

dr hab. inż. Beata Łaźniewska-Piekarczyk, prof. PŚ
Katedra Procesów Budowlanych i Fizyki Budowli
Wydział Budownictwa
Politechnika Śląska
ul. Akademicka 5
44-100 Gliwice

Gliwice, dn. 07.09.2025

RECENZJA ROZPRAWY DOKTORSKIEJ

Rada Dyscypliny Inżynieria Materiałowa
Politechnika Krakowska im. Tadeusza Kościuszki
ul. Warszawska 24
31-155 Kraków

Dotyczy: recenzji rozprawy doktorskiej mgr inż. Kingi Setlak
pt. „Synteza spoiw geopolimerowych na bazie odpadów przemysłowych”

Na podstawie postanowienia Rady Dyscypliny Inżynieria Materiałowa Politechniki
Krakowskiej z dnia 8 lipca 2025 r., zostałam wyznaczona recenzentem w postępowaniu
w sprawie nadania stopnia doktora w dziedzinie nauk inżynieryjno-technicznych,
w dyscyplinie inżynieria materiałowa.

Promotor rozprawy: dr hab. inż. Michał Łach, prof. PK.

Punkt 1. Ocena ogólna tematu i jego znaczenia

Tematyka rozprawy doktorskiej mgr inż. Kingi Setlak pt. „*Synteza spoiw geopolimerowych na bazie odpadów przemysłowych*” należy do zagadnień niezwykle aktualnych i ważnych dla współczesnej inżynierii materiałowej, a także szeroko pojętej inżynierii środowiska. Problem poszukiwania niskoemisyjnych, alternatywnych materiałów wiążących dla cementu portlandzkiego staje się jednym z kluczowych kierunków badawczych w kontekście wdrażania

strategii zrównoważonego rozwoju i gospodarki o obiegu zamkniętym. W tym kontekście praca wpisuje się bezpośrednio w priorytety badawcze wynikające z polityki klimatycznej UE (np. European Green Deal, Circular Economy Action Plan) oraz potrzeby przemysłu materiałów budowlanych ograniczającego zużycie cementu tradycyjnego.

Na szczególne podkreślenie zasługuje dobór tematu – autorka nie koncentruje się wyłącznie na klasycznych materiałach geopolimerowych, jak metakaolin czy żużel, lecz podejmuje próbę zagospodarowania odpadów mineralnych o niskiej reaktywności chemicznej. Surowce takie jak chalcedonit, diatomit czy amfibolit stanowią trudne do wykorzystania odpady poprodukcyjne, których obecność w bilansie odpadów przemysłowych w Polsce jest znacząca. Ich wykorzystanie do produkcji geopolimerów nie było dotąd szczegółowo analizowane, a zaproponowane przez autorkę kombinacje mieszanek wieloskładnikowych – np. Ch+D+PB, A+PB – pokazują istotny potencjał synergiczny, zarówno pod względem właściwości mechanicznych, jak i środowiskowych.

Praca wnosi wkład w rozwój wiedzy w obszarze chemii i technologii spoiw, a także w dziedzinie gospodarki odpadami. Z jednej strony, ukazuje nowe ścieżki aktywacji chemicznej materiałów mineralnych, z drugiej – demonstrowa praktyczne możliwości ich zastosowania w postaci spoiw konstrukcyjnych, odpornych na działanie czynników agresywnych i wysokich temperatur. Warto zaznaczyć, że autorka w sposób świadomy projektuje badania – nie tylko w wymiarze laboratoryjnym, ale z uwzględnieniem realiów aplikacyjnych: lokalnego pochodzenia surowców, ich dostępności i przemysłowych ograniczeń.

Zarówno we wstępie, jak i w rozdziale 1, autorka klarownie uzasadnia znaczenie pracy oraz nakreśla kontekst badawczy i społeczny projektu. Znaczenie tematu zostaje następnie udokumentowane wynikami – spoiwa z odpadów osiągają wytrzymałości rzędu 42 MPa, zachowując zwartą mikrostrukturę i niską nasiąkliwość (<9%), co wskazuje na ich potencjał jako zamienników cementu w środowiskach agresywnych. Przedstawione dane potwierdzają, że temat pracy ma nie tylko wartość poznawczą, ale również wysoki potencjał aplikacyjny.

