

Dr. hab. inż. Marek Kostecki, prof. PW
Zakład Materiałów Ceramicznych i Polimerowych
Wydział Inżynierii Materiałowej
Politechnika Warszawska

Warszawa 05.02.2025

RECENZJA

Rozprawy doktorskiej mgr. inż. Macieja Mrówki pt. „Charakterystyka właściwości fizykochemicznych oraz technologicznych symulantów regolitu”

Recenzja została sporządzona w związku z powołaniem przez Radę Dyscypliny Inżynieria Materiałowa Politechniki Śląskiej (uchwałą z dnia 16.12.2025), pismem z dn. 17.12.2025 r. RDIMa.512.5.2025RM do pełnienia funkcji recenzenta w postępowaniu o nadanie stopnia naukowego doktora nauk inżynieryjno-technicznych w dyscyplinie Inżynieria Materiałowa Panu mgr inż. Maciejowi Mrówce.

Charakterystyka tematyki rozprawy doktorskiej

Symulanty regolitu księżycowego są kluczowym ogniwem między teorią eksploracji kosmicznej a praktyką inżynierię. Bez ich rozwoju testy technologii lunarnej na Ziemi byłyby znacznie ograniczone. To narzędzie nie tylko dla agencji kosmicznych (NASA, ESA, CNSA) i firm prywatnych, ale także dla ośrodków akademickich na całym świecie. Ich istotność cywilizacyjna rośnie wraz z rozwojem programów Artemis, planami stałych baz księżycowych i pomysłami wykorzystania zasobów lokalnych, gdyż symulanty pozwalają zredukować ryzyko, koszty oraz przyspieszyć projektowanie systemów kluczowych dla przyszłej obecności człowieka poza Ziemią. Są one fundamentalne dla badań In-Situ Resource Utilization (ISRU) związanych wykorzystaniem surowców na miejscu na Księżycu, do produkcji tlenu, wody, paliw, czy wreszcie materiałów konstrukcyjnych. Bez symulantów trudno zbudować systemy, które mają działać w realnym środowisku księżycowym, ponieważ unikalne właściwości regolitu wpływają m.in. na: obsługę maszyn i robotów (kopanie, transport), projektowanie filtrów i systemów oczyszczania pyłu, ekstrakcję tlenu i wody z minerałów. Badania nad wykorzystaniem regolitu jako surowca do budowy bazy, np. drogowych płyt, fundamentów, cegieł lub elementów drukowanych 3D są możliwe tylko dzięki wiarygodnym symulantom.

Nowoczesne projekty badawcze analizują właściwości symulantów w porównaniu z rzeczywistymi danymi z misji Apollo/Luna. Celem jest zbliżenie się nie tylko do składu chemicznego, ale także zachowania mechanicznego w warunkach niskiej grawitacji i środowisk ekstremalnych. Regolit można odtworzyć wybierając składniki obecne w skorupie ziemskiej a dokładność powielania ich parametrów określana jest mianem wierności symulacji. Możliwość opracowania symulantów o wysokiej wierności leży w korelacji ich właściwości i zachowania materiału w testach naziemnych z rzeczywistym materiałem księżycowym. Taka korelacja powinna uwzględniać aspekty niezbędne do realizacji operacji w bazach księżycowych. Dodatkowym wyzwaniem jest zrozumienie zachowania tego materiału w warunkach księżycowych: wysokiej próżni, grawitacji stanowiącej 1/6 ziemskiej, ekstremalnych temperatur, ekspozycji na pełne spektrum promieniowania słonecznego, zjawiska akumulacji ładunku elektrycznego na powierzchni cząstek, a w regionach polarnych również obecności cząstek lodu.

