prof. dr hab. inż. Łukasz Sadowski
Politechnika Wrocławska
Wydział Budownictwa Lądowego i Wodnego
Katedra Inżynierii Materiałów i Procesów Budowlanych
Wybrzeże Wyspiańskiego 27
50-370 Wrocław

Wrocław, 21.08.2026 r.

RECENZJA

rozprawy doktorskiej mgr inż. Filipa Szmatuły

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

1. Przedmiot i podstawa opracowania recenzji

Przedmiotem niniejszej recenzji jest ocena rozprawy doktorskiej mgr inż. Filipa Szmatuły pt. „Wpływ wybranych materiałów z recyklingu odpadów na właściwości kompozytów cementowych”, przygotowanej w Uniwersytecie Zielonogórskim w dziedzinie nauk inżynieryjno-technicznych, w dyscyplinie inżynieria lądowa, geodezja i transport. Promotorem rozprawy jest dr hab. inż. Jacek Korentz, prof. UZ, a promotorem pomocniczym dr inż. Robert Jurczak.

Recenzję sporządzono w związku z umową o dzieło nr IBUD/D-ka/695/2026 zawartą z Uniwersytetem Zielonogórskim, której przedmiotem jest wykonanie recenzji wskazanej rozprawy doktorskiej. Oceny dokonano przede wszystkim w odniesieniu do ustawowych wymagań stawianych rozprawie doktorskiej, a więc oryginalności rozwiązania problemu naukowego lub oryginalnego zastosowania wyników badań w praktyce, poziomu ogólnej wiedzy teoretycznej kandydata oraz umiejętności samodzielnego prowadzenia pracy naukowej.

2. Opis ogólny rozprawy

Rozprawa ma formę cyklu publikacji uzupełnionego obszernym komentarzem syntetyzującym wyniki. Całość liczy 149 stron wraz z załącznikami. Zasadnicza część autorska poprzedzająca załączone publikacje obejmuje streszczenia, wykaz ośmiu publikacji stanowiących podstawę osiągnięcia, opis wkładu Doktoranta, wprowadzenie, bardzo skrótowy stan wiedzy, część eksperymentalną uporządkowaną według sposobu wykorzystania materiałów odpadowych, podsumowanie, propozycje przyszłych badań, wykaz literatury oraz zestawienia tabel i rysunków. Do pracy dołączono oświadczenia współautorów oraz teksty publikacji P1–P8.

Na cykl składa się osiem artykułów opublikowanych w latach 2020–2025. Trzy z nich ukazały się w czasopismach posiadających współczynnik wpływu: Applied Sciences, Materials oraz Polymers. Pozostałe opublikowano m.in. w Materiałach Budowlanych i Cement Wapno Beton. Doktorant podaje sumaryczny IF równy 11,486 i łączną punktację 740 pkt. Wartości te mają znaczenie pomocnicze; dla oceny rozprawy istotniejsza jest jakość i spójność wkładu naukowego oraz samodzielność doktoranta. Udział doktoranta w poszczególnych publikacjach jest zróżnicowany i wynosi według zestawienia od 40% do 100%, średnio 59%. W P3 i P5 udział ogólny określono na 40%, w P4 na 50%, w P1 na 60%, w P2 na 55%, w P6 na 70%, w P7 na 60%, natomiast P8 jest pracą jednoautorską. Zwraca uwagę, że deklarowany udział

w przygotowaniu pierwszej wersji manuskryptu w większości wcześniejszych publikacji był stosunkowo niewielki (10–30%), natomiast w P8 wyniósł 100%. Taki układ można interpretować jako stopniowy wzrost samodzielności naukowej w trakcie realizacji doktoratu, co oceniam pozytywnie, choć przy ocenie osiągnięcia trzeba pamiętać, że część najczęściej cytowanych rezultatów powstała przy istotnym udziale współautorów.

Część eksperymentalna została podzielona na trzy główne obszary: zastosowanie odpadów jako dodatków do cementu, zastosowanie odpadów do modyfikacji składu ziarnowego zapraw i betonów oraz zastosowanie materiałów z recyklingu jako zbrojenia rozproszonego. Analizowano m.in. mielone szkło, żużel pomiedziowy, odpady gumowe SBR, produkty mechanicznego recyklingu łopat turbin wiatrowych oraz odzyskane włókna węglowe. Zakres materiałowy jest zatem bardzo szeroki i obejmuje materiały o całkowicie odmiennym pochodzeniu, składzie chemicznym, geometrii, mechanizmie oddziaływania z matrycą cementową i potencjalnym zastosowaniu.

Układ pracy jest ogólnie czytelny. W odróżnieniu od klasycznej monografii, zasadnicza wartość naukowa nie wynika jednak z rozbudowanej analizy syntetycznej, lecz z materiału zawartego w publikacjach i badaniach uzupełniających. To powoduje, że szczególnie ważna staje się jakość komentarza łączącego poszczególne prace w jedno osiągnięcie. To jest moment, w którym jako czytelnik zaczynam się zastanawiać, co właściwie stanowi wspólny rdzeń tego doktoratu. Część syntetyczna jest miejscami bardziej zestawieniem wyników niż pogłębioną analizą mechanizmów, zależności i wspólnych zasad projektowania kompozytów z materiałami odpadowymi.

