.7. Informacje dotyczące praktycznego zastosowania uzyskanych wyników badań

Wyniki badań Kandydata są bezpośrednio związane z praktycznymi możliwościami zastosowań prętów kompozytowych w budownictwie. Stosowanie prętów kompozytowych stale rośnie, zwiększa się liczba podmiotów produkujących pręty w Polsce, zwiększa się wolumen sprzedaży prętów kompozytowych na polskim rynku budowlanym. Jednocześnie w ramach będącej na ukończeniu nowej edycji Eurokodów pojawi się wkrótce nowy Eurokod 2 do projektowania konstrukcji betonowych, zawierający aneks poświęcony projektowaniu elementów betonowych zbrojonych prętami kompozytowymi⁴. Ta sytuacja oraz powszechnie już znane zalety prętów kompozytowych na pewno spowodują upowszechnienie stosowania tego doskonałego materiału w polskim budownictwie.

Wyniki badań naukowych Kandydata **mogą mieć zatem praktyczne zastosowanie:**

- a) do opracowania współczynników redukcyjnych wpływu (temperatury, agresywnego środowiska itp.), niezbędnych do projektowania konstrukcji betonowych zbrojonych prętami kompozytowymi wg Eurokodu 2 (nowa edycja);
- b) jako *benchmark* dla kolejnych prób modyfikacji składu prętów kompozytowych (zarówno hybrydyzacja jak i nanododatki);
- c) jako *benchmark* dla szacowania kosztów prętów kompozytowych, w szczególności w cyklu życia budowli;

⁴ Draft prEN 1992-1-1. Eurocode 2: Design of concrete structures - Part 1-1: General rules - Rules for buildings, bridges and civil engineering structures. CEN, Brussels, September 2021.

- d) w celu upowszechnienia stosowania prętów bazaltowych BFRP (obecnie stosuje się głównie pręty GFRP oraz bardzo rzadko CFRP).

5. Uwagi krytyczne i dyskusyjne

Kilka uwag krytycznych podałem już w p. 4 recenzji, oceniając ogólnie zawartość merytoryczną rozprawy. Poniżej przedstawiłem zbiorczo te i kolejne **uwagi krytyczne i dyskusyjne oraz wątpliwości i pytania**, które sformułowałem po analizie rozprawy.

- 5.1 Na czym Kandydat opierał wstępne założenie, że hybrydyzacja w postaci substytucji 25% włókien bazaltowych włóknami węglowymi i/lub dodanie nanokrzemionki w ilości 3% do żywicy epoksydowej to dobry kierunek modyfikacji składu w celu zwiększenia odporność prętów BFRP na alkalia?
- 5.2 Czy w świetle niejednoznacznych wyników badań doświadczalnych zastosowana zmiana (uproszczenie) procedur normowych ACI (brak wpływu temperatury, skrócony harmonogram badań) była uzasadniona?
- 5.3 Czy Kandydat może na podstawie przeprowadzonych badań ocenić jakościowo i/lub ilościowo wpływ temperatury środowiska i pełzania na odporność prętów BFRP na alkalia?
- 5.4 Środowiska B i C w praktyce nie różnią się pod względem redukcji wytrzymałości na rozciąganie dla prętów HFRP i nHFRP; skąd zatem anomalie w analogicznym wykresie dla prętów BFRP (np. wzrost wytrzymałości po 1 i 2 miesiącu w procedurze B)?
- 5.5 Która z procedur (A, B i C) w sposób najbardziej wiarygodny oddaje rzeczywistą redukcję wytrzymałości na rozciąganie prętów BFRP, HFRP i nHFRP w środowisku alkalicznym?
- 5.6 Dlaczego do wszystkich badań zastosowano pręty o średnicy ϕ 8 mm? Czy dla prętów o większej średnicy (np. najczęściej stosowanych w infrastrukturze prętów ϕ 12 mm) wnioski Kandydata wyciągnięte na podstawie własnych badań naukowych są aktualne?
- 5.7 Zastosowana w badaniach nanokrzemionka okazała się mało efektywna. Czy zatem ten kierunek modyfikacji składu prętów w celu zwiększenia ich odporności na alkalia należy generalnie wykluczyć, czy istnieją inne nanododatki, które byłyby znacznie bardziej efektywne w tym celu?
- 5.8 Czy na podstawie badań Kandydata można (choćby w przybliżeniu) zaproponować tzw. współczynniki redukcyjne wpływu temperatury (C_t) i agresywnego środowiska (C_e), służące do projektowania konstrukcji betonowych zbrojonych prętami kompozytowymi (np. wg prEN 1992-1-1:2021)?
- 5.9 Kandydat jako wieloletni praktyk wie jak ważne są na budowie koszty, w tym koszty materiałów. O ile zastosowane przez Kandydata modyfikacje składu prętów zwiększają ich koszt w stosunku do prętów bazaltowych BFRP lub konwencjonalnych prętów szklanych GFRP? Czy zdaniem Kandydata ta różnica uzasadnia stosowanie zmodyfikowanych prętów hybrydowych nHFRP w budownictwie?
- 5.10 W jakich obszarach budownictwa Kandydat widzi najszersze zastosowanie zmodyfikowanych przez hybrydyzację i/lub nanododatki prętów bazaltowych BFRP?

