Szczecin, 21.08.2026

dr hab. inż. Paweł Sikora, prof. ZUT
Katedra Inżynierii Budowlanej i Komunikacyjnej
Wydział Budownictwa i Inżynierii Środowiska
Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny w Szczecinie
Al. Piastów 50a, 70-311 Szczecin
pawel.sikora@zut.edu.pl

Recenzja rozprawy doktorskiej

mgr. inż. Filipa Szmatuły

pt. „Wpływ wybranych materiałów z recyklingu odpadów na właściwości kompozytów cementowych"

wykonanej w Instytucie Budownictwa

Uniwersytetu Zielonogórskiego

pod kierunkiem dr. hab. inż. Jacka Korentza, prof. UZ

oraz dr. inż. Roberta Jurczaka (promotor pomocniczy)

Podstawę formalną opracowania recenzji stanowi pismo IBUD.51.0.4.2026 Przewodniczącej Rady Dyscypliny Inżynieria Lądowa, Geodezja i Transport Uniwersytetu Zielonogórskiego dr hab. inż. Beaty Nowogońskiej, prof. UZ z dnia 30.06.2026, wynikające z uchwały Senatu nr 304 z dnia 24.06.2026, powołującej mnie na recenzenta rozprawy doktorskiej p. mgr. inż. Filipa Szmatuły, w postępowaniu prowadzonym wg przepisów Ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce.

1. Charakterystyka rozprawy i uwagi ogólne

Recenzowana rozprawa doktorska poświęcona jest ocenie możliwości wykorzystania wybranych materiałów pochodzących z recyklingu odpadów przemysłowych i komunalnych jako składników kompozytów cementowych. Autor rozpatruje trzy obszary zastosowań: dodatki do cementu, zamienniki kruszywa drobnego i grubego oraz zbrojenie rozproszone. Badaniami objęto pięć grup materiałów odpadowych, to jest żużel pomiedziowy, stłuczkę szklaną, odpady gumowe SBR, odpady kompozytów szklanych z recyklingu łopat turbin wiatrowych oraz włókna węglowe pozyskane z tego samego źródła.

Rozprawa przygotowana została w formie zbioru ośmiu artykułów naukowych, uzupełnionego o obszerne omówienie własne. Całość liczy 149 stron formatu A4, przy czym część autorska, poprzedzająca załączniki, obejmuje 67 stron. Praca składa się z ośmiu rozdziałów, wykazu literatury, wykazów tabel i rysunków oraz załączników zawierających oświadczenia współautorów i pełne teksty publikacji wchodzących w skład cyklu. Do rozprawy dołączono streszczenia w języku polskim i angielskim.

W rozdziale pierwszym Autor przedstawia podstawę opracowania rozprawy wraz z zestawieniem publikacji tworzących cykl oraz szczegółowym opisem własnego wkładu w ich powstanie. Rozdział drugi zawiera genezę problemu badawczego, tezy, cele i zadania rozprawy oraz krótkie omówienie metodyki. Rozdział trzeci poświęcony jest stanowi wiedzy i podzielony został według głównych

składników betonu. Zasadniczą część pracy stanowią rozdziały czwarty, piąty i szósty, w których zaprezentowano/omówiono badania eksperymentalne odpowiadające trzem wyróżnionym obszarom zastosowań odpadów. Pracę zamykają wnioski oraz propozycje przyszłych badań. Część autorską zilustrowano 16 tabelami i 42 rysunkami, w większości przygotowanymi samodzielnie, a wykaz literatury obejmuje 24 pozycje.

Rozprawa doktorska została przygotowana, zgodnie z art. 187 ust. 3 ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. – Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (t.j. Dz. U. z 2024 r. poz. 1571, z późn. zm.), w formie zbioru ośmiu powiązanych tematycznie artykułów naukowych, opublikowanych w latach 2020-2025 zarówno w czasopismach krajowych, jak i w czasopismach zagranicznych posiadających współczynnik wpływu (IF). Są to następujące prace:

- [P1] Korentz, J.; Szmatuła, F. Wpływ dodatku miału gumowego SBR na właściwości zapraw cementowych, Materiały Budowlane 2020, nr 12, 12-15, doi: 10.15199/33.2020.12.02. Lista MEiN 20 pkt; IF: brak. Udział procentowy 60%.
- [P2] Korentz, J.; Jurczak, R.; Szmatuła, F. Właściwości betonu z dodatkiem kruszywa z żużla pomiedziowego, Cement Wapno Beton 2020, vol. 25, nr 5, 367-375, doi: 10.32047/CWB.2020.25.5.3. Lista MEiN 40 pkt. Udział procentowy 55%.
- [P3] Jurczak, R.; Szmatuła, F.; Rudnicki, T.; Korentz, J. Wpływ mielonego szkła z recyklingu na wytrzymałość i trwałość betonów o niskiej klasie wytrzymałości, Materiały Budowlane 2021, nr 11, 41-46, doi: 10.15199/33.2021.11.07. Lista MEiN 100 pkt; IF: brak. Udział procentowy 40%.
- [P4] Jurczak, R.; Szmatuła, F. Evaluation of the Possibility of Replacing Fly Ash with Glass Powder in Lower-Strength Concrete Mixes, Applied Sciences 2021, vol. 11, nr 1, 396, doi: 10.3390/app11010396. Lista MEiN 100 pkt; IF 2,838. Udział procentowy 50%.
- [P5] Jurczak, R.; Szmatuła, F.; Rudnicki, T.; Korentz, J. Effect of Ground Waste Glass Addition on the Strength and Durability of Low Strength Concrete Mixes, Materials 2021, vol. 14, nr 1, 190, doi: 10.3390/ma14010190. Lista MEiN 140 pkt; IF 3,748. Udział procentowy 40%.
- [P6] Korentz, J.; Szmatuła, F. Właściwości zapraw cementowych z dodatkiem rozdrobnionego GFRP z recyklingu łopat turbin wiatrowych, Materiały Budowlane 2023, nr 11, 32-35, doi: 10.15199/33.2023.11.07. Lista MEiN 140 pkt; IF: brak. Udział procentowy 70%.
- [P7] Szmatuła, F.; Korentz, J. Properties of FRC with Carbon Fibres from Recycled Wind Turbine Blades, Polymers 2025, vol. 17, nr 23, 3199, doi: 10.3390/polym17233199. Lista MEiN 100 pkt; IF 4,900. Udział procentowy 60%.
- [P8] Szmatuła, F. Ocena wpływu odpadów gumowych SBR na wybrane właściwości betonu cementowego, Materiały Budowlane 2025, vol. 640, nr 12, 1-7, doi: 10.15199/33.2025.12.01. Lista MEiN 100 pkt; IF: brak. Udział procentowy 100%.