3. Znaczenie i aktualność podjętej tematyki

Tematyka rozprawy jest aktualna i ważna. Ograniczenie wykorzystania surowców pierwotnych, zmniejszenie udziału klinkieru w spoiwach, wykorzystanie przemysłowych strumieni odpadowych oraz zagospodarowanie trudnych do recyklingu kompozytów polimerowych należą do najważniejszych kierunków rozwoju współczesnej inżynierii materiałów budowlanych. Dotyczy to w szczególności sytuacji, w której maleje dostępność klasycznych dodatków mineralnych, takich jak popioły lotne, a jednocześnie rośnie presja na ograniczenie emisji i zużycia kruszyw naturalnych.

Dobór kilku grup odpadów ma praktyczne uzasadnienie. Żużel pomiedziowy występuje w Polsce w znacznych ilościach i charakteryzuje się właściwościami pozwalającymi rozważać jego wykorzystanie zarówno w postaci kruszywa, jak i materiału drobnoziarnistego. Szkło odpadowe może stanowić źródło krzemionki oraz zamiennik części frakcji mineralnych. Odpady gumowe są problematyczne środowiskowo i od lat analizowane jako składnik betonów specjalnych. Z kolei odpady z łopat turbin wiatrowych będą w najbliższych latach narastającym strumieniem materiałowym, a ich mechaniczny recykling prowadzi do powstawania zarówno proszków, jak i frakcji włóknistych.

Aktualność problematyki nie jest jednak równoznaczna z oryginalnością naukową. Sam fakt wykorzystania odpadu w kompozycie cementowym nie jest już dziś wystarczającym elementem nowości naukowej. W literaturze światowej istnieje bardzo duża liczba prac dotyczących szkła odpadowego, gumy, żużli hutniczych i włókien z recyklingu. O wartości rozprawy decyduje więc to, czy Doktorant wykazał nowy mechanizm, opracował nową metodykę oceny, zdefiniował

wiarygodne zakresy stosowania lub sformułował zasady projektowania, których nie można było wyprowadzić z dotychczasowego stanu wiedzy.

W rozprawie oryginalność ma przede wszystkim charakter materiałowo-aplikacyjny i częściowo porównawczy. Najbardziej interesujące elementy dotyczą długoterminowych badań betonu z kruszywem z żużla pomiedziowego, wykorzystania materiałów pochodzących z recyklingu łopat turbin wiatrowych oraz zestawienia różnych sposobów wykorzystania odpadów w kompozytach cementowych. Nie znalazłem natomiast w części syntetycznej jednej wyraźnie zdefiniowanej luki badawczej, której rozwiązanie stanowiłoby wspólny rdzeń wszystkich ośmiu publikacji. Nie zmienia to faktu, że Doktorant zrealizował szeroki i ambitny program badań, a zestawienie w jednej rozprawie tak odmiennych strumieni materiałowych daje interesującą perspektywę porównawczą

4. Ocena merytoryczna i uwagi krytyczne

4.1. Spójność cyklu publikacyjnego i konstrukcja rozprawy

Autor stwierdza, że osiem publikacji tworzy spójny cykl powiązanych tematycznie. Osiem publikacji niewątpliwie łączy wykorzystanie materiałów odpadowych w matrycy cementowej. Pytanie brzmi jednak, czy jest to jeszcze wspólny problem naukowy, czy już przede wszystkim wspólny obszar badawczy. Spójność tematyczna nie jest jednak tak silna na poziomie problemu naukowego. Inny mechanizm odpowiada za zachowanie mielonego szkła jako drobnoziarnistego dodatku, inny za pracę ciężkiego kruszywa żużlowego, inny za obniżenie sztywności betonu z gumą, a jeszcze inny za mostkowanie rys przez odzyskane włókna węglowe. W efekcie wspólny mianownik cyklu jest bardzo szeroki: „materiały odpadowe w kompozytach cementowych”. Taki zakres jest dopuszczalny, ale wymagałby od części syntetycznej znacznie mocniejszej integracji. Oczekiwałbym przykładowo zaproponowania wspólnej klasyfikacji materiałów według funkcji (reaktywny dodatek, obojętny wypełniacz, kruszywo, materiał podatny, zbrojenie), mechanizmu oddziaływania z matrycą, wpływu na bilans objętościowy, właściwości strefy przejściowej i dominującego mechanizmu zniszczenia. Takiej syntezy w pracy brakuje.

Dodatkową kwestią jest włączenie do zasadniczej narracji wyników, które nie były częścią cyklu publikacyjnego. Dotyczy to m.in. badań mielonego żużla pomiedziowego, drobnego kruszywa z żużla, stłuczki szklanej w zaprawach, stłuczki szklanej w betonach oraz ścieru gumowego. Autor wyraźnie zaznacza, że są to badania własne niepublikowane, mające uzupełnić zakres i zapewnić spójność pracy. Jest to rozwiązanie dopuszczalne i samo w sobie pozytywne, ponieważ rozprawa nie jest mechanicznym zszyciem publikacji. Powstaje jednak pytanie, co dokładnie należy uznać za główne osiągnięcie doktorskie: osiem publikacji czy szerszy, częściowo niepublikowany program badawczy. W mojej ocenie rozprawa powinna była to rozgraniczyć bardziej jednoznacznie.