6. Ocena strony formalnej i redakcji rozprawy

Układ rozprawy oceniłem w p.3 niniejszej recenzji i uznaję go jako poprawny zarówno od strony formalnej, jak również merytorycznej. Redakcja tekstu rozprawy jest także właściwa, na dobrym poziomie, bez większych błędów formalnych. Język rozprawy jest poprawny technicznie, spójny i zrozumiały.

Poniżej przedstawiłem **kilka najważniejszych uwag natury redakcyjnej**, jakie zauważałem oceniając tekst rozprawy:

- a) symbole oznaczające parametry wytrzymałościowe kompozytów należało przyjąć wg powszechnie stosowanych w budownictwie oznaczeń normowych (np. wg prEN 1992-1-1:2021);
- b) na wykresach z badań na ścinanie (rys. 29 – 31 oraz rys. 68 -70 w rozprawie) błędnie opisano osie, używając słowa „ściskanie” zamiast „ścinanie”;
- c) niektóre pozycje bibliografii są opisane niejednolicie (brak jednego stylu) i w sposób niepełny, bez podstawowych informacji bibliograficznych.

7. Ocena spełnienia przez rozprawę doktorską warunków określonych w art.13 ust.1 ustawy [5]

7.1. Ocena oryginalnego rozwiązania problemu naukowego

Oryginalnym rozwiązaniem problemu naukowego przez Kandydata jest **ilościowa i jakościowa ocena efektywności modyfikacji składu prętów kompozytowych z włókien bazaltowych pod kątem zwiększenia ich odporności na działanie alkaliów**. W szczególności do oryginalnych osiągnięć Kandydata zaliczam:

- a) zastosowanie oraz ilościową i jakościową ocenę hybrydyzacji jako metody poprawy parametrów mechanicznych oraz zwiększenia odporności prętów bazaltowych na alkalia;
- b) zastosowanie oraz ilościową i jakościową ocenę nanokrzemionki jako dodatku zwiększającego odporność prętów bazaltowych na alkalia;
- c) ilościową i jakościową ocenę efektu synergii dwóch różnych metod modyfikacji składu prętów kompozytowych, obejmujących zarówno zbrojenie kompozytu (hybrydyzacja) jak również jego matrycę (nanokrzemionka);
- d) próbę optymalizacji czasowej i kosztowej standardowych procedur badawczych w zakresie odporności prętów kompozytowych na alkalia przez zaprojektowanie, wykonanie i wykorzystanie do badań autorskiego stanowiska badawczego;
- e) wybór prętów bazaltowych BFRP jako przedmiotu rozprawy i własnych badań naukowych; pręty BFRP są jeszcze praktycznie niestosowane w Polsce, pomimo że mają najlepszy stosunek jakości (m.in. parametrów mechanicznych, trwałości itp.) do ceny spośród dostępnych na rynku prętów kompozytowych.

Kandydat rozwiązał postawiony w rozprawie problem naukowy za pomocą indywidualnie dobranych laboratoryjnych badań doświadczalnych, obejmujących badania identyfikacyjne (geometria, masa), badania materiałowe parametrów mechanicznych (wytrzymałości, moduł) oraz badania trwałościowe (odporność na alkalia) wg trzech różnych procedur badawczych, częściowo zmodyfikowanych przez Kandydata.

Zarówno podjęta przez Kandydata tematyka badawcza jak również opracowany przez niego indywidualny program własnych badań doświadczalnych cechują się wysokim stopniem oryginalności, w szczególności w warunkach krajowych, gdzie zarówno tematykę jak i przyjętą

metodologię badań można uznać za pionierskie. Dlatego jednoznacznie stwierdzam, że rozprawa Kandydata stanowi **oryginalne rozwiązanie problemu naukowego**, przez co **spełnia warunek określony w art.13 ust.1 ustawy [5]**.