Symulanty regolitu są opracowywane przez ośrodki badawcze i agencje kosmiczne na całym świecie, głównie z wykorzystaniem różnorodnych materiałów ziemskich. Można tu krótko wspomnieć o DNA-1A: opracowanym przez włoskich badaczy na bazie popiołu wydobywanego w kamieniołomie Onano, czy JSC-1A, który bazuje na zmielonym bazalcie wulkanicznym bogatym w szkliwo. W ostatnich 5–10 latach nastąpił wyraźny przyrost prac badawczych. O ile pierwsze standardowe symulanty (jak JSC-1) powstawały już w latach 90., o tyle obecne badania skupiają się na niskokosztowych i masowych surowcach. Popioły lotne (np. z elektrowni węglowych) oraz inne odpady bogate w krzemionkę i glinokrzemiany

pojawiają się jako potencjalne źródła takiego surowca, choć ich charakterystyka czasem bardzo różni się od rzeczywistego regolitu.

Wybraną tematykę oceniam jako bardzo aktualną i niezwykle ważną. Wpisuje się ona w globalne trendy badań nad technologiami ISRU oraz zrównoważonym rozwojem materiałów inżynierskich dla eksploracji kosmosu. Chociaż temat wydaje się niszowy, jest on strategiczny dla przyszłej kolonizacji Księżyca. Przedstawiona praca może przyczynić się do rozwoju przemysłu kosmicznego i z pewnością jest cennym zbiorem informacji na temat kierunków i możliwości rozwoju produkcji symulantów.

Formalna ocena pracy

Przedłożona do oceny rozprawa doktorska magistra inżyniera Macieja Mrówki zatytułowana: „Charakterystyka właściwości fizykochemicznych oraz technologicznych symulantów regolitu”, powstała na Wydziale Inżynierii Materiałowej i Cyfryzacji Przemysłu, Politechniki Śląskiej pod opieką dr. hab. inż. Grzegorza Moskała prof. PŚ. oraz dr. inż. Tomasza Burego. Ma typowo doświadczalny charakter i składa się zasadniczo z dwóch części:

- ogólnej, obejmującej przeglądowy opis literatury dotyczący tematyki pracy (łącznie 33 strony), składającej się z: krótkiego wprowadzenia, opisu koncepcji wykorzystania na miejscu zasobów kosmicznych (ISRU), opisu regolitu księżycowego w oparciu o dane materiałowe próbek dostarczonych na Ziemię, zdefiniowania stanu badań w obrębie istniejących symulantów regolitu z uwzględnieniem istotnej roli badań realizowanych przez polskich naukowców.
- Doświadczalnej (łącznie 76 stron), składającej się z rozdziałów zawierających: opis materiału badawczego (popiołów lotnych pozyskanych z 9 elektrowni), metodykę badawczą, wyniki badań, propozycję zagospodarowania wyników w postaci opracowania nowego symulanta (GSR - Górnośląski Symulant Regolitu), obszernie podsumowanie i prognozę aktywności badawczej w zakresie wykorzystania symulantów oraz wnioski. Praca kończy się listą zawierającą piśmiennictwo. Dodatkowo załączono spis rysunków i tabel a także streszczenie w języku polskim oraz angielskim.

W pierwszej części rozprawy opartej na studiach literaturowych Autor dokonał analizy aktualnego stanu wiedzy w oparciu o zbiór 230 pozycji. Rozdziały przeglądowe świadczą o dobrej orientacji Autora w literaturze przedmiotu. Piśmiennictwo obejmuje publikacje przeglądowe, raporty agencji kosmicznych, prace eksperymentalne, oraz studia pilotażowe. Dobór źródeł jest aktualny (większość publikacji to prace które ukazały się po 2010 roku, nie brakuje też najnowszych publikacji z lat 2023-25) i adekwatny do omawianej problematyki. Na pozytywną ocenę zasługuje: uwzględnienie różnych klas symulantów regolitu (referencyjne, lokalne, niskokosztowe), poprawne omówienie ograniczeń wynikających z różnic mineralogicznych i morfologicznych a także odniesienie do zagadnień praktycznych tj. kosztów, dostępności materiałów czy skalowalności.