4.2. Stan wiedzy i zastosowane piśmiennictwo

Najpoważniejszą słabością redakcyjno-naukową części syntetycznej jest bardzo ograniczony przegląd stanu wiedzy. Rozdział 3 zajmuje jedynie kilka stron i obejmuje trzy krótkie podrozdziały dotyczące cementu, kruszywa i zbrojenia rozproszonego. Przy tak szerokim zakresie materiałowym jest to zdecydowanie za mało, aby na poziomie rozprawy doktorskiej wykazać, gdzie dokładnie znajduje się luka badawcza.

Bibliografia części syntetycznej obejmuje zaledwie kilkadziesiąt pozycji, z czego część stanowią raporty, normy i materiały ogólne. Oczywiście znacznie szersze piśmiennictwo znajduje się w załączonych artykułach, ale nie zastępuje to krytycznego przeglądu literatury w tekście integrującym cykl. Dotyczy to zwłaszcza badań nad żużlem pomiedziowym, szkłem odpadowym, gumobetonem i recyklingiem łopat turbin, dla których istnieją rozbudowane, wieloletnie nurty badawcze. W części przeglądowej brakuje również systematycznego odniesienia do problemów, które później stają się istotne dla interpretacji wyników: reaktywności pucolanowej i jej metod oceny, reakcji alkalia–krzemionka w przypadku szkła, oddziaływania powierzchni i strefy przejściowej w betonach z gumą, wpływu gęstości kruszywa żużlowego na bilans objętościowy mieszanek, trwałości chemicznej i potencjalnej wymywalności składników żużla, a także mechanizmów adhezji i pull-out włókien odzyskanych z kompozytów.

W pracy pojawiają się nowe pozycje z lat 2024–2025, co oceniam pozytywnie. Jednocześnie ich obecność ma raczej charakter punktowy. Stan wiedzy powinien prowadzić do sformułowania pytań badawczych i uzasadniać dobór zmiennych, a nie jedynie wprowadzać ogólne informacje o emisji cementu, wydobyciu kruszyw i popularności włókien.

4.3. Ocena tez, celu i zadań badawczych

W rozprawie sformułowano dwie tezy. Pierwsza mówi, że częściowe zastąpienie składników kompozytów cementowych materiałami z recyklingu pozwala uzyskać właściwości mechaniczne i trwałościowe porównywalne z kompozytami tradycyjnymi. Druga zakłada, że surowce z recyklingu mogą pełnić funkcję pełnowartościowych składników kompozytów cementowych. Obie tezy są bardzo szerokie i mają w dużej mierze charakter aplikacyjny.

Pierwsza teza jest w istocie warunkowa: dla odpowiednio dobranego materiału i odpowiednio małej lub optymalnej zawartości prawie zawsze można znaleźć zakres, w którym przynajmniej część właściwości pozostaje porównywalna. Nie zdefiniowano jednak, co oznacza „porównywalne”. Czy jest to różnica do 5%, 10% lub 20%, brak statystycznej istotności różnicy, zachowanie tej samej klasy wytrzymałości, czy spełnienie wymagań dla konkretnego zastosowania? Bez takiego kryterium teza jest trudna do jednoznacznej falsyfikacji. Druga teza jest jeszcze bardziej ogólna. Pojęcie „pełnowartościowy składnik” nie zostało zoperacjonalizowane. Dla kruszywa mogłoby oznaczać spełnienie wymagań normowych dla określonego zastosowania, dla dodatku mineralnego – określony poziom aktywności i zgodność z wymaganiami dla składnika cementu, a dla zbrojenia rozproszonego udokumentowane parametry resztkowe i zdolność do przenoszenia naprężeń po zarysowaniu. Tymczasem w rozprawie termin ten jest używany szerzej, jako ogólna przydatność materiału.

Cel pracy określono jako wyznaczenie optymalnego poziomu dozowania materiałów odpadowych pełniących rolę substytutu cementu, kruszywa lub zbrojenia rozproszonego, przy którym można zachować lub uzyskać właściwości porównywalne z materiałami tradycyjnymi. Sformułowanie to jest ambitne, ale zastosowana metodyka nie odpowiada w pełni pojęciu optymalizacji. W większości przypadków badano serię dyskretnych poziomów dozowania i wybierano najkorzystniejszy zakres na podstawie wybranych właściwości. Nie zdefiniowano funkcji celu, wag kryteriów, warunków ograniczających ani procedury optymalizacji wielokryterialnej.

Mam tutaj pewien problem ze słowem „optymalny”. Jeżeli przebadano kilka poziomów dozowania i jeden z nich okazał się najlepszy, mamy najlepszy wariant spośród przebadanych,

ale jeszcze niekoniecznie optimum. Jest to akceptowalne w języku inżynierskim, ale naukowo należałoby używać ostrożniejszej terminologii: „najkorzystniejszy w analizowanym zakresie” albo „rekomendowany zakres dozowania w przyjętych warunkach”.