7.2. Ocena ogólnej wiedzy teoretycznej Kandydata w dyscyplinie „inżynieria lądowa, geodezja i transport”

Analiza treści rozprawy pozwala ocenić ogólną wiedzę teoretyczną Kandydata w przedmiotowej dyscyplinie (tutaj: inżynieria lądowa) jako **wystarczającą i satysfakcjonującą w świetle wymagań ustawowych**. W szczególności Kandydat wykazał się dobrą wiedzą w zakresie kompozytów polimerowych, będących nowym i innowacyjnym materiałem budowlanym. Materiał ten jest stosowany w budownictwie najpowszechniej w formie prętów do zbrojenia betonu i to właśnie zastosowanie kompozytów FRP w budownictwie jest obszarem wiedzy eksperckiej Kandydata. Kandydat nie tylko zna cechy, zalety i wady tego nowego materiału, a także obszary jego zastosowań w budownictwie, lecz potrafi także je profesjonalnie badać oraz prawidłowo wskazać kierunki rozwoju zastosowań prętów kompozytowych z uwzględnieniem aspektów ekonomicznych i środowiskowych w cyklu życia (LCA).

Wiedza ogólna Kandydata nie ogranicza się jedynie do inżynierii lądowej, ale obejmuje szeroko także **dyscyplinę inżynierii materiałowej**, pozwalając Kandydatowi prowadzić badania naukowe dotyczące modyfikacji cech materiałowych finalnego produktu budowlanego. Interdyscyplinarność wiedzy ogólnej Kandydata widoczna jest także w jego dobrym przygotowaniu do prowadzenia badań naukowych w obszarze trwałości materiałów budowlanych, co wymaga pewnych kompetencji w **dyscyplinie inżynieria chemiczna**. Kandydat dobrze zaplanował i przeprowadził badania odporności na alkalia kompozytów FRP, co wymagało od niego pracy z roztworami chemicznymi i oceny skutków działania tych roztworów na przedmiotowy materiał budowlany. Elementy wiedzy Kandydata z inżynierii chemicznej widoczne są także w przeglądzie piśmiennictwa nt. trwałości (rozdział 4), gdzie profesjonalnie zostały przedstawione aspekty korozji stali i kompozytu FRP. Ta interdyscyplinarność wiedzy Kandydata jest w dzisiejszym czasie bardzo pożądana, gdyż rozwój współczesnej inżynierii lądowej jest napędzany w równym stopniu osiągnięciami inżynierii materiałowej i chemicznej, jak tworzeniem nowych rozwiązań konstrukcyjnych.

Współczesna inżynieria lądowa stała się już dawno nauką interdyscyplinarną, a rozprawa Kandydata dokładnie pokazuje zasadność tego stwierdzenia. Kandydat w rozprawie wykorzystał wiedzę ogólną z trzech dyscyplin z dziedziny nauk inżynieryjno-technicznych, efektywnie i skutecznie łącząc ją dla realizacji głównego celu rozprawy. Dlatego jednoznacznie stwierdzam, że rozprawa **wykazała ogólną wiedzę teoretyczną** Kandydata w dyscyplinie „inżynieria lądowa, geodezja i transport”, przez co **spełnia ona warunek określony w art.13 ust.1 ustawy [5]**.

7.3. Ocena umiejętności samodzielnego prowadzenia pracy naukowej przez Kandydata

Rozprawa doktorska Kandydata powstała **pod opieką dwóch doświadczonych pracowników naukowych, pełniących role promotora i promotora pomocniczego**. Zwłaszcza rola promotora, prof. dr hab. inż. Andrzeja Garbacza, który jest inicjatorem i głównym realizatorem prac naukowych WIL PW w zakresie zastosowania prętów hybrydowych w budownictwie, jest nie do przecenienia. Trudno zatem mówić o pełnej samodzielności prowadzenia pracy naukowej przez Kandydata. Bez wątplenia przedmiot rozprawy (pomysł), elementy jej oryginalności, program badań oraz wnioski końcowe powstały

przy dużym zaangażowaniu promotora. Ponadto Kandydat, nie będąc etatowym pracownikiem jednostki naukowej, w której realizowano badania, musiał bez wątpienia korzystać ze wsparcia chociażby personelu laboratorium badawczego. Z drugiej jednak strony, fakt ten zmusił Kandydata do większej samodzielności w pracy naukowej, zwłaszcza na etapie planowania badań (w oparciu o zagraniczne procedury normowe), obróbki wyników i analizy wniosków z badań.