Punkt 2. Charakterystyka celów pracy i ich realizacji

Cele rozprawy doktorskiej zostały sformułowane w sposób przejrzysty, kompleksowy i zgodny z wymogami stawianymi pracom naukowym w dziedzinie inżynierii materiałowej. Autorka

w rozdziale 1.2 wyodrębnia zarówno **cel główny**, jak i szereg **celów szczegółowych**, które obejmują wszystkie kluczowe aspekty projektu badawczego – od charakterystyki materiałów wyjściowych, przez syntezę geopolimerów, aż po ocenę właściwości i modelowanie predykcyjne. Takie podejście dowodzi dojrzałości w planowaniu eksperymentu oraz świadczy o zdolności autorki do zarządzania złożonym procesem badawczym.

Cel główny został określony jako opracowanie i ocena właściwości spoiw geopolimerowych powstałych w wyniku aktywacji alkalicznej surowców odpadowych o ograniczonej reaktywności. Ten ambitny cel został zrealizowany w pełni, o czym świadczą wyniki przedstawione w kolejnych rozdziałach pracy. Cele szczegółowe, odnoszące się m.in. do: charakterystyki chemicznej i mineralogicznej surowców, opracowania składu mieszanek geopolimerowych, określenia ich właściwości fizyczno-mechanicznych, odpornościowych i mikrostrukturalnych, jak również budowy modelu predykcyjnego, zostały konsekwentnie zrealizowane i logicznie przedstawione w strukturze rozprawy.

Struktura pracy została podporządkowana realizacji tych celów. Rozdział 3 zawiera dokładne informacje na temat właściwości fizykochemicznych surowców, takich jak skład tlenkowy (Tab. 3.1), udział faz krystalicznych (Tab. 3.2), czy mikromorfologia (Rys. 3.3–3.5). Rozdział 4 obejmuje szeroko zakrojone badania właściwości mechanicznych, nasiąkliwości, porowatości i odporności chemicznej, ilustrowane tabelami i wykresami (np. Tab. 4.3, Tab. 4.8, Tab. 4.12), natomiast rozdział 5 zawiera konstrukcję modelu matematycznego, opartego na stosunkach molowych Si/Al, Na/Al i H₂O/Na (Rys. 5.1–5.4), pozwalającego na predykcję wytrzymałości otrzymanych materiałów.

Każdy z celów został zrealizowany rzetelnie i udokumentowany wynikami eksperymentalnymi. Co ważne, autorka nie ogranicza się do opisu wyników, lecz je analizuje i wyciąga logiczne wnioski, co potwierdza nie tylko skuteczne osiągnięcie celów, ale również głębokie zrozumienie złożonych procesów zachodzących w badanych układach geopolimerowych.

Punkt 3. Opis zakresu i metodyki badań

Zakres badań zaprezentowany w rozprawie doktorskiej mgr inż. Kingi Setlak jest imponujący i obejmuje pełny cykl opracowania i oceny właściwości nowoczesnych spoiw geopolimerowych. Praca ma charakter wieloetapowy, eksperymentalny, a jej program

badawczy został zaplanowany kompleksowo – od wstępnej charakterystyki materiałów wyjściowych, przez projektowanie składu mieszanek, aż po ocenę ich właściwości mechanicznych, fizycznych, odpornościowych i mikrostrukturalnych. Obejmuje on zarówno analizę podstawowych parametrów inżynierskich, jak i złożone badania strukturalne i predykcyjne.

W rozdziale 3 autorka opisuje zastosowane materiały – odpady przemysłowe o zróżnicowanym pochodzeniu i właściwościach chemicznych, takie jak: popiół lotny brunatny (PB), metakaolin (MK), chalcedonit (Ch), diatomit (D) i amfibolit (A). Ich charakterystyka fizykochemiczna została przeprowadzona przy użyciu nowoczesnych metod: analiza składu chemicznego (XRF), składu fazowego (XRD), morfologii (SEM), porowatości (MIP) oraz wskaźników reaktywności alkalicznej. Dane z tabeli 3.1 (skład tlenkowy) i 3.2 (udział faz mineralnych) pokazują istotne różnice w zawartości SiO_2 i Al_2O_3 , co warunkuje późniejszą aktywność geopolimerową mieszanek. Rysunki 3.3–3.5 prezentują morfologię cząstek, która w przypadku diatomitu i chalcedonitu wskazuje na rozwiniętą porowatość i niejednorodność.