4.4. Ocena metodologii badań

Rozdział zatytułowany „Metodologia” jest zaskakująco krótki. Autor odsyła w nim do procedur opisanych w poszczególnych publikacjach i wskazuje, że korzystano z obowiązujących norm PN-EN lub EN. Formalnie jest to zrozumiałe dla rozprawy opartej na cyklu publikacji, jednak z punktu widzenia czytelnika rozprawy oznacza brak jednego, spójnego opisu logiki eksperymentu. Przy tak zróżnicowanym materiale potrzebna byłaby tabela zbiorcza obejmująca dla każdej grupy odpadu: źródło i sposób przygotowania, charakterystykę chemiczną/mineralogiczną i fizyczną, podstawę dozowania (masa czy objętość), skład serii referencyjnej, liczbę próbek, wiek badania, normę, liczbę powtórzeń oraz sposób analizy statystycznej. Takiego zestawienia w rozprawie jednak zabrakło. Brak takiego zestawienia utrudnia porównanie poszczególnych eksperymentów i ocenę, czy wnioski ogólne są oparte na porównywalnej jakości danych.

W niektórych pracach zastosowano rozbudowaną analizę statystyczną, przykładowo w badaniach szkła odpadowego wykorzystano plan eksperymentu i analizę istotności. W innych częściach wyniki przedstawiane są przede wszystkim jako pojedyncze wartości średnie i procentowe zmiany, bez spójnej informacji o odchyleniach standardowych, przedziałach ufności i istotności różnic. Tym samym jakość analizy statystycznej w całym cyklu jest nierówna.

Za dyskusyjne uważam częste używanie określeń „istotny wzrost”, „istotny spadek” i „wyraźny wpływ” w części syntetycznej, jeśli w danym przypadku nie towarzyszy temu formalna analiza statystyczna. W języku pracy naukowej słowo „istotny” powinno być zarezerwowane dla istotności statystycznej albo jednoznacznie opisane jako znaczenie techniczne.

W badaniach granulatu SBR pojawia się problem interpretacyjny wynikający ze sposobu budowy receptur. Wraz ze wzrostem udziału gumy zmniejszano równocześnie ilość cementu, wody, piasku, obu frakcji kruszywa i popiołu lotnego. Zachowywano proporcje składników mineralnych, ale zmieniała się ich bezwzględna ilość w 1 m3 mieszanki. Jeżeli zabieg był realizowany jako substytucja objętościowa części całego szkieletu materiałowego przez gumę, powinno to zostać bardzo precyzyjnie wyjaśnione wraz z bilansem objętościowym. Bez tego część spadku wytrzymałości może być interpretowana nie tylko jako efekt obecności gumy i słabej strefy przejściowej, lecz także zmienionej zawartości spoiwa na jednostkę objętości.

W tym samym fragmencie znajduje się ponadto wewnętrzna niespójność danych dotyczących konsystencji. Najpierw podano, że mieszanka z 20% gumy uzyskała konsystencję S3 i opad stożka 130 mm, a w następnym zdaniu stwierdzono, że mieszanki zawierające 10 i 20% granulatu miały klasę S2, z opadem odpowiednio 70 i 80 mm. Tego typu sprzeczność powinna zostać wyjaśniona podczas obrony.

W odniesieniu do szkła odpadowego należy rozróżnić dodatek od substytucji. W części 4.1 mielone szkło wprowadzano jako dodatek w stosunku do stałej ilości cementu, bez zmniejszenia ilości cementu portlandzkiego. Nie można więc na podstawie tego eksperymentu mówić o ograniczeniu zużycia cementu ani bezpośrednio o redukcji śladu węglowego. Jest to ważne, ponieważ w części ogólnej i końcowej rozprawy te dwa poziomy interpretacji miejscami się zacierają.

W badaniach włókien węglowych z recyklingu bardzo interesująca jest analiza orientacji względem kierunku betonowania. Jednak dla sformułowania daleko idących wniosków konstrukcyjnych oczekiwałbym metod ukierunkowanych na zachowanie po zarysowaniu: krzywych obciążenie–CMOD, parametrów resztkowych, energii pękania wyznaczonej zgodnie z uznaną procedurą oraz badań pull-out lub przynajmniej ilościowej charakterystyki długości, średnicy, powierzchni i orientacji włókien w stwardniałym kompozycie. Sam wzrost wytrzymałości na zginanie lub rozłupywanie nie jest jeszcze wystarczającą podstawą do określenia materiału jako zbrojenia konstrukcyjnego.

4.5. Ocena wyników dotyczących materiałów drobnoziarnistych zastępujących lub uzupełniających cement

Badania mielonego szkła stanowią jedną z mocniejszych części rozprawy, szczególnie tam, gdzie wykorzystano dwuczynnikowy plan eksperymentalny i analizowano łącznie wpływ W/C oraz GP/C. Wykazano, że przy odpowiednim doborze obu parametrów można uzyskać wzrost wytrzymałości i poprawę mrozoodporności. Zaletą jest również powiązanie mrozoodporności z charakterystyką porów powietrznych. Interpretacja wymaga jednak ostrożności. W układzie, w którym szkło dodawano bez redukcji cementu, poprawa wytrzymałości może wynikać z kilku nakładających się efektów: wypełnienia, zmiany efektywnego stosunku wody do całkowitej ilości materiału drobnoziarnistego, reakcji pucolanowej oraz zmiany struktury porów. Bez badań mineralogicznych i mikrostrukturalnych nie można jednoznacznie rozdzielić tych mechanizmów.