Sumaryczny współczynnik wpływu zgodnie z rokiem opublikowania wynosi 11,486, a łączna punktacja według wykazu ministerialnego 740 punktów. Trzy prace opublikowano w czasopismach indeksowanych w bazie JCR, to jest w Applied Sciences, Materials oraz Polymers, pozostałe pięć w uznanych czasopismach krajowych, cztery w Materiałach Budowlanych i jedną w Cement Wapno Beton. Taki rozkład dorobku oceniam pozytywnie, ponieważ obok publikacji o zasięgu międzynarodowym Doktorant zadbał o upowszechnienie wyników w środowisku krajowym, dla którego mają one bezpośrednie znaczenie praktyczne.

Wkład Autora rozprawy w powstanie cyklu publikacyjnego uważam za wiodący. W ocenie tej znacząco pomogła Tabela 1, w której Doktorant zestawił swój udział w poszczególnych czynnościach składających się na przygotowanie każdej z prac. Z zestawienia tego wynika jednoznacznie, że ciężar

związany z opracowaniem koncepcji i założeń badawczych, projektowaniem metodyki, zbieraniem danych, ich analizą oraz interpretacją wyników spoczywał na Doktorancie, natomiast pozostali współautorzy, w tym Promotorzy, pełnili przede wszystkim rolę opiekunów naukowych i mentorów oraz zapewniali wsparcie techniczne na etapie realizacji badań i redakcji tekstów. Warto podkreślić, że w zakresie zbierania danych udział Doktoranta wynosi od 75% do 100%, a w zakresie projektowania metodyki od 75% do 100%, a więc dotyczy tych czynności, które w największym stopniu decydują o samodzielności badawczej.

Na wyróżnienie zasługuje praca [P8], którą Doktorant przygotował samodzielnie, jako jedyny autor. Potwierdza to nie tylko umiejętność zaplanowania i przeprowadzenia badań, ale także samodzielnego przygotowania manuskryptu, prowadzenia korespondencji z redakcją i recenzentami oraz przeprowadzenia pełnego procesu wydawniczego. W mojej ocenie świadczy to o samodzielności i dojrzałości naukowej Doktoranta. Zauważalna jest przy tym wyraźna tendencja rosnąca, ponieważ udział Doktoranta w kolejnych pracach cyklu systematycznie wzrasta, od 40-55% w pracach wcześniejszych do 70-100% w pracach z lat 2023-2025.

Zastrzeżenie budzi natomiast włączenie do cyklu publikacyjnego zarówno pracy [P3], jak i pracy [P5]. Po dogłębnej analizie obu tekstów stwierdzam, że rezultaty badawcze przedstawione w tych pracach są właściwie tożsame. Publikacja [P5] jest nieznacznie rozwinięta o dodatkową analizę statystyczną. W opinii recenzenta te same rezultaty nie powinny być oceniane dwukrotnie, a pozycja [P3] powinna zostać wykluczona z oceny, tym bardziej że opublikowana została później niż artykuł [P5]. Po wyłączeniu pracy [P3] cykl liczy siedem publikacji, a średni udział Doktoranta wzrasta z 59% do 62%. Sumaryczny współczynnik wpływu nie ulega przy tym zmianie, ponieważ praca [P3] nie posiada współczynnika wpływu. Natomiast po wyłączeniu pracy [P3] łączna punktacja według wykazu ministerialnego wynosi 640 punktów.

Pod względem technicznym rozprawa jest kompletna, a jej układ oceniam jako prawidłowy i konsekwentny. Podział części eksperymentalnej według funkcji, jaką odpad pełni w kompozycie, jest logiczny i ułatwia lekturę.

2. Ocena merytoryczna rozprawy

W pierwszej kolejności odniosę się do celowości podjętego tematu. Ograniczanie udziału klinkieru w spoiwach oraz zastępowanie kruszyw naturalnych surowcami wtórnymi należy dziś do najintensywniej rozwijanych kierunków badań w technologii betonu. Kierunek ten wymuszony jest zarówno regulacjami dotyczącymi emisji dwutlenku węgla, jak i spodziewanym ograniczeniem dostępności popiołów lotnych oraz granulowanego żużla wielkopiecowego, wynikającym z transformacji energetyki i hutnictwa. Prace nad kruszywami z recyklingu znalazły odzwierciedlenie w fib Model Code 2020 oraz w pracach nad zaktualizowaną wersją Eurokodu. Tematyka rozprawy wpisuje się zatem w aktualny nurt badawczy i jej podjęcie uważam za w pełni uzasadnione.