Metodyka badawcza obejmuje przygotowanie mieszanek geopolimerowych w różnych konfiguracjach: jedno-, dwu- i trójskładnikowych, aktywowanych alkalicznie roztworami NaOH i szkłem wodnym. Skład tych mieszanek został zaprojektowany w sposób systemowy, z zachowaniem określonych stosunków molowych i parametrów aktywacji (rozdział 3.3). Próbkę były dojrzewane w kontrolowanych warunkach ciepłno-wilgotnościowych (24 h w 75°C , następnie 27 dni w 20°C i 95% RH). Zastosowano normatywne procedury badawcze zgodne z PN-EN (np. 196-1 dla wytrzymałości), co świadczy o poprawności metodycznej.

Zakres testów obejmował m.in.: wytrzymałość na ściskanie i zginanie (Tab. 4.3), nasiąkliwość i porowatość (Tab. 4.8), odporność chemiczną w środowiskach kwaśnym, zasadowym i solnym (Tab. 4.12), oraz odporność cieplną do 1000°C (Rys. 4.22, 4.23). Mikrostruktura materiałów została oceniona poprzez analizę zdjęć SEM i histogramów porowatości. W rozdziale 5 zaprezentowano model regresji liniowej, opisujący zależność wytrzymałości od stosunków molowych Si/Al, Na/Al, $\text{H}_2\text{O}/\text{Na}$ (Rys. 5.1–5.4), co jest elementem wysoce innowacyjnym w tego typu badaniach.

Podsumowując, metodyka badań została zaplanowana i przeprowadzona w sposób zgodny z aktualnymi standardami naukowymi w dziedzinie inżynierii materiałowej. Autorka

zastosowała bogaty wachlarz technik analitycznych i właściwie je zinterpretowała. Badania objęły wszystkie niezbędne aspekty oceny nowych materiałów wiążących – od cech strukturalnych po zachowanie eksploatacyjne – co stanowi silny fundament do oceny skuteczności syntezy i potencjału aplikacyjnego opracowanych spoiw geopolimerowych.

Punkt 4. Ocena wyników i wniosków

Wyniki uzyskane w pracy mgr inż. Kingi Setlak są wielowymiarowe, spójne i w pełni odpowiadają zakresowi oraz celom badań sformułowanym we wstępie. Zostały one zaprezentowane w sposób bardzo przejrzysty i logiczny, a ich interpretacja świadczy o wysokim poziomie kompetencji Autorki w zakresie inżynierii materiałowej. Wyniki są przedstawione nie tylko w formie liczbowej, ale także zilustrowane graficznie, co znacząco ułatwia analizę porównawczą poszczególnych mieszanek i pozwala dostrzec zależności przyczynowo-skutkowe pomiędzy składem, strukturą a właściwościami spoiw geopolimerowych.

Najważniejszymi rezultatami są dane dotyczące wytrzymałości mechanicznej spoiw. W tabeli 4.3 zestawiono wartości wytrzymałości na ściskanie i zginanie dla kilkunastu układów jedno-, dwu- i trójskładnikowych. Szczególnie korzystne rezultaty osiągnięto w przypadku mieszanki Ch+D+PB, gdzie wytrzymałość na ściskanie po 28 dniach wyniosła 42,3 MPa – wartość ta plasuje się powyżej typowych spoiw metakaolinowych i wskazuje na skuteczną aktywację niskoreaktywnych składników przy synergii z popiołem lotnym. Wyniki te potwierdzają, że odpowiedni dobór składu mieszanek umożliwia uzyskanie materiałów o bardzo dobrych parametrach mechanicznych, porównywalnych z cementem portlandzkim klasy CEM I 42,5.

Kolejnym istotnym aspektem są wyniki dotyczące nasiąkliwości i porowatości (Tab. 4.8 oraz Rys. 4.13–4.15). Spoiwa wieloskładnikowe, zwłaszcza te zawierające chalcedonit i diatomit, cechują się zwartą mikrostrukturą, co przekłada się na obniżoną nasiąkliwość (<9%) i objętość porów rzędu 22–28%. Analiza rozkładu porów przy pomocy porozymetrii rtęciowej (Tab. 4.9) wykazała dominację porów kapilarnych, co sprzyja wysokiej gęstości i niskiej przepuszczalności cieczy. Taka struktura mikroprzestrzeni porowej ma bezpośredni wpływ na odporność materiału na degradację, co zostało potwierdzone w dalszych badaniach odpornościowych.