W części porównującej popiół lotny z mielonym szkłem zastosowano stały W/C i dwie zawartości dodatku. Wyniki po 28 dniach były zbliżone, natomiast szkło wyraźnie poprawiało mrozoodporność w porównaniu z badaną serią z popiołem lotnym. Jest to interesujący rezultat, lecz wniosek o „zastępowaniu popiołu” powinien być ograniczony do konkretnych warunków recepturowych i klasy betonu. Nie badano szeregu innych cech istotnych dla zamienności, takich jak długoterminowy rozwój wytrzymałości, skurcz, karbonatyzacja, transport chlorków, itp. W moim odczuciu szczególnie ostrożnie należy traktować stwierdzenie, że wolniejszy przyrost wytrzymałości w betonie ze szkłem może ograniczać skurcz. Skurczu nie badano. Jest to hipoteza interpretacyjna, nie wynik rozprawy. Analogicznie pucolanowy mechanizm działania materiału powinien być potwierdzony odpowiednimi badaniami, a nie tylko wnioskowany z trendu wytrzymałości.

Interesujące są niepublikowane wyniki mielonego żużla pomiedziowego. Przy zawartości 50–60% uzyskano wzrosty wytrzymałości na ściskanie i obniżenie nasiąkliwości. Rezultaty te są na tyle nietypowe i potencjalnie ważne, że wymagałyby bardziej pogłębionej interpretacji. Jeżeli materiał zastępuje znaczną część cementu lub jest dodawany w bardzo dużej ilości, należałoby jednoznacznie wyjaśnić podstawę dozowania oraz mechanizm odpowiedzialny za wzrost wytrzymałości. Sama powierzchnia właściwa Blaine’a nie daje odpowiedzi na pytanie o reaktywność żużla.

4.6. Ocena wyników dotyczących zastępowania kruszywa

Część dotycząca żużla pomiedziowego jako kruszywa oceniam wysoko pod względem zakresu eksperymentalnego. Na szczególną uwagę zasługują wyniki po bardzo długim okresie dojrzewania, sięgającym około ośmiu lat. To jest jeden z tych wyników, które rzeczywiście zwróciły moją uwagę. Ośmioletnia perspektywa badawcza w pracach materiałowych pojawia się rzadko i stanowi niewątpliwie dużą wartość rozprawy. Badano również mrozoodporność,

nasiąkliwość i reaktywność alkaliczną. Jednocześnie określenie żużla pomiedziowego jako „bezpiecznego” zamiennika kruszywa jest zbyt szerokie, jeśli bezpieczeństwo ma obejmować wszystkie aspekty użytkowe i środowiskowe. Badanie reaktywności alkalicznej nie zastępuje oceny wymywalności potencjalnie mobilnych składników ani analizy środowiskowej. W zależności od pochodzenia żużla istotna może być stabilność chemiczna i możliwość uwalniania metali. Rozprawa koncentruje się na bezpieczeństwie materiałowym w sensie właściwości betonu, a nie na pełnym bezpieczeństwie środowiskowym.

Wnioski o możliwości stosowania w betonach konstrukcyjnych powinny być również odnoszone do konkretnych klas ekspozycji i wymagań. Zachowanie wytrzymałości, nasiąkliwości i mrozoodporności to ważne przesłanki, ale nie pełny zestaw kryteriów trwałości. I tu dochodzimy do ograniczenia tych wyników. Brakuje bowiem m.in. karbonatyzacji, migracji chlorków, skurczu, pełzania, odporności chemicznej i długoterminowej stabilności objętościowej. Badania stłuczki szklanej jako zamiennika kruszywa są ciekawe, ale w tym przypadku szczególnego znaczenia nabiera ryzyko reakcji alkalia–krzemionka. Sama obserwacja wytrzymałości i nasiąkliwości nie jest wystarczająca do rekomendacji wysokich poziomów substytucji. Jeżeli autor wskazuje zakres 50–75% jako najkorzystniejszy, powinien jednoznacznie odnieść go do warunków alkalicznych.

4.7. Ocena wyników dotyczących odpadów gumowych

Badania pyłu, granulatu i ścieru gumowego pokazują konsekwentnie, że zwiększenie udziału SBR prowadzi do znacznego spadku wytrzymałości i gęstości, przy jednoczesnej zmianie kruchości, przewodności cieplnej i w niektórych przypadkach mrozoodporności. Kierunek zmian jest zgodny z mechaniką kompozytu zawierającego miękką, hydrofobową fazę o słabej przyczepności do zaczynu.

Wartością pracy nie jest więc samo wykazanie spadku wytrzymałości (jest to zjawisko dobrze znane) lecz próba określenia zakresów, w których utrata właściwości mechanicznych może być akceptowana w zamian za niższą gęstość lub lepszą izolacyjność. Problem polega na tym, że pojęcie „akceptowalności” nie zostało powiązane z konkretnym zastosowaniem i minimalnymi wymaganiami użytkowymi.

Wątpliwości budzi także interpretacja wskaźnika kruchości. W pracy jest on oparty na relacji wytrzymałości na zginanie lub rozciąganie do wytrzymałości na ściskanie. Wzrost tego ilorazu przy bardzo silnym spadku wytrzymałości na ściskanie może sugerować mniejszą „kruchość” w sensie relacji dwóch wytrzymałości, ale nie oznacza automatycznie większej ciągliwości, energii pękania czy zdolności do pracy po zarysowaniu. Moim zdaniem Doktorant idzie tutaj we wniosku o jeden krok dalej, niż pozwalają na to wykonane badania. Do takiego wniosku potrzebne byłyby bezpośrednie pomiary deformacji i przebiegu zniszczenia.