Niezależnie jednak od zaangażowania promotorów i personelu badawczego WIL PW przy realizacji badań, Kandydat skutecznie finalizując rozprawę **potwierdził nabycie stosownych kompetencji do samodzielnego prowadzenia pracy naukowej**. Kompetencje te można określić następująco:

- a) zdolność do krytycznego przeglądu istniejącej wiedzy, zawartej w źródłach krajowych i zagranicznych, w celu identyfikacji podstawowych problemów badawczych i opracowania planu badań doświadczalnych;
- b) zdolność do planowania badań doświadczalnych (materiałowych, wytrzymałościowych, trwałościowych) w oparciu o procedury normowe, w tym zagraniczne;
- c) umiejętność modyfikacji procedur normowych w zakresie badań doświadczalnych i dostosowania ich do ograniczeń czasowych i ekonomicznych;
- d) umiejętność obróbki wyników badań doświadczalnych, analizy tych wyników oraz wyciągania poprawnych wniosków;
- e) umiejętność wizualizacji wyników badań doświadczalnych i ich analiz (na poziomie podstawowym);
- f) umiejętność wyznaczania kierunków dalszych badań.

Ww. kompetencje nabyte przez Kandydata, niezależnie od tego, czy zostaną przez niego wykorzystane w przyszłości, potwierdzają **umiejętność samodzielnego prowadzenia przez niego pracy naukowej**, przez co **spełniony jest warunek określony w art.13 ust.1 ustawy [5]**.

8. Podsumowanie i wniosek końcowy

Rozprawa doktorska mgr inż. Grzegorza Banasiaka stanowi **oryginalne rozwiązanie problemu naukowego**, jakim jest ocena efektywności modyfikacji składu prętów kompozytowych pod kątem zwiększenia ich trwałości. W wyniku opisanych w rozprawie prac naukowych Kandydat ocenił ilościowo i jakościowo efektywność hybrydyzacji oraz dodatku nanokrzemionki w zastosowaniu do prętów bazaltowych w kontekście zwiększenia odporności prętów na działanie alkaliów. Kandydat rozwiązał problem naukowy metodami doświadczalnymi realizując samodzielnie opracowany program badań własnych, zawierający zarówno badania w zakresie inżynierii lądowej, jak również inżynierii materiałowej i chemicznej.

Kandydat wykorzystał w rozprawie wiedzę z trzech dyscyplin z dziedziny nauk inżyniersko-technicznych, efektywnie i skutecznie łącząc ją dla realizacji celów rozprawy, przez co **wykazal ogólną wiedzę teoretyczną w dyscyplinie „inżynieria lądowa, geodezja i transport”**. Podczas realizacji rozprawy Kandydat nabył także odpowiednie kompetencje badawcze, które **potwierdzają umiejętność samodzielnego prowadzenia przez niego pracy naukowej**. Jednocześnie ze względu na rosnące zapotrzebowanie na projektowanie i budowę konstrukcji betonowych ze zbrojeniem FRP, zwłaszcza w obszarze infrastruktury drogowej, wyniki pracy naukowej Kandydata **mają znaczenie praktyczne**.

Reasumując mogę jednoznacznie stwierdzić, że oczywiste walory poznawcze rozprawy, oryginalne rozwiązanie postawionego problemu metodami doświadczalnymi, a także wykazana w pracy ogólna wiedza teoretyczna i umiejętność samodzielnego prowadzenia pracy naukowej przez Kandydata, upoważniają mnie do stwierdzenia, że rozprawa doktorska mgr inż. Grzegorza Banasiaka pt. *„Wpływ modyfikacji składu prętów kompozytowych z włóknami bazaltowymi na odporność na działanie alkaliów”*, **spełnia wymogi stawiane rozprawom doktorskim** w „Ustawie o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki z dnia 14 marca 2003 r.” (Dz.U. Nr 65, poz. 595) oraz do postawienia wniosku o **przyjęcie rozprawy doktorskiej** mgr inż. Grzegorza Banasiaka **oraz o dopuszczenie jej do publicznej obrony.**



Tomasz Siwowski
Rzeszów, 23.06.2023 r.