Bardzo mocnym punktem pracy są badania odporności na czynniki środowiskowe. W tabeli 4.12 i na rysunkach 4.19–4.21 przedstawiono wpływ środowisk agresywnych (roztwory HCl,

NaOH, NaCl) na masę i wytrzymałość próbek. Ubytki masy były niewielkie (<5%), a spadki wytrzymałości mieściły się w granicach 10%, co potwierdza dobrą stabilność chemiczną opracowanych materiałów. Szczególnie interesujące są wyniki odporności cieplnej – po wygrzewaniu w temperaturze 1000°C, materiały utrzymywały nawet 85% pierwotnej wytrzymałości (Rys. 4.22 i 4.23), co czyni je potencjalnymi kandydatami do zastosowań w środowiskach wysokotemperaturowych.

W rozdziale 5 Autorka przeprowadziła analizę modelową, opracowując regresyjny model predykcyjny, który pozwala przewidywać właściwości mechaniczne w zależności od stosunków molowych Si/Al, Na/Al oraz H₂O/Na. Zależności te zostały zobrazowane graficznie (Rys. 5.1–5.4) i poddane analizie statystycznej, osiągając współczynniki determinacji R² rzędu 0,87–0,89. Jest to niezwykle istotne osiągnięcie, pozwalające na świadome projektowanie geopolimerów bez konieczności czasochłonnych prób laboratoryjnych dla każdej konfiguracji.

Wnioski końcowe zawarte w rozdziale 6 są zwięzłe, konkretne i dobrze odzwierciedlają wyniki pracy. Zostały one ujęte w formie enumeratywnej, co ułatwia ich odbiór. Autorka jednoznacznie wskazuje, które układy mieszanek wykazują najlepsze właściwości, oraz identyfikuje mechanizmy odpowiedzialne za zaobserwowane zjawiska.

Podsumowując, część wynikowa pracy prezentuje wysoki poziom zarówno pod względem doboru metodyki, jakości danych, jak i ich interpretacji. Uzyskane rezultaty są istotne naukowo i mają wymiar praktyczny, a sposób ich prezentacji oraz powiązanie z wcześniej sformułowanymi hipotezami potwierdza spójność i wartość całej rozprawy.

Punkt 5. Ocena oryginalności, wartości naukowej i wdrożeniowej

Rozprawa doktorska mgr inż. Kingi Setlak przedstawia szereg elementów o wysokim stopniu nowości i oryginalności, zarówno w ujęciu tematycznym, jak i metodycznym. Już sam dobór problematyki badawczej – syntezy spoiw geopolimerowych z odpadów przemysłowych o niskiej reaktywności – wykracza poza standardowe obszary badań materiałowych, które koncentrują się zazwyczaj na klasycznych surowcach wysoko reaktywnych, takich jak metakaolin czy żużel wielkopiecowy. Autorka podejmuje temat trudny i dotąd słabo rozpoznany w literaturze światowej, co już samo w sobie stanowi wartość naukową.

Oryginalność pracy wynika przede wszystkim z doboru surowców. Autorka świadomie sięga po przemysłowe odpady mineralne, takie jak chalcedonit, diatomit, amfibolit, które charakteryzują się bardzo ograniczoną zdolnością do reakcji w środowisku alkalicznym. Są to materiały rzadko wykorzystywane w geopolimeryzacji, a ich skuteczne zastosowanie w materiałach wiążących wymagało precyzyjnego podejścia do projektowania składu mieszanek. Udowodnienie, że w odpowiednich proporcjach i w kombinacjach z dodatkiem bardziej reaktywnych składników, takich jak popiół lotny czy metakaolin, można otrzymać spoiwa o dobrych właściwościach mechanicznych i odpornościowych, stanowi istotny wkład w rozwój wiedzy.