Tytuł rozprawy odpowiada jej zawartości, choć jest sformułowany bardzo szeroko. Zakres rozprawy jest szeroki i ambitny, obejmuje bowiem wpływ odpadów na cementy, zaprawy, betony cementowe oraz fibrobetony. Możliwe, że zakres ten okazał się nawet zbyt ambitny i nie pozwolił Autorowi na pełne skupienie się na jednym materiale oraz na dogłębne wyjaśnienie mechanizmów jego oddziaływania. Z drugiej strony poszukiwanie własnego kierunku rozwoju naukowego na etapie doktoratu uzasadnia niekiedy prowadzenie prac o charakterze rozpoznawczym, obejmujących szersze spektrum materiałów, a dopiero na dalszym etapie kariery zawężenie tematyki. Program badawczy obejmuje pięć różnych materiałów odpadowych, trzy funkcje w kompozycie oraz trzy rodzaje kompozytów, co daje kilkanaście niezależnych serii badawczych. Autor deklaruje wykonanie około

2400 próbek i uzyskanie około 760 wyników badań. Jest to znaczący nakład pracy laboratoryjnej i zasługuje na wyraźne podkreślenie.

Za najbardziej wartościowe elementy rozprawy uważam trzy wątki. Pierwszym są badania betonów zbrojonych włóknami węglowymi odzyskanymi z recyklingu łopat turbin wiatrowych [P7]. Zagadnienie to jest rozpoznane w skali światowej w niewielkim stopniu, a uwzględnienie w programie badawczym orientacji włókien względem kierunku betonowania oraz energii zniszczenia świadczy o przemyślanym podejściu do problemu. Drugim jest ocena potencjału zastosowania stłuczki szklanej w betonach cementowych niskich klas wytrzymałości (C12/15) w kontekście zastosowań niekonstrukcyjnych (drogowych) [P4,P5]. Pozytywnie oceniam aplikacyjny wymiar tych prac. Badania betonów niskich klas wytrzymałości, przeznaczonych na ławy pod korytka ściekowe, krawężniki czy podbudowy przepustów, odpowiadają rzeczywistym potrzebom budownictwa drogowego i wynikają z doświadczenia zawodowego Doktoranta. Odniesienie wyników do wymagań normowych oraz do katalogów stosowanych na drogach krajowych jest w tym kontekście trafnym rozwiązaniem. Trzecim wątkiem jest wykorzystanie odpadów gumowych pozyskanych z procesu recyklingu opon [P1, P8], to jest odpadu, który może być stosowany w kompozytach o specjalnych parametrach.

Odnosząc się do tez postawionych w rozprawie stwierdzam, że zostały one zrealizowane, a przeprowadzone badania dostarczyły materiału pozwalającego na ich weryfikację.

Wykazano, że przy racjonalnym doborze rodzaju i ilości odpadu możliwe jest uzyskanie kompozytów cementowych o właściwościach mechanicznych i trwałościowych porównywalnych z kompozytami o składzie tradycyjnym, a dla części badanych materiałów, w szczególności dla kruszywa z żużla pomiedziowego oraz mielonej stłuczki szklanej, także lepszych od materiału odniesienia. Cel pracy, rozumiany jako określenie zakresów dozowania odpadów, przy których zachowane zostają wymagane właściwości, został osiągnięty.

Sformułowanie tez uważam jednak za zbyt ogólne. Teza druga, mówiąca o tym, że surowce pochodzące z recyklingu odpadów mogą pełnić funkcję pełnowartościowych składników kompozytów cementowych, powinna zostać ujęta warunkowo, z odniesieniem do granicznych zawartości odpadu i do przewidywanego zastosowania kompozytu. Wyniki uzyskane dla betonów z 20% granulatu gumowego, gdzie spadek wytrzymałości na ściskanie sięgnął 87%, dla betonów z 40% ścieru gumowego, gdzie przekroczył 93%, oraz dla zapraw z dodatkiem proszków GFRP powyżej 20% masy cementu, gdzie utracono ponad połowę wytrzymałości, pokazują, że tezę w brzmieniu bezwarunkowym trudno byłoby utrzymać. Sam Autor formułuje zresztą w podsumowaniu wniosek ostrożniejszy, ograniczając stosowanie tych materiałów do kompozytów niekonstrukcyjnych i specjalnych, i takie ujęcie uważam za właściwe.

Zasadnicza wątpliwość metodyczna dotyczy relacji między deklarowanym celem pracy a sposobem wprowadzania dodatków. Celem rozprawy jest, zgodnie z rozdziałem 2.3, określenie optymalnego poziomu dozowania materiałów odpadowych pełniących rolę substytutu cementu, kruszywa lub zbrojenia rozproszonego. Tymczasem w badaniach dotyczących cementów, opisanych w podrozdziałach 4.1 i 4.3 oraz w pracach [P4] i [P5], odpad wprowadzano jako dodatek do stałej ilości cementu, a nie jako jego zamiennik. Autor stwierdza to wprost, pisząc o wprowadzeniu mielonej stłuczki szklanej jako dodatku mineralnego bez jednoczesnego zmniejszenia ilości cementu portlandzkiego. Ma to dwie konsekwencje. Po pierwsze, ekologiczne uzasadnienie tej części badań, oparte na ograniczeniu udziału klinkieru i redukcji śladu węglowego, nie znajduje pełnego pokrycia w przyjętej metodyce, ponieważ zawartość cementu w mieszance nie ulega zmniejszeniu. Po drugie, przy stałej ilości wody i cementu wprowadzenie znacznej ilości materiału o uziarnieniu spoiwa obniża

efektywny stosunek wody do spoiwa i uszczelnia stos okruchowy, co samo w sobie prowadzi do wzrostu wytrzymałości. W opinii Recenzenta obserwowanych przyrostów nie można więc bez dodatkowych badań przypisywać wyłącznie aktywności pucolanowej dodatku.