W rozdziale podsumowującym pojawia się stwierdzenie o zdolności materiałów gumowych do absorpcji energii i tłumienia drgań. Jest to prawdopodobne fizycznie i zgodne z literaturą, ale w przedstawionym programie badań nie wykonano badań dynamicznych ani tłumienia. Należy wyraźnie oddzielić właściwości zmierzone od potencjalnych zastosowań wynikających z wiedzy literaturowej.

4.8. Ocena wyników dotyczących włókien z recyklingu łopat turbin wiatrowych

Gdybym miał wskazać część rozprawy, którą czytałem z największym zainteresowaniem, byłyby to właśnie badania materiałów odzyskanych z łopat turbin wiatrowych. Problem zagospodarowania łopat turbin wiatrowych jest narastający, a zachowanie wartościowej frakcji włóknistej po recyklingu mechanicznym może mieć znaczenie zarówno materiałowe, jak i środowiskowe.

W przypadku proszków WPM i PPM obserwowano pogorszenie urabialności, wzrost nasiąkliwości przy wysokich zawartościach i spadek wytrzymałości. Hipoteza o działaniu drobnych frakcji włóknistych jako mikrozbrojenia w odniesieniu do wzrostu wczesnej wytrzymałości na zginanie jest ciekawa, ale nie została bezpośrednio potwierdzona charakterystyką morfologiczną i analizą mikrostrukturalną. Z kolei włókna węglowe wykazują bardziej obiecujący efekt. W pracy pokazano wpływ długości i orientacji włókien oraz wzrost wybranych parametrów związanych z odpornością na zarysowanie. Zwracam jednak uwagę na niespójność między tabelarycznym podsumowaniem a opisem tekstowym dotyczącym kierunku rozciągania przy rozłupywaniu. Tabela wskazuje brak zmiany dla jednego kierunku i silny wzrost dla drugiego, podczas gdy tekst poniżej opisuje relację odwrotnie. Wymaga to sprostowania.

Daleko idące jest stwierdzenie, że włókna wykazują „wysoką przydatność w zastosowaniach konstrukcyjnych”. Aby taką tezę obronić, należałoby przeprowadzić badania właściwe dla fibrobetonów konstrukcyjnych, zwłaszcza charakterystyki post-cracking i parametrów resztkowych, ocenić rozrzut orientacji, przyczepność włókno–matryca, wpływ technologii mieszania na degradację włókien oraz trwałość w środowisku alkalicznym. Obecne wyniki pokazują potencjał konstrukcyjny, ale nie są jeszcze wystarczającą podstawą do rekomendowania zastosowania konstrukcyjnego.

4.9. Ocena syntezy wyników, oryginalności i mechanizmów materiałowych

Tabele 14–16 stanowią użyteczną próbę syntetycznego zestawienia wpływu poszczególnych odpadów na właściwości kompozytów. Są czytelne i pozwalają szybko zorientować się w kierunkach zmian. Ich słabością jest jakościowy charakter skali: wzrost, silny wzrost, spadek, silny spadek, wpływ zależny od ilości. Nie podano progów, według których klasyfikowano zmiany do poszczególnych kategorii.

W kilku miejscach mechanizmy są opisywane w sposób intuicyjny, ale nie w pełni udokumentowany. Przykładowo korzystny wpływ kruszywa pomiedziowego wiązany jest z rozwojem mikrostruktury, mimo że w części syntetycznej brakuje bezpośredniej analizy strefy przejściowej. Spadek wytrzymałości betonów gumowych tłumaczony jest słabą przyczepnością, ale nie pokazano badań tej przyczepności. Wpływ mielonego szkła łączony jest z reakcjami pucolanowymi, jednak bez spójnego zestawu badań potwierdzających stopień reakcji.

Oryginalność rozprawy widzę zatem przede wszystkim w rozległym programie eksperymentalnym i zastosowaniu konkretnych strumieni odpadowych, w tym materiałów z recyklingu łopat turbin, oraz w długoterminowych danych dla żużla pomiedziowego. Na szczególne uznanie zasługuje konsekwencja w prowadzeniu badań długoterminowych. Wyniki uzyskane po około ośmiu latach są rzadkością w pracach doktorskich i stanowią istotną wartość tej rozprawy. Mniejsza jest natomiast oryginalność na poziomie teorii i mechanizmów. Rozprawa nie proponuje nowego modelu materiałowego, uniwersalnego parametru oceny przydatności odpadu ani nowej metody optymalizacji.