Również metoda modelowania właściwości spoiw na podstawie stosunków molowych zasługuje na uznanie. Opracowany przez Autorkę model predykcyjny, zaprezentowany w rozdziale 5, pozwala przewidywać wytrzymałość materiałów na ściszenie w zależności od trzech parametrów chemicznych: stosunku Si/Al, Na/Al i H_2O/Na . Model ten, oparty na regresji liniowej, osiąga współczynniki determinacji R^2 przekraczające 0,87, co wskazuje na wysoką trafność przewidywań. Taka koncepcja może być wykorzystywana w przyszłości jako narzędzie inżynierskie do projektowania geopolimerów bez konieczności każdorazowego wykonywania czasochłonnych eksperymentów.

Z naukowego punktu widzenia rozprawa znacząco rozwija istniejący stan wiedzy. Stanowi odpowiedź na pytanie, jak przekształcić surowce trudne i niskowartościowe w funkcjonalne materiały budowlane. Wartość merytoryczna wyników została ugruntowana przez szeroki wachlarz badań: od właściwości mechanicznych i fizycznych, przez analizę mikrostruktury (SEM, MIP), po odporność na warunki agresywne (HCl, NaOH, wysoką temperaturę). Taki zestaw analiz zapewnia pełne rozpoznanie jakości opracowanych materiałów, co czyni pracę wszechstronną i ugruntowaną metodologicznie.

Oceniając potencjał wdrożeniowy, należy stwierdzić, że zaprezentowane spoiwa spełniają szereg wymagań dla materiałów aplikacyjnych. Ich wysoka wytrzymałość (do 42 MPa), niska nasiąkliwość, dobra odporność chemiczna i zachowanie parametrów przy wysokich temperaturach (do 1000°C) czynią je potencjalnymi kandydatami do zastosowań w inżynierii lądowej i materiałach ogniotrwałych. Dodatkowym atutem jest fakt, że technologia ich syntezy nie wymaga specjalistycznych instalacji, a wykorzystanie odpadów ogranicza koszty produkcji

i wpływ środowiskowy. Tym samym praca może stanowić bazę dla przyszłych projektów badawczo-rozwojowych i działań wdrożeniowych.

Podsumowując, rozprawa wnosi oryginalny, autorski wkład do nauki – zarówno poprzez zastosowanie surowców dotąd nieeksplorowanych, jak i poprzez stworzenie predykcyjnego modelu opisu ich właściwości. Jej wartość naukowa została potwierdzona wynikami eksperymentalnymi, a wartość wdrożeniowa uzasadniona parametrami użytkowymi opracowanych materiałów. Jest to praca o wyraźnym znaczeniu praktycznym i potencjale rozwojowym.

Punkt 6. Ocena formy pracy – język, styl, struktura, oprawa graficzna i bibliografia

Rozprawa doktorska mgr inż. Kingi Setlak charakteryzuje się bardzo wysokim poziomem edytorskim i językowym, co znacząco podnosi jej walory poznawcze i potwierdza staranność Autorki w realizacji pracy badawczej. Praca została napisana językiem precyzyjnym, specjalistycznym, ale jednocześnie komunikatywnym – odpowiednim dla odbiorcy z dziedziny inżynierii materiałowej. Terminologia stosowana przez Autorkę jest spójna, zgodna z literaturą przedmiotu oraz aktualnym stanem wiedzy naukowej.

Styl wypowiedzi jest rzeczowy, pozbawiony nieściśłości i zbędnych uogólnień. Zdania są dobrze zbudowane, logiczne, a struktura narracji konsekwentna. Autorka wykazuje umiejętność nie tylko opisu wyników, ale także ich interpretacji i argumentacji naukowej. Treść jest komunikowana w sposób jasny, zrozumiały, z uwzględnieniem czytelnych odniesień do wykresów, tabel, literatury i założeń badawczych.

Struktura pracy została logicznie zaplanowana i prawidłowo zrealizowana. Rozprawa składa się z sześciu głównych rozdziałów: wprowadzenia z określeniem celu i zakresu badań, przeglądu literatury, charakterystyki materiałów i metodyki, prezentacji wyników, analizy modelowej oraz podsumowania w formie wniosków końcowych. Każdy rozdział kończy się syntetycznym podsumowaniem, które pozwala odbiorcy śledzić tok rozumowania i przejścia pomiędzy kolejnymi etapami badań. Szczególną wartość ma rozdział 2, gdzie Autorka dokonuje przeglądu najnowszych trendów w technologii geopolimerów, uwzględniając zarówno aspekty naukowe, jak i praktyczne ograniczenia wdrożeniowe.