Problem ten jest szczególnie widoczny w podrozdziale 4.3. Zaprawy normowe zawierały 450 g cementu, 225 ml wody i do 270 g mielonego żużla pomiedziowego, przy czym ilość wody pozostawała stała. Oznacza to obniżenie stosunku wody do spoiwa z 0,50 do około 0,31. W tych warunkach odnotowany wzrost wytrzymałości na ściskanie o 13-18% dla dodatku 50-60% jest raczej skromny i z pewnością nie stanowi dowodu na wysoką aktywność pucolanową żużla, o której mowa we wnioskach. Podobna uwaga dotyczy stłuczki szklanej wprowadzanej w ilości do 45% masy cementu.

Odmienne podejście przyjęto w badaniach kompozytów z odpadami gumowymi. Z tabel 8 i 12 wynika, że wraz ze wzrostem zawartości gumy proporcjonalnie zmniejszano wszystkie pozostałe składniki mieszanki, w tym spoiwo. Zawartość spoiwa, rozumiana jako suma cementu i popiołu lotnego, spadła z 345 kg/m^3 dla mieszanki kontrolnej do 276 kg/m^3 przy 20% granulatu i do około 208 kg/m^3 przy 40% ścieru. Zmniejszono również ilość domieszki uplastyczniającej. W efekcie porównywane serie różnią się nie tylko zawartością gumy, ale i zawartością spoiwa, a obserwowany spadek wytrzymałości jest wypadkową obu tych czynników. Przy takim planie eksperymentu nie jest możliwe przypisanie zaobserwowanych efektów wyłącznie obecności gumy, co osłabia część wniosków sformułowanych w rozdziale siódmym oraz w tabeli 15. Zestawienie obu opisanych wyżej podejść, to jest wprowadzania dodatku ponad skład mieszanki oraz zastępowania objętościowego, prowadzi do pytania o porównywalność wniosków formułowanych dla poszczególnych grup materiałów.

Pewien niedosyt budzi także brak kompleksowej oceny materiałów odpadowych, które wprowadzane były do kompozytów cementowych (tj. brak analiz SEM, XRD, analizy termicznej ani oznaczenia składu chemicznego badanych odpadów, poza informacjami zawartymi w artykule [P2]). Nie oznaczono również wskaźnika aktywności pucolanowej według PN-EN 450-1. Wobec tego sformułowania dotyczące mechanizmów oddziaływania odpadów na matrycę cementową, a jest ich w rozdziale siódmym (oraz publikacjach) wiele, mają charakter przypuszczeń, a nie wniosków popartych wynikami badań. Autor dostrzega ten problem i umieszcza badania mikrostruktury wśród propozycji przyszłych badań. Niewątpliwie przeprowadzenie badań o charakterze materiałowym na wstępnym etapie doktoratu mogłoby prowadzić do cennych wniosków.

Zwracam ponadto uwagę na rozbieżność między streszczeniem a treścią rozprawy. W streszczeniu w języku polskim czytamy, że przeprowadzono ocenę wpływu rozdrobnienia materiałów odpadowych na aktywność pucolanową oraz właściwości zaczynu cementowego. W części eksperymentalnej nie znalazłem ani badań aktywności pucolanowej, ani badań zaczynów cementowych. Analogiczne sformułowanie występuje w streszczeniu angielskim.

Pewien niedosyt budzi także pominięcie oceny reaktywności alkalicznej kruszywa szklanego. Reaktywność alkaliczno-krzemionkowa jest podstawowym ograniczeniem stosowania stłuczki szklanej jako kruszywa, a ryzyko rośnie wraz ze wzrostem uziarnienia. W podrozdziale 5.7 szkło zastosowano jako zamiennik frakcji 8/16 mm w ilości do 100%, czyli w konfiguracji uznawanej w literaturze za najbardziej niekorzystną, i mimo to badania ekspansji wykonano wyłącznie dla kruszywa z żużla pomiedziowego oraz dla kruszywa granitowego.

Osobnego komentarza wymaga zagadnienie przygotowania odpadu do zastosowania w kompozycie. W rozdziale 2.5 Autor zawarł istotne zastrzeżenie, stwierdzając, że wiele materiałów odpadowych nadaje się do ponownego wykorzystania w przemyśle budowlanym, przy czym część

z nich wymaga odpowiedniego przygotowania w celu uzyskania jednorodności oraz stabilności składu, a istotną grupę stanowią odpady, które mogą być wykorzystane bez konieczności ponoszenia znaczących nakładów czasowych i energetycznych. Spostrzeżenie to jest trafne i dotyka sedna problemu. W pracach laboratoryjnych bardzo często wykorzystywany jest bowiem produkt czysty, wysortowany, umyty, wysuszony i doprowadzony do zadanego uziarnienia, w rezultacie czego uzyskiwane wyniki są interesujące, ale nie zawsze przekładają się na warunki rzeczywiste. W recenzowanej rozprawie surowcem wyjściowym były między innymi oczyszczone i wysuszone butelki szklane koloru brązowego oraz oczyszczony z zanieczyszczeń organicznych i wysuszony żużel pomiedziowy. W praktyce inżynierskiej nakłady związane z przygotowaniem/waloryzacją materiału powinny być precyzyjnie szacowane celem weryfikacji czy proponowane rozwiązania mają uzasadnienie nie tylko ekologiczne, ale i ekonomiczne.