Ważny element dysertacji stanowi rozdział 7 „Podsumowanie oraz określenie luki badawczej” w którym autor osadza badania w kontekście eksploracji i zasiedlania Księżyca, wskazuje na problem skali, ceny i dostępności symulantów oraz logicznie łączy ten problem z potrzebą materiałów wysokotonażowych. Identyfikacja niedostatku badań nad zastosowaniem popiołów pochodzących z elektrowni jako symulantów regolitu księżycowego jest bezsprzecznie poprawna. Na pochwałę zasługuje wskazanie a następnie realizacja interdyscyplinarnego wątku badań dotyczącego zdolnością regolitu do ekranowania promieniowania kosmicznego oraz wpływu regolitu na organizm człowieka. Ekranowanie promieniowania jest kluczowym parametrem przy projektowaniu habitatów księżycowych i ocenie przydatności materiałów symulacyjnych, skoro prawdziwy regolit ma wpływ na dawki promieniowania, symulant powinien dawać podobne efekty ekranowania i być testowany pod kątem strukturalnej integralności i skuteczności tego ekranowania. Kolejno - badania biologiczne wpływu regolitu na organizm (dla symulantów), dają wiedzę o potencjalnej toksyczności pyłu, dane do modelowania zagrożeń zdrowotnych i stanowią podstawę do opracowania strategii ochronnych (filtracje, powłoki, środki ochrony indywidualnej). Niestety literatura badań bezpośrednio łączących symulanty regolitu z toksycznością jest także ograniczona.

Na podstawie przeprowadzonych studiów literaturowych oraz badań własnych za cel badań Doktorant przyjął:

- „analizę wybranych parametrów morfologicznych oraz właściwości fizykochemicznych i biologicznych popiołów pochodzących z polskich elektrowni, oraz opracowanie na tej podstawie optymalnej (z punktu widzenia składu chemicznego/fazowego rzeczywistych regolitów księżycowych) kompozycji chemicznej symulanta regolitu.”

Wskazany został także cel aplikacyjny:

- „Celem aplikacyjnym prowadzonych badań jest odpowiedź na pytanie, czy popioły te mogą być rozpatrywane jako tanie, wysokotonażowe oraz łatwo dostępne symulanty regolitu księżycowego.”

Autor sformułował następnie tezę pracy która brzmi:

- Popioły z zasilanych węglem kamiennym polskich elektrowni, mogą być bazą do wytwarzania taniego, łatwo dostępnego i przetwarzalnego oraz wysokotonażowego zamiennika regolitu księżycowego (symulanta regolitu). Zastosowanie odpowiednich procesów przetwórczych popiołów pozwoli na wytworzenie symulantów o bardzo zbliżonej charakterystyce (tj.: składzie chemicznym i fazowym oraz morfologii cząstek, właściwościach cieplnych) do regolitu księżycowego, a także otworzy drogę do projektowania kompozycji i wytwarzania regolitów typowych dla innych planet np. Marsa.

Zaproponowany cel w postaci opracowania taniego i dostępnego symulanta regolitu jest ambitny, ale realistyczny, jasno określa przedmiot badań, jest także spójny z przedstawionym studium literaturowym. Teza pracy pozostaje w ścisłym związku z głównym nurtem przeprowadzonych badań. Pewne wątpliwości może jednak budzić fragment odnoszący się do możliwości projektowania kompozycji symulantów regolitów innych planet, który w świetle przedstawionych wyników ma raczej charakter perspektywiczny. Zasadnym wydaje się traktowanie tego elementu tezy jako wskazania kierunku dalszych badań, a nie jako w pełni udokumentowanego wniosku pracy.

Już na tym etapie oceny dysertacji należy docenić zaproponowany, bardzo szeroki zakres badań. Zastosowany w rozprawie zestaw metod został dobrany w sposób trafny i w pełni adekwatny do postawionego celu pracy oraz charakteru otrzymywanych materiałów. Druga część rozprawy obejmuje bowiem kompleksowe badania eksperymentalne popiołów elektrownianych pochodzących z różnych typów kotłów. Zakres badań obejmuje m.in.: analizę składu chemicznego i fazowego, ocenę udziału fazy szklistej i jej modyfikacji poprzez obróbkę cieplną, analizę morfologii i wielkości cząstek, badania właściwości cieplnych, próby konsolidacji/spiekania, ocenę ekranowania promieniowania jonizującego, badania oddziaływania biologicznego/toksyczności oraz demonstracyjne zastosowanie symulanta w technologiach przyrostowych.