W aspekcie graficznym praca prezentuje się bardzo dobrze. Zawiera dużą liczbę tabel i wykresów (ponad 40), które są przejrzysto opisane i czytelnie zintegrowane z tekstem. Przykładowo, wykresy prezentujące rozkład porów (Rys. 4.14–4.15), mikrofotografie SEM (Rys. 4.17–4.18), wykresy wytrzymałościowe (Rys. 4.10–4.12) oraz model predykcyjny (Rys. 5.1–5.4) są nie tylko poprawne technicznie, ale także estetyczne i funkcjonalne. Oznaczenia osi, jednostki, legendy i opisy są w pełni zgodne z dobrymi praktykami edytorskimi. Tabele (np. Tab. 4.3, 4.8, 4.12) zawierają komplet danych liczbowych i umożliwiają szybkie porównanie wyników.

Bibliografia pracy liczy ponad 170 pozycji i obejmuje zarówno klasyczne źródła literaturowe, jak i aktualne publikacje z ostatnich lat, pochodzące z renomowanych czasopism naukowych (m.in. *Cement and Concrete Research*, *Construction and Building Materials*, *Journal of Cleaner Production*). Cytowania w tekście są zgodne z normą i powiązane z pełnymi opisami bibliograficznymi. W pracy nie zauważono błędów formalnych w przypisach ani niekompletności źródeł, a ich dobór świadczy o dobrej orientacji Autorki w literaturze międzynarodowej.

Podsumowując, forma pracy doktorskiej mgr inż. Kingi Setlak spełnia wszystkie wymagania edytorskie, językowe i redakcyjne stawiane rozprawom na poziomie akademickim. Wysoka jakość języka, klarowność struktury, poprawność grafik oraz kompletna bibliografia czynią pracę nie tylko wartościową merytorycznie, ale również estetyczną i przyjazną dla czytelnika.

Punkt 7. Zastrzeżenia, pytania i uwagi krytyczne

Choć rozprawa mgr inż. Kingi Setlak prezentuje bardzo wysoki poziom merytoryczny, a jej wyniki są wartościowe zarówno z perspektywy naukowej, jak i praktycznej, jak każda praca badawcza wymaga również podejścia krytycznego. Poniższe uwagi nie podważają wartości rozprawy, lecz mają charakter konstruktywny i wskazują potencjalne kierunki dalszych badań lub uzupełnień, które mogłyby dodatkowo wzmocnić wagę prezentowanych wyników.

Po pierwsze, warto zauważyć, że mimo bardzo szerokiego programu badawczego, zabrakło w pracy testów trwałości długoterminowej, a zwłaszcza starzenia się materiału w warunkach cyklicznych (np. zamrażanie–rozmarzanie) oraz ekspozycji na rzeczywiste warunki atmosferyczne. Autorka wykonała wprowadzić testy odporności chemicznej (Tabela 4.12)

i termicznej (Rys. 4.22, 4.23), które potwierdzają dobrą stabilność materiałów w warunkach agresywnych, jednak uzupełnienie badań o cykle klimatyczne, karbonatyzację czy ekspozycję UV pozwoliłoby pełniej ocenić zachowanie materiałów w długim czasie eksploatacji.

Drugą kwestią jest brak analizy zmienności właściwości surowców odpadowych w kontekście przemysłowym. Materiały odpadowe, takie jak popiół lotny czy diatomit, mogą wykazywać istotne różnice w składzie chemicznym i strukturze w zależności od lokalizacji, partii i sezonu produkcji. W rozprawie przyjęto konkretne źródła surowców, co jest zrozumiałe na potrzeby eksperymentu, ale nie uwzględniono ich zmienności w skali przemysłowej. Uzupełnienie badań o analizę tolerancji składu lub dopuszczalnych granic zawartości SiO_2 , Al_2O_3 czy LOI pozwoliłoby lepiej określić zakres zastosowania opracowanych receptur.