Wnioski zawarte w rozdziale siódmym mają w przeważającej części charakter powtórzenia podsumowań poszczególnych podrozdziałów. Celem rozprawy było określenie optymalnego poziomu dozowania, wartości te powinny zostać zebrane w jednym miejscu i przedstawione w formie liczbowej, wraz ze wskazaniem kryterium, względem którego optymalizacja była prowadzona. Pomimo braku zestawienia optymalnych poziomów dozowania w formie liczbowej, przedstawione w tabelach 14-16 uogólnienia oparte na symbolach graficznych uznaję za wystarczające. Warto nadmienić, że uogólnienia graficzne częściowo nie są spójne z treścią pracy (rezultat uogólnienia) ale w prosty sposób prezentują kluczowe wnioski płynące z rozległego planu badawczego.

Mimo powyższych uwag stwierdzam, że program badawczy został zrealizowany rzetelnie, a przyjęte procedury badawcze są zgodne z aktualnymi normami.

Zakres wykonanych oznaczeń, obejmujący nie tylko podstawowe właściwości mechaniczne, ale również mrozoodporność, głębokość penetracji wody pod ciśnieniem, charakterystykę porów powietrznych oraz współczynnik przewodzenia ciepła, świadczy o dobrym rozpoznaniu warsztatu badawczego przez Doktoranta.

3. Ocena poszczególnych nurtów badawczych

W rozprawie wyróżnić można kilka głównych nurtów badawczych, które omówię poniżej.

Mielona stłuczka szklana jako dodatek do kompozytów cementowych. Nurt ten tworzą publikacje [P3], [P4] oraz [P5], przy czym, jak wskazano wcześniej, pracę [P3] uważam za tożsamą z pracą [P5]. Badania poświęcone są zastosowaniu dodatku mielonego szkła z recyklingu do betonów o niskiej klasie wytrzymałości C12/15. W pracy [P5] stłuczkę szklaną dodawano do mieszanki bazowej wykonanej na bazie cementu CEM I 42,5R, natomiast w pracy [P4] stłuczką szklaną zastępowano popiół lotny. Można uznać, że koncepcja, idea oraz warsztat metodologiczny w obu pracach są bardzo zbliżone. Badania przedstawione w cyklu rozszerzono także o niepublikowaną wcześniej ocenę potencjału zastosowania mielonego żużla pomiedziowego jako dodatku do zapraw cementowych, wykazując możliwość jego wprowadzania do kompozytów bez znaczącego negatywnego wpływu na badane parametry.

Surowcem wyjściowym były w tym przypadku brązowe butelki szklane, oczyszczone i wysuszone, a więc produkt doprowadzony do stanu zbliżonego do czystego. Wprowadzanie materiałów z recyklingu do wyrobów o niższych wymaganiach mechanicznych oraz do elementów niekonstrukcyjnych jest w pełni uzasadnione, podobnie jak dążenie do zmniejszenia udziału klinkieru w cementach. Wyniki uzyskane w badaniach są zbieżne z obecną praktyką, w której do produkcji betonów tych klas stosuje się z natury cementy CEM II/B (i podobne) o zbliżonym stopniu zastąpienia

klinkieru dodatkami mineralnymi. Wnioski płynące z tej serii publikacji są interesujące i niosą ze sobą praktyczne implikacje, a szczególnie wartościowe poznawczo są rezultaty dotyczące wpływu stłuczki szklanej na poprawę mrozoodporności betonów. Autorzy nie przedstawili jednak dokładnej charakterystyki mielonej stłuczki szklanej, co utrudnia ocenę, czy obserwowane efekty wynikają

z właściwości samego materiału, czy ze zmiany proporcji składników mieszanki.

Odpady z recyklingu łopat turbin wiatrowych. Nurt ten obejmuje prace [P6] oraz [P7]. W pracy [P6] oceniano wpływ proszków pozyskanych z instalacji odpylania podczas mechanicznego recyklingu łopat. Praca ta pod względem zaplanowanego eksperymentu jest w pewien sposób ograniczona, ponieważ skupia się na podstawowych parametrach mechanicznych, lecz traktować ją można jako badania wstępne, weryfikacyjne, pozwalające na ocenę wpływu materiału na kompozyt. Niewątpliwym wnioskiem płynącym z tej pracy jest wykazanie, że wprowadzenie proszków w optymalnej ilości może skutkować relatywnie zadowalającymi parametrami mechanicznymi zapraw. Pracę uznać można za rozpoznanie, które stanowić może interesujący materiał wyjściowy do dalszych prac naukowych po uzyskaniu stopnia doktora.

Publikacja [P7], poświęcona zastosowaniu włókien węglowych z recyklingu łopat turbin wiatrowych, jest bez wątpienia pracą o wyższej jakości naukowej i znakomicie wpisuje się w aktualne trendy badawcze, wyzwania budownictwa oraz projekty badawcze realizowane obecnie w Polsce w innych instytucjach naukowych. Jakość przeprowadzonych badań oraz wnioski płynące z pracy należy uznać za wartościowe poznawczo. Wykazano, że dodatek włókien rCF poprawia wytrzymałość na rozciąganie przy rozłupywaniu oraz zwiększa ciągliwość betonu, przy minimalnym wpływie na wytrzymałość na ściskanie. Najbardziej efektywne okazały się włókna o długości od 35 do 45 mm, a korzystna zawartość mieściła się w przedziale od 5 do 10 kg/m^3. Efektywność wzmocnienia zależała od orientacji włókien względem kierunku betonowania, ich długości oraz zawartości. Włókna zwiększały również energię zniszczenia, zmniejszały kruchość materiału i poprawiały jego odkształcalność, przy czym obserwowane lokalne skupiska włókien wynikały z ograniczonej urabialności mieszanki.