Rozprawa jest napisana językiem zrozumiałym i w przeważającej mierze poprawnym, umożliwiającym śledzenie toku rozumowania autora. Nie zauważyłem błędów rażących, które utrudniałyby odbiór treści merytorycznej. Sporadycznie zauważalne są błędy fleksyjne i składniowe oraz literówki. Styl pracy można określić jako poprawny akademicko, typowy dla rozpraw doktorskich w obszarze nauk technicznych. Struktura pracy jest logiczna i przejrzysta, a kolejność rozdziałów odpowiada przyjętym standardom. W części badawczej narracja jest bardziej zdyscyplinowana i techniczna, co należy ocenić pozytywnie. Autor posługuje się terminologią właściwą dla inżynierii materiałowej, sporadycznie pojawiają się nieprecyzyjne sformułowania potoczne (np. „ogromny potencjał”, „łatwiejsza konsolidacja”). Nie zawsze konsekwentnie stosowany jest termin „symulant”, jako synonimy stosowane są: „imitator”, „zamiennik” i „analog” – wskazana byłaby jednoznaczna definicja w całej pracy. Zamieszczony materiał ilustracyjny jest dobrej jakości choć w przypadku wybranych zdjęć SEM odczytanie podziałki liniowej wymaga pewnego wysiłku. Redakcję można uznać za poprawną.

Merytoryczna ocena pracy

Część badawcza rozprawy została zaplanowana i zrealizowana jako wielostopniowy, kompleksowy proces oceny przydatności popiołów elektrownianych do wytwarzania symulantów regolitu księżycowego, obejmujący zarówno badania podstawowe materiału proszkowego, jak i jego potencjalne zastosowania technologiczne.

Badania rozpoczynają się od doboru popiołów pochodzących z różnych typów kotłów, co pozwala uchwycić naturalną zmienność ich składu chemicznego i fazowego. Autor poprawnie wskazuje różnice pomiędzy kotłami pyłowymi i fluidalnymi oraz ich wpływ na charakter popiołów. Nie decyduje się natomiast na jednoznaczne powiązanie tych różnic z jakością popiołów jako surowca do wytwarzania symulanta regolitu, co zdaniem recenzenta wzmocniłoby interpretację uzyskanych wyników. Selekcję przeprowadzono na podstawie analizy termogravimetrycznej. Już na tym etapie istotnym założeniem jest możliwość projektowania właściwości symulanta poprzez świadomy dobór źródła surowca, a nie jedynie jego późniejszą modyfikację.

Popioły poddano wstępnej charakterystyce obejmującej: skład chemiczny, skład fazowy, morfologię i wielkość cząstek. Ten etap stanowi fundament dalszych analiz i umożliwia pierwsze odniesienie do danych literaturowych dotyczących rzeczywistego regolitu księżycowego. Kluczowym wątkiem badań jest identyfikacja i ilościowa ocena składu fazowego popiołów, przeprowadzona z wykorzystaniem dyfrakcji rentgenowskiej oraz analizy Rietvelda. Szczególną uwagę poświęcono: obecności faz krystalicznych (kwarc, mullit, hematyt, anhydryt, kalcyt), oraz ilościowemu udziałowi fazy szklistej, która stanowi istotny element regolitu księżycowego. Autor wskazuje na trudności jednoznacznej identyfikacji faz ze względu na nakładanie się refleksów dyfrakcyjnych, co jest typowe dla materiałów o wysokiej zawartości fazy szklistej, i poprawnie uwzględnia ten fakt w interpretacji wyników.