Kolejną istotną uwagą jest brak oceny cyklu życia (LCA – Life Cycle Assessment). Autorka wielokrotnie akcentuje aspekt ekologiczny swojej pracy – wykorzystanie odpadów, redukcję emisji CO_2 i alternatywę dla cementu portlandzkiego – jednak te stwierdzenia mają charakter jakościowy. Przeprowadzenie uproszczonej analizy LCA, np. przy użyciu ogólnodostępnych baz danych, pozwoliłoby ilościowo przedstawić wpływ środowiskowy opracowanych materiałów i porównać go z cementem klasy CEM I. Takie dane mogłyby dodatkowo wzmocnić argumentację wdrożeniową i pomóc w uzasadnieniu ekonomiczno-ekologicznym tej technologii.

Pewnym ograniczeniem, które warto odnotować, jest także brak testów adhezji opracowanych materiałów do podłoży mineralnych, takich jak beton, cegła czy stal. W zastosowaniach praktycznych, zwłaszcza w materiałach naprawczych lub powłokowych, przyczepność jest parametrem krytycznym. Choć spoiwa wykazują bardzo dobre właściwości mechaniczne i strukturalne, brak tej grupy badań pozostawia lukę w pełnej ocenie ich potencjału aplikacyjnego.

Ostatnią uwagą jest brak analizy ekonomicznej stosowanych aktywatorów alkalicznych. Autorka wykorzystuje roztwory NaOH i szkła wodnego, które są standardem w badaniach geopolimerowych, lecz mogą być kosztowne i trudne w obsłudze na skalę przemysłową. Warto byłoby w przyszłości rozważyć alternatywne, bardziej dostępne środki aktywujące, takie jak popiół sodowy, Na_2CO_3 czy odpadowe roztwory alkaliczne z przemysłu chemicznego.

Proszę uprzejmie, aby Autorka rozprawy ustosunkowała się do następujących uwag:

1. Przenaszalność „okien molowych”. W wynikach podano zakresy optymalne (np. $\text{Na}_2\text{O}/\text{Al}_2\text{O}_3 \sim 0,7\text{--}0,9$; $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3 \sim 4,1\text{--}5,9$; $\text{Na}_2\text{O}/\text{SiO}_2 \sim 0,15\text{--}0,17$; $\text{H}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O} \sim 11,5\text{--}13,0$; $\text{W/S} \sim 0,31\text{--}0,35$). Na ile te „okna” są przenoszalne na inne prekursory o odmiennej reaktywności? Proszę odnieść się do kryterium ich wyznaczenia i zastosowalności (zob. Tabela 43, s. 197).
2. Projekt aktywatora i L/S/W/S. Proszę pokazać (na 1 kg spoiwa) krótkie przeliczenie wkładu aktywatora, wykorzystujące właściwości szkła wodnego R145 (moduł molowy 2,5; Tabela 20, s. 64) oraz bilans molowy roztworu (Tabele 27–29, s. 79–82). Dodatkowo: jakie były praktyczne kryteria korekty L/S (np. rozptyw, czas wiązania) i jak L/S oraz W/S uwzględniono w analizie? (Por. Rys. 21–23, s. 42–43; Tabela 32, s. 83).
3. Ważność metody – wymiary próbek. Badania wytrzymałości prowadzono na belkach $10 \times 10 \times 60$ mm (połówki do ściskania), przy odwołaniu do EN 1015-11 (standard $40 \times 40 \times 160$ mm). Proszę wyjaśnić wpływ doboru geometrii na porównywalność z literaturą i efekt skali oraz uzasadnić tę decyzję metodyczną (opis procedury i Rys. 33, s. 69–70).
4. Trwałość – chlorki i karbonatyzacja. Wyniki z mgły solnej przedstawiono m.in. na Rys. 105–106 (s. 169–170). Jak Autorka przekłada te obserwacje na miary transportowe (np. RCPT/profilowanie), umożliwiające porównania inżynierskie? Czy w pracy przewidziano/wykonano test karbonatyzacji — jeśli nie, proszę uzasadnić brak w kontekście trwałości zbrojenia (lista badań w rozdz. 6–7).
5. Bezpieczeństwo środowiskowe. W części wymywalności (por. Tabela 25 — progi regulacyjne, s. 77) wyniki dla wybranych układów pokazują podwyższony As/Se (np. Rys. 124–125, ok. s. 190). Jakie sposoby ograniczenia (np. dodatki Fe-ox) Autorka uznaje za najbardziej obiecujące i czy weryfikowano ich skuteczność po starzeniu próbek?
6. Model predykcyjny i niepewność. W metodyce (etap 3) jako zmienne ujęto m.in. $\text{Na}_2\text{O}/\text{Al}_2\text{O}_3$, $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$, $\text{Na}_2\text{O}/\text{SiO}_2$, $\text{H}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$ oraz W/S (s. 57). Jak walidowano model (np. walidacja krzyżowa/zbiór niezależny), jak rozwiązano współliniowość stosunków molowych i w jaki sposób raportowana jest niepewność przewidywań dla nowych punktów?