Odpady gumowe w zaprawach i betonach cementowych. Nurt ten tworzą prace [P1] oraz [P8], dotyczące odpowiednio zastosowania gumy SBR w postaci pyłu jako dodatku do zapraw oraz w postaci granulatu jako dodatku do betonów, uzupełnione o niepublikowane badania betonów ze ścierem gumowym. Jest to nurt interesujący poznawczo, mogący wpłynąć na wybrane parametry betonów cementowych, w szczególności na poprawę zdolności izolacyjnych oraz na zwiększenie odkształcalności materiału. Uzyskane wyniki jednoznacznie wskazują na ograniczenia w stosowaniu tych materiałów w betonach konstrukcyjnych, natomiast otwierają pole do ich wykorzystania w kompozytach specjalnych. Wątpliwości metodyczne dotyczące sposobu projektowania tych mieszanek omówiłem w rozdziale drugim recenzji.

Kruszywo z żużla pomiedziowego. Praca [P2], uzupełniona o niepublikowane badania zapraw z drobnym kruszywem pomiedziowym oraz o oznaczenia wytrzymałości po 3000 dniach dojrzewania, tworzy najbardziej dojrzały pod względem trwałościowym fragment rozprawy. Wykonano tu oznaczenia właściwości kruszyw, ocenę reaktywności alkalicznej, badania mrozoodporności oraz długoterminowe badania wytrzymałości. Wyniki potwierdzają przydatność tego kruszywa jako zamiennika kruszywa naturalnego i mają bezpośrednie znaczenie praktyczne dla regionu, w którym żużel pomiedziowy jest dostępny w dużych ilościach.

4. Uwagi szczegółowe i pytania do Doktoranta

Poniższe uwagi mają na celu podjęcie dyskusji naukowej i wyjaśnienie zagadnień, które podczas lektury rozprawy wzbudziły moje wątpliwości.

Pytanie 1) W pracach dotyczących stłuczki szklanej, w szczególności w pracy [P5], przyjęto stały wskaźnik woda-cement, natomiast pył szklany, będący de facto frakcją o uziarnieniu spoiwa, wprowadzano dodatkowo do mieszanki w ilości wynoszącej do 90 kg/m^3. W rezultacie wskaźnik woda-spoiwo uległ znaczącej zmianie, podobnie jak skład granulometryczny całego kompozytu. Czy pozytywne zjawiska zaobserwowane w badaniach są zatem efektem obecności szkła i jego właściwości, czy raczej znaczącej zmiany ilości materiału drobnoziarnistego, prowadzącej do obniżenia wskaźnika woda-spoiwo? Czy podejście polegające na traktowaniu pyłu szklanego jako składnika spoiwa i prowadzenie badań w oparciu o wskaźnik woda-spoiwo nie byłoby bardziej zasadne? Proszę o podanie efektywnych wartości tego wskaźnika dla badanych serii.

Pytanie 2) Doktorant deklaruje, że mielone szkło może pełnić funkcję dodatku mineralnego o właściwościach pucolanowych, przy czym właściwości te zależą między innymi od odpowiedniego uziarnienia. Czy przeprowadzona została analiza uziarnienia metodą dyfrakcji laserowej lub oznaczenie pozostałości na sicie 45 mikrometrów, stosowane przy ocenie dodatków mineralnych typu II, na przykład popiołu lotnego?

Czy oznaczono wskaźnik aktywności pucolanowej badanych materiałów według PN-EN 450-1? Proszę również o wskazanie, w której części rozprawy przedstawiono zapowiedzianą w streszczeniu ocenę wpływu rozdrobnienia odpadów na aktywność pucolanową oraz na właściwości zaczynu cementowego, a jeżeli badań tych nie prowadzono, to na jakiej podstawie sformułowano wniosek o wysokiej aktywności mielonego żużla pomiedziowego.

Pytanie 3) W rozprawie nie przedstawiono dokładnej charakterystyki mielonej stłuczki szklanej. Czy przeprowadzona została analiza pozwalająca stwierdzić, że stłuczka dodawana jako wypełniacz spełnia wymagania normy PN-EN 12620 stawiane kruszywu wypełniającemu, analogicznie jak ma to miejsce w przypadku mączki wapiennej lub badania wspomniane w pytaniu nr 2?

Pytanie 4) Czy Autor wykonywał kalkulacje pozwalające ocenić, czy wprowadzenie tak dużej ilości pyłu szklanego, sięgającej 45% masy cementu, nie wpływa znacząco na zwiększenie ilości alkaliów dostępnych i wymywalnych w mieszance betonowej? Norma ASTM C1866 dla mielonego szkła dopuszcza zawartość alkaliów na poziomie 15% Na2Oeq. Czy taka analiza bilansowa została przeprowadzona i jaki jest jej wynik w kontekście ryzyka wewnętrznej reakcji alkaliczno-krzemionkowej?

Pytanie 5) Dlaczego oceną reaktywności alkalicznej objęto wyłącznie kruszywo z żużla pomiedziowego oraz kruszywo granitowe, pomijając stłuczkę szklaną, która stanowiła w podrozdziale 5.7 zamiennik frakcji 8/16 mm w ilości do 100%? Proszę o odniesienie się do ryzyka reakcji alkaliczno-krzemionkowej w badanych betonach, z uwzględnieniem zawartości alkaliów w zastosowanym cemencie oraz uziarnienia stłuczki. Czy zaobserwowana po badaniu mrozoodporności siatka rys może mieć z tym zjawiskiem związek?