Kolejnym istotnym etapem badań jest wstępna obróbka wysokotemperaturowa popiołów. Podczas obróbki cieplnej zachodzą: częściowa rekrytalizacja faz amorficznych, zmiany udziału faz krystalicznych (kwarc, mullit, hematyt), modyfikacja struktury i charakteru fazy szklistej a także poprawa jednorodności materiału. Są to zjawiska typowe i oczekiwane dla popiołów lotnych bogatych w glinokrzemiany, o wysokim udziale fazy szklistej. Autor wykazuje, że obróbka cieplna jest warunkiem koniecznym uzyskania właściwości zbliżonych do regolitu księżycowego i stanowi podstawowe narzędzie projektowania symulanta. Z przedstawionych badań wynika jednoznacznie, że obróbka cieplna prowadzi do uzyskania składu i struktury zbliżonej do regolitu księżycowego, jednak nie zawsze jednoznacznie wskazano, czy dobór parametrów obróbki był wynikiem świadomego projektowania materiału, czy też został potwierdzony w drodze analizy uzyskanych rezultatów.

Zaproponowana dalej ocena możliwości konsolidacji i spiekania symulanta, ma bezpośrednie znaczenie dla potencjalnych zastosowań konstrukcyjnych. Doktorant zbadał zachowanie materiału podczas wytwarzania elementów konstrukcyjnych a także jednorodność i stabilność uzyskanych struktur.

Ocena zdolności ekranowania promieniowania jonizującego przez skonsolidowane materiały otrzymane z GSR odnosi się do warunków panujących na powierzchni Księżyca. Autor poprawnie opisuje metodykę pomiarów oraz uwzględnia statystyczny charakter zliczeń promieniowania. Otrzymane wyniki pomiarów potwierdziły że badane materiały konstrukcyjne na bazie popiołów, będą bardzo skutecznie chronić przed zwiększonym promieniowaniem tła, a także promieniowaniem emitowanym przez zewnętrzne źródła punktowe. Materiałów tych nie należy natomiast stosować do ekranowania skoncentrowanych wiązek promieniowania.

Badania biologiczne zostały włączone do rozprawy jako uzupełniający, ale istotny element oceny przydatności opracowanego symulanta w kontekście potencjalnych zastosowań technologicznych i badawczych. Ich głównym celem było określenie, czy popioły oraz opracowany na ich bazie symulant wykazują działanie cytotoksyczne i mogą stanowić zagrożenie biologiczne w warunkach kontaktu z organizmami żywymi. Badania te wpisują się w szerszy nurt analiz bezpieczeństwa materiałów potencjalnie wykorzystywanych w środowisku załogowym. Oceniano przeżywalności komórek, zmiany morfologiczne oraz reakcję metaboliczną. Metodyka jest adekwatna do postawionego celu i odpowiada praktyce stosowanej w badaniach materiałów nieorganicznych. Badania wykazały, że surowe popioły mogą wykazywać umiarkowane oddziaływanie biologiczne ale efekt ten nie był jednoznacznie toksyczny i był silnie zależny od stężenia. Obróbka cieplna popiołów prowadzi do wyraźnego obniżenia reaktywności biologicznej materiału. Ostatecznie Autor wykazuje, że GSR nie stanowi materiału biologicznie agresywnego a jego oddziaływanie jest zbliżone do oddziaływania rzeczywistych próbek regolitu opisywanych w literaturze.

Wszystkie zaprezentowane wyniki badań są obszerne i logicznie uporządkowane. Zostały czytelnie przedstawione w formie tabel i rysunków. Doktorant poprawnie wykazuje, że możliwe jest projektowanie składu symulanta przez dobór źródła popiołu a obróbka cieplna jest kluczowa dla uzyskania właściwości zbliżonych do regolitu. W konsekwencji przedstawia symulant (GSR) oraz wykazuje jego potencjał konstrukcyjny i ochronny. Część badawcza zostaje domknięta demonstracją możliwości zastosowania symulanta w technologiach przyrostowych, w szczególności w kontekście materiałów wsadowych do procesów druku 3D. Wątek ten ma charakter pokazowy, ale istotnie wzmacnia przekaz pracy jako całości.

Zaprezentowane wnioski są spójne z wynikami i jednoznacznie odnoszą się do tezy, wskazując zarówno wartość naukową, jak i aplikacyjną pracy. Recenzent potwierdza, że teza pracy została udowodniona.