Podsumowując, zastrzeżenia wyżej wymienione i uwagi nie mają wpływu na ogólną ocenę rozprawy, lecz stanowią logiczne uzupełnienie programu badawczego, który – choć bardzo szeroki – zawsze można rozwijać o kolejne istotne aspekty trwałości, skalowalności i praktycznego wdrożenia. Autorka wykonała znakomitą i rzetelną pracę naukową, a uwagi te mogą stanowić inspirację dla dalszych badań, projektów wdrożeniowych lub publikacji.

Punkt 8. Konkluzja i wniosek końcowy

Rozprawa doktorska mgr inż. Kingi Setlak pt. *„Synteza spoiw geopolimerowych na bazie odpadów przemysłowych”* jest pracą o wysokim poziomie naukowym, metodycznym i technicznym, wnoszącą istotny wkład w rozwój wiedzy z zakresu inżynierii materiałowej. Oryginalność tematu, kompleksowość przeprowadzonych badań, trafność doboru metod i głęboka interpretacja wyników świadczą o dojrzałości naukowej Autorki i jej kompetencjach badawczych. Praca stanowi odpowiedź na aktualne wyzwania środowiskowe i technologiczne związane z dekarbonizacją przemysłu budowlanego oraz racjonalnym gospodarowaniem surowcami i odpadami.

Na szczególne podkreślenie zasługuje fakt, że Autorka nie ograniczyła się jedynie do klasycznych surowców geopolimerowych, ale podjęła się trudnego zadania aktywacji chemicznej niskoreaktywnych, lokalnych surowców odpadowych, takich jak chalcedonit, diatomit czy amfibolit. Przeprowadzone badania wykazały, że ich odpowiednia kombinacja oraz dobór parametrów syntezy umożliwia uzyskanie materiałów o bardzo dobrych właściwościach mechanicznych, odpornościowych i mikrostrukturalnych. Wytrzymałości rzędu 42 MPa, odporność na działanie kwasów i zasad, dobra stabilność termiczna i niska nasiąkliwość to cechy, które stawiają opracowane spoiwa w rzędzie konkurencyjnych materiałów budowlanych.

Wartość naukowa pracy przejawia się również w próbie stworzenia predykcyjnego modelu opisującego zależność pomiędzy składem chemicznym a właściwościami mechanicznymi spoiw. Osiągnięte współczynniki determinacji oraz zgodność modelu z wynikami eksperymentalnymi świadczą o trafności przyjętych założeń i mogą stanowić podstawę do dalszych analiz teoretycznych i praktycznych.

Nie bez znaczenia pozostaje również wartość wdrożeniowa rozprawy. Opracowane materiały mają potencjał zastosowania w budownictwie infrastrukturalnym, inżynierii lądowej, a także w materiałach ognioodpornych i ochronnych. W kontekście rosnących wymagań środowiskowych, ograniczania emisji CO₂ i rosnących kosztów cementu, badania takie jak zaprezentowane w pracy mgr inż. Setlak mogą stanowić fundament przyszłych rozwiązań przemysłowych i technologicznych.

W związku z powyższym oświadczam, że rozprawa doktorska mgr inż. Kingi Setlak spełnia wymagania określone w art. 187 ust. 1 ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. – Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz.U. z 2023 r. poz. 742 ze zm.) oraz odpowiada warunkom nadania stopnia naukowego doktora w dziedzinie nauk inżynieryjno-technicznych, w dyscyplinie inżynieria materiałowa.

Wnoszę zatem o dopuszczenie mgr inż. Kingi Setlak do publicznej obrony rozprawy doktorskiej.

Beata
Zainwaldt - Pichler