Pytanie 6) W wybranych pracach proszki wprowadzane były jako materiał dodatkowy, w ilości sięgającej 40% masy cementu, co istotnie wpływało na wskaźnik woda-spoiwo, dostępność wody w procesie hydratacji oraz na zmianę granulometryczną całego układu. W innych pracach, na przykład związanych z recyklatem gumowym, granulat wprowadzano objętościowo do całej objętości betonu, redukując tym samym ilość spoiwa z 345 kg/m^3 do 276 kg/m^3, a przy 40% ścieru

do około 208 kg/m3. Zabiegi te istotnie wpływają na końcowe rezultaty i utrudniają porównywanie wniosków formułowanych dla poszczególnych grup materiałów. Czy uwzględniając te aspekty, z rezultatów uzyskanych w rozprawie można byłoby wyciągnąć dodatkowe wnioski? W jaki sposób rozdzielono wpływ dodatku gumy od wpływu obniżenia zawartości spoiwa?

Pytanie 7) Czy w badaniach uwzględniano lub analizowano, czy uzyskane rezultaty byłyby odmienne, gdyby zastosowano granulat gumowy SBR pochodzący z opon samochodów osobowych oraz z opon samochodów ciężarowych? Materiały te różnią się składem mieszanki gumowej, zawartością sadzy technicznej oraz udziałem pozostałości kordu, co może wpływać na przyczepność do matrycy cementowej.

Pytanie 8) W rozprawie zawarto istotne zastrzeżenie dotyczące konieczności przygotowania odpadów przed ich wykorzystaniem, obejmujące takie operacje jak sortowanie, mycie, kruszenie, suszenie i mielenie. Według opinii Doktoranta, który z analizowanych materiałów może zostać wprowadzony do kompozytów cementowych przy najniższych nakładach energetycznych i ekonomicznych?

Pytanie 9) W podrozdziale 6.2 podano, że gęstość mieszanki betonowej z 40% ścieru gumowego wynosiła 2245 kg/m^3, czyli tyle samo co mieszanki referencyjnej, podczas gdy gęstość stwardniałego betonu tej samej serii wynosiła około 1660 kg/m^3. Proszę o wyjaśnienie tej rozbieżności.

„Gęstość. Gęstość mieszanki betonowej zmieniała się wraz z ilością zastosowanego ścieru. Dla próbki referencyjnej gęstość wynosiła 2245 kg/m^3. Maksymalny spadek gęstości mieszanki betonowej odnotowano w przypadku mieszanki zawierającej 20% ścieru gumowego (2111 kg/m3). Nieoczekiwanie najmniejszy spadek gęstości mieszanki betonowej uzyskano w przypadku mieszanki zawierającej 40% ścieru gumowego gęstość ta była równa 2245 kg/m^3."

Pytanie 10) W tabeli 16 dla betonów z włóknami węglowymi wskazano silny wzrost wytrzymałości na zginanie, podczas gdy w pracy [P7] oznaczano wytrzymałość na rozciąganie przy rozłupywaniu, a nie na zginanie. Ponadto w tej samej tabeli brak wpływu przypisano kierunkowi równoległemu, a silny wzrost kierunkowi prostopadłemu, co jest odwrotne w stosunku do wyników przedstawionych w artykule. Rozbieżność ta powtarza się w tekście podrozdziału 6.1, gdzie dwukrotnie opisano wyniki dla kierunku prostopadłego, podając różne wartości. Prosiłbym o weryfikację i korektę.

Pytanie 11) Włókna węglowe stosowane w badaniach [P7] miały postać pociętych pasm o szerokości 10 mm, które podczas cięcia ulegały defragmentacji, a na powierzchniach przełomu obserwowano ich skupiska. Prosiłbym o informację, w jaki sposób prowadzono mieszanie i czy podejmowano próby poprawy rozproszenia włókien.

Pytanie 12) Prosiłbym o informację, czym można tłumaczyć różnicę we właściwościach zapraw z proszkiem białym i różowym (Proszki WPM i PPM).

5. Uwagi edytorskie

Rozprawa napisana jest językiem w wielu miejscach potocznym, z licznymi skrótami myślowymi i literówkami. Zauważalny jest brak konsekwencji w stosowaniu terminologii z zakresu technologii kompozytów cementowych, w szczególności zamienne używanie określeń dodatek, zamiennik i substytut. W pracy występują uchybienia typowe dla prac doktorskich.

Poniżej wymieniam wybrane przykłady:

– Strona 9: „Zastosowanie Zbrojenie rozproszone (włókna węglowe, ścier gumowy)" oraz analogiczne sformułowanie na stronie 56.

– Strona 12: „meatakolinu" zamiast metakaolinu.

– Strona 13: „pozwala z jednej strony na organicznie odpadów" zamiast ograniczenie odpadów.

– Strona 14: „zwiększa zwiększenia trwałość w warunkach cyklicznego zamarzania i rozmrażania".

– Podrozdział 4.2: ilości dodatków podano zamiennie jako 22,5% i 45% masy cementu oraz jako 22,5 kg/m3 i 45,0 kg/m3, przy czym przy zawartości cementu wynoszącej 270 kg/m3 wartości te nie są tożsame. Wymaga to ujednolicenia.

– Podrozdział 5.6: konsystencję mieszanki z 20% gumy określono najpierw jako S3 przy opadzie stożka 130 mm, a w kolejnym zdaniu jako S2 przy opadzie 80 mm.