Wszystkie zamieszczone w pracy badania wraz z ich opisem oraz dyskusją potwierdzają umiejętność prowadzenia samodzielnej pracy naukowej. Warsztat badawczy Doktoranta jest zaawansowany a eksperymenty zostały dobrze zaplanowane i przeprowadzone dość skrupulatnie. Zaprezentowane wyniki można w pełni uznać za oryginalne rozwiązanie problemu naukowego.

Uwagi szczegółowe

Choć rozprawa nie budzi większych zastrzeżeń merytorycznych znalazły się w niej pewne fragmenty wymagające zdaniem recenzenta uzupełnienia lub wyjaśnienia. Wszystkie zamieszczone poniżej uwagi mają charakter polemiczny i nie wpływają w jakikolwiek sposób na pozytywną ocenę pracy doktorskiej.

Uwagi krytyczne:

1. Studium literaturowe jest miejscami nadmiernie rozbudowane opisowo, kosztem syntetycznych podsumowań porównawczych. Recenzent zauważa, że część opisów mogłaby zostać skrócona bez utraty wartości merytorycznej.
2. W części metodycznej miejscami brakuje szerszej dyskusji niepewności pomiarowych oraz uzasadnienia wyboru niektórych parametrów procesowych - np. temperatur obróbki cieplnej i procesu konsolidacji.

Pytania:

1. Rozkłady rozmiaru ziaren granulatu mierzono metodą dyfrakcji światła za pomocą urządzenia Malvern Mastersizer 3000 z przystawką Hydro 2000S. Czy automatycznie oznacza to, że zastosowano dyspersję mokrą? Jeśli tak, to jakie były kryteria wyboru cieczy dyspergującej i jak przygotowano preparaty ?
2. Ilościowa analiza tlenu i azotu metodą EDS jest wymagająca, ale możliwa do przeprowadzenia z zachowaniem rygorystycznej metodyki, wymaga także specyficznej preparatyki. Surowe proszki charakteryzują się dużą porowatością i nieregularną geometrią, co w przypadku lekkich pierwiastków prowadzi do błędnych wyników ze względu na efekt cienia i niekontrolowaną absorpcję promieniowania. Proszę o wskazanie jak przeprowadzono preparatykę oraz na jakim poziomie oszacowano błąd pomiaru ?
3. Jeśli opracowany symulant GSR ma potencjał wdrożeniowy, jak wygląda powtarzalność próbek popiołów w kontekście wytwarzania standaryzowanego produktu ? Czy i jak kontrola jakości wpłynie na koszty produkcji ?

Wniosek końcowy

Rozprawa wnosi istotny wkład do badań nad symulantami regolitów poprzez zaproponowanie i weryfikację nowatorskiej koncepcji wytwarzania niskokosztowego, wysokotonażowego symulanta regolitu księżycowego w oparciu o popioły lotne, traktowane nie jako prosty substytut mineralny, lecz jako materiał możliwy do projektowania technologicznie. Na tle osiągnięć międzynarodowych praca wyróżnia się podejściem materiałoznawczym oraz silnym ukierunkowaniem na aspekty aplikacyjne, wpisując się w aktualny nurt badań nad wykorzystaniem zasobów lokalnych w technologiach kosmicznych.

Zdaniem recenzenta, oceniana rozprawa stanowi oryginalne rozwiązanie problemu naukowego, dowodzi ogólnej wiedzy teoretycznej doktoranta w zakresie inżynierii materiałowej, a także potwierdza umiejętności prowadzenia samodzielnej pracy naukowej.

W świetle powyżej opinii, stwierdzam, że rozprawa doktorska mgr inż. Macieja Mrówki zatytułowana: „Charakterystyka właściwości fizykochemicznych oraz technologicznych symulantów regolitu”, spełnia wszystkie warunki stawiane pracom doktorskim określone w art. 187 ust. 1 i 2 ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz. U. z 2024 r. poz. 1571 z późn. zm.).

Wnoszę do Rady Dyscypliny Inżynieria Materiałowa Politechniki Śląskiej o dopuszczenie Pana mgr inż. Macieja Mrówki do dalszych etapów przewodu doktorskiego, w tym publicznej obrony rozprawy.

Podpisał: | dr hab. inż. Marek Kostecki, prof. PW