4.10. Ocena twierdzeń środowiskowych i możliwości praktycznego zastosowania

Autor wielokrotnie odwołuje się do ograniczenia emisji CO2, zmniejszenia śladu węglowego i korzyści środowiskowych. Kierunek wnioskowania jest przekonujący, ale intuicja środowiskowa nie zastępuje LCA. Co więcej, sam Autor w propozycjach przyszłych badań wskazuje LCA i LCCA jako element, który dopiero powinien zostać przeprowadzony. Jest to ważna okoliczność interpretacyjna, ale moim zdaniem:

- Nie można w sposób ilościowy stwierdzić na podstawie tej rozprawy, że konkretna receptura ma niższy ślad węglowy. Dla mielonego szkła lub żużla trzeba uwzględnić energię suszenia, kruszenia i mielenia, transport, ewentualne procesy sortowania, a także wpływ zmiany trwałości na cykl życia elementu. Dla odpadów z łopat turbin dochodzi energochłonność rozdrabniania i separacji. Dla gumy obniżenie właściwości mechanicznych może prowadzić do konieczności zwiększenia przekroju lub ograniczenia zastosowania, co również wpływa na ocenę środowiskową,
- Szczególnie nieuprawnione byłoby przypisywanie korzyści klimatycznej eksperymentom, w których materiał odpadowy dodawano bez redukcji ilości cementu. W takim przypadku wzrost masy materiału i dodatkowe przetwarzanie odpadu mogą nawet zwiększyć oddziaływanie środowiskowe na jednostkę produktu. Rozprawa pokazuje potencjał do redukcji zużycia surowców, ale nie ilościowo udowodnioną redukcję śladu węglowego dla wszystkich badanych rozwiązań.
- Należy ostrożnie formułować wnioski wdrożeniowe. Wykazanie korzystnej wytrzymałości i mrozoodporności jest etapem koniecznym, ale nie wystarczającym do wdrożenia materiału budowlanego. Potrzebna jest ocena powtarzalności strumienia odpadu, zgodności normowej, reakcji w długim okresie, trwałości w konkretnych klasach ekspozycji, bezpieczeństwa środowiskowego, skalowalności procesu oraz ekonomiki.

Autor sam trafnie wskazuje te obszary w rozdziale o przyszłych badaniach.

4.11. Ocena samodzielności naukowej Doktoranta

Zestawienie wkładów autorskich jest szczegółowe i pozwala ocenić rozwój roli Doktoranta. W pierwszych publikacjach jego udział w koncepcji i zbieraniu danych był wysoki, ale udział w pisaniu pierwszej wersji tekstu stosunkowo niski. W późniejszych pracach rola staje się większa, a P8 jest pracą jednoautorską. P7 ma Doktoranta jako pierwszego autora.

Taki przebieg jest typowy dla rozwoju młodego badacza i wskazuje na osiągnięcie samodzielności pod koniec cyklu. Z drugiej strony w P3 i P5 udział ogólny wynosi 40%, a w części interpretacyjnej i koncepcyjnej deklarowano udziały po 50% lub mniej. Dlatego nie wszystkie pojedyncze publikacje mogłyby samodzielnie stanowić silny dowód samodzielności. Ocenę należy jednak opierać na całym cyklu, badaniach niepublikowanych i ewolucji wkładu, a ta łącznie wypada pozytywnie.

Podczas obrony oczekiwałbym, że Doktorant samodzielnie i bez odwoływania się do współautorów wyjaśni kluczowe decyzje metodologiczne, w szczególności podstawę projektowania receptur, kryteria uznawania poziomu dodatku za optymalny, mechanizmy działania mielonego szkła i żużla oraz sposób interpretacji wyników dla włókien i gumy.

4.12. Uwagi redakcyjne i terminologiczne

Rozprawa jest zasadniczo czytelna, jednak wymagałaby staranniejszej korekty językowej. W tekście występują liczne drobne błędy fleksyjne, interpunkcyjne i składniowe, przykładowo „organicznie odpadów", „zwiększa zwiększenia trwałość", „w rożną zawartością", „po 28 dnach", a także niezręczne konstrukcje zdaniowe. Występują również niekonsekwencje w nazewnictwie: „mielony żużel pomiedziowy", „mielone kruszywo pomiedziowe", „mączka", „substytut".

Istotniejsze od literówek są niejednoznaczności terminologiczne wpływające na interpretację. Należy konsekwentnie odróżnić dodatek zwiększający całkowitą ilość części stałych od substytutu rzeczywiście zastępującego cement lub kruszywo. W przypadku włókien trzeba odróżnić wzrost wytrzymałości na zginanie od pełnienia funkcji zbrojenia konstrukcyjnego. W przypadku „kruchości" należy zaznaczyć, że zastosowany wskaźnik jest uproszczonym wskaźnikiem relacji wytrzymałości, a nie bezpośrednią miarą ciągliwości.