– Podrozdział 5.6: „Dla betonów zawierających 55% granulatu spadek wytrzymałości wynosił 12,1%" – prawdopodobnie chodzi o 5%.

– Podrozdział 5.6: „zmniejszenie ilości zniszczeń na powierzchni podróbek" zamiast próbek.

– Podsumowanie podrozdziału 6.2: „dodatki 10-20% pozwalały zachować właściwości konstrukcyjne, zmniejszały nasiąkliwość, mrozoodporność oraz izolacyjność cieplną" – z treści rozdziału wynika, że mrozoodporność i izolacyjność cieplną dodatek poprawiał.

– Tabela 9: „Wskaźnik kruchość betonu". Tabela 15: „Reraktywność alkaliczna".

– Wielokrotnie w pracy „wytrzymałość na zgnanie" zamiast na zginanie oraz „w przydatku" zamiast w przypadku.

– Rysunki przedstawiające wyniki badań nie zawierają słupków błędów.

– W wielu miejscach brak odstępu między liczbą a jednostką, na przykład „25mm", „110mm", a zapis jednostek gęstości nie jest konsekwentny.

– Zapis indeksów w symbolach wytrzymałości nie jest konsekwentny, występuje zamiennie fc,28, fc28 oraz fck28.

Zaznaczam, że powyższe uwagi mają charakter porządkowy i nie wpływają na ocenę wartości merytorycznej uzyskanych wyników badań.

6. Informacje dodatkowe

Zgodnie z danymi zamieszczonymi w rozprawie, według stanu na dzień 20 kwietnia 2026 r., dorobek publikacyjny Doktoranta cytowany był 55 razy w bazie Scopus, w tym 51 razy bez autocytowań, przy indeksie Hirscha równym 3, oraz 46 razy w bazie Web of Science, w tym 41 razy bez autocytowań, przy indeksie Hirscha równym 2. Najczęściej cytowaną pracą cyklu jest artykuł [P5] opublikowany w czasopiśmie Materials, który uzyskał 35 cytowań według bazy Scopus. Uzyskane wskaźniki bibliometryczne uważam za dobre na obecnym etapie kariery naukowej i świadczące o tym, że wyniki badań spotkały się z zainteresowaniem środowiska naukowego.

W rozprawie nie zamieszczono wykazu pozostałych osiągnięć naukowych Doktoranta, to jest publikacji spoza cyklu, wystąpień konferencyjnych, udziału w projektach badawczych czy zgłoszeń patentowych, co utrudnia całościową ocenę jego aktywności naukowej. Na podkreślenie zasługuje natomiast łączenie pracy badawczej z pracą zawodową w administracji drogowej, co znajduje odzwierciedlenie w aplikacyjnym charakterze podjętej tematyki.

7. Podsumowanie i wniosek końcowy

Podjęta w rozprawie doktorskiej Pana mgr. inż. Filipa Szmatuły tematyka jest aktualna i stanowi przedmiot zainteresowania wielu ośrodków badawczych w kraju i za granicą. Autor zrealizował bardzo obszerny program badań eksperymentalnych, obejmujący pięć grup materiałów odpadowych i trzy obszary ich zastosowania w kompozytach cementowych, a uzyskane wyniki opublikował w ośmiu artykułach naukowych, zarówno w czasopismach krajowych, jak i w czasopismach zagranicznych posiadających współczynnik wpływu. Badania nad wykorzystaniem włókien węglowych z recyklingu łopat turbin wiatrowych oraz zastosowanie stłuczki szklanej w kompozytach cementowych uważam za oryginalny wkład w rozwój dyscypliny. Postawione w rozprawie tezy uznaję za zrealizowane, a cele badawcze za osiągnięte.

Wkład Doktoranta w powstanie cyklu publikacyjnego ma, w mojej ocenie, charakter wiodący, a samodzielne przygotowanie pracy [P8] oraz przeprowadzenie jej przez pełny proces wydawniczy potwierdza jego dojrzałość naukową i umiejętność samodzielnego prowadzenia pracy badawczej.

W rozprawie wystąpiły uchybienia, które opisałem w części merytorycznej recenzji. Dotyczą one przede wszystkim zbyt zwięzłej części studialnej, ogólnikowego sformułowania tez, rozbieżności między deklarowanym celem a przyjętą metodyką w zakresie zastępowania cementu, braku analizy mikrostrukturalnej oraz braku analizy statystycznej wyników. Uchybienia te ograniczają możliwość interpretacji mechanizmów obserwowanych zjawisk, nie podważają jednak wiarygodności samych wyników badań ani wartości poznawczej i aplikacyjnej rozprawy jako całości. Liczę na to, że Doktorant odniesie się do podniesionych kwestii podczas publicznej obrony.

Podsumowując, stwierdzam, że rozprawa doktorska Pana mgr. inż. Filipa Szmatuły pt. „Wpływ wybranych materiałów z recyklingu odpadów na właściwości kompozytów cementowych" stanowi oryginalne rozwiązanie problemu naukowego, wykazuje ogólną wiedzę teoretyczną Kandydata w dyscyplinie inżynieria lądowa, geodezja i transport oraz potwierdza jego umiejętność samodzielnego prowadzenia pracy naukowej, a tym samym spełnia wymagania określone w art. 187 ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. – Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (t.j. Dz. U. z 2024 r. poz. 1571, z późn. zm.). W związku z powyższym wnioskuję do Rady Dyscypliny Inżynieria Lądowa, Geodezja i Transport Uniwersytetu Zielonogórskiego o dopuszczenie rozprawy do publicznej obrony.

Paw Sik

.....

dr hab. inż. Paweł Sikora, prof. ZUT