5. Zagadnienia i pytania do dyskusji podczas publicznej obrony

1) Gdyby miał Pan w jednym zdaniu wskazać główną lukę badawczą rozprawy, to jak by ją Pan sformułował? Innymi słowy: co łączy osiem publikacji na poziomie problemu naukowego, a nie wspólnego hasła wykorzystania materiałów odpadowych w kompozytach cementowych?
2) Chciałbym trochę sprowokować Pana słowem „optymalny". Czy rzeczywiście przeprowadził Pan optymalizację, czy raczej wskazał najlepszy wariant spośród tych, które zostały przebadane? Jak należałoby zaprojektować badania, aby można było mówić o rzeczywistej optymalizacji wielokryterialnej?
3) Co właściwie oznacza w rozprawie określenie „pełnowartościowy składnik kompozytu cementowego"? Czy można zastosować jedno kryterium do cementu, kruszywa i zbrojenia, czy dla każdej z tych funkcji należałoby zdefiniować odrębne wymagania?
4) Wyniki dla mielonego szkła są interesujące, ale szkło było w części badań dodawane bez zmniejszania ilości cementu. Gdzie w takim razie przebiega granica między wykazaniem korzystnego wpływu odpadu a wykazaniem rzeczywistej korzyści środowiskowej? Czy bez LCA można mówić o redukcji śladu węglowego?
5) Bardzo korzystne wyniki uzyskano dla wysokiego udziału mielonego żużla pomiedziowego. Jak Pan wyjaśnia ten efekt od strony mechanizmu materiałowego? Co, Pana zdaniem, dominuje: efekt wypełnienia, zmiana upakowania, reakcja chemiczna, zmiana efektywnego W/C czy jeszcze inny mechanizm? I jakie jedno dodatkowe badanie wykonałby Pan, aby to rozstrzygnąć?
6) W przypadku gumy mam pytanie bardziej fundamentalne: czy wzrost stosunku wytrzymałości na rozciąganie lub zginanie do wytrzymałości na ściskanie rzeczywiście oznacza, że materiał staje się mniej kruchy? Co należałoby zmierzyć, żeby móc mówić o większej ciągliwości lub zdolności do absorpcji energii?
7) Gdyby miał Pan przekonać projektanta konstrukcji, że odzyskane włókna węglowe z łopat turbin mogą rzeczywiście pełnić funkcję zbrojenia konstrukcyjnego, jakich wyników jeszcze brakuje? Czy obecne badania pokazują już „zbrojenie", czy raczej bardzo obiecujący materiał włóknisty?
8) Gdyby miał Pan usunąć z rozprawy siedem publikacji i zostawić tylko jedną jako najważniejsze osiągnięcie doktoratu, to którą by Pan zostawił i dlaczego?

9) Gdyby jutro zgłosił się do Pana producent betonu i powiedział: „chcę wdrożyć jedno z rozwiązań z tej rozprawy”, które by Pan wybrał? A czego najbardziej obawiałby się Pan przed takim wdrożeniem?
10) Gdyby rozprawa miała powstać dzisiaj od początku i miał Pan możliwość zmienić jeden element programu badawczego, co zrobiłby Pan inaczej? Jakiego badania najbardziej Panu dziś brakuje, żeby wnioski rozprawy były mocniejsze?

6. Konkluzja recenzji

Podsumowując, rozprawa doktorska mgr inż. Filipa Szmatuły dotyczy ważnego i aktualnego zagadnienia wykorzystania materiałów pochodzących z recyklingu odpadów w kompozytach cementowych. Jej mocną stroną jest szeroki program eksperymentalny, obejmujący kilka grup odpadów i różne funkcje materiałowe, a także zgromadzenie wyników długoterminowych dla betonu z kruszywem z żużla pomiedziowego. Pozytywnie oceniam również podjęcie problematyki recyklingu łopat turbin wiatrowych oraz stopniowy wzrost samodzielności Doktoranta widoczny w strukturze autorstwa publikacji.

Rozprawa nie jest jednak wolna od istotnych słabości. Stan wiedzy w części syntetycznej jest zbyt krótki w stosunku do szerokości problemu. Tezy są bardzo ogólne, a pojęcia „pełnowartościowy składnik”, „porównywalne właściwości” i „optymalny poziom dozowania” nie zostały dostatecznie zdefiniowane. Metodyka całego cyklu nie została przedstawiona w sposób jednolity, a poziom analizy statystycznej różni się między poszczególnymi częściami. W kilku miejscach interpretacja mechanizmów wykracza poza bezpośrednio wykonane badania. Szczególnie należy ograniczyć kategoryczność twierdzeń o redukcji śladu węglowego, skoro nie wykonano LCA, oraz twierdzeń o konstrukcyjnym zastosowaniu odzyskanych włókien bez pełnej charakterystyki zachowania po zarysowaniu. Pomimo licznych uwag krytycznych chcę powiedzieć wyraźnie: za tą rozprawą stoi bardzo duży i konsekwentnie zrealizowany program eksperymentalny. Tego chciałbym pogratulować zarówno Doktorantowi, jak i jego Promotorom.

Wskazane zastrzeżenia nie przekreślają jednak wartości naukowej pracy. Doktorant wykazał umiejętność planowania i realizacji badań eksperymentalnych, analizy wyników oraz publikowania ich w czasopismach naukowych. Cykl jako całość, uzupełniony wynikami niepublikowanymi, pozwala uznać, że Doktorant posiada ogólną wiedzę teoretyczną w zakresie inżynierii materiałów budowlanych oraz potrafi samodzielnie prowadzić pracę naukową. Oryginalność osiągnięcia ma przede wszystkim charakter eksperymentalny i aplikacyjny, a w mniejszym stopniu mechanistyczny.

W mojej ocenie rozprawa spełnia wymagania stawiane pracom doktorskim określone w Ustawie z dnia 20 lipca 2018 r. Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce. Wnoszę zatem o przyjęcie rozprawy doktorskiej mgr inż. Filipa Szmatuły i dopuszczenie Doktoranta do dalszych etapów postępowania, w tym do publicznej obrony.

ŁUKASZ MARIUSZ SADOWSKI

Elektronicznie podpisany przez ŁUKASZ MARIUSZ SADOWSKI
Data: 2026.08.21 07:57:43 +02'00'