

Wrocław, 16.02.2024r.

Dr hab. inż. Tomasz Hardy, prof. Uczelni
Politechnika Wrocławska
Wydział Mechaniczno-Energetyczny
Katedra Inżynierii Konwersji Energii
Wybrzeże Wyspiańskiego 27, 50-370 Wrocław

RECENZJA

**rozprawy doktorskiej pana mgr inż. Grzegorz Nehringa
pod tytułem**

**„Badania wpływu szybkości chłodzenia i domieszkowania popiołów
lotnych z energetyki zawodowej na właściwości fizyczne witrifikatów
celem polepszenia ich parametrów użytkowych”**

Podstawa opracowania recenzji

Recenzja wykonana została zgodnie z pismem RDN-IŚGIE.180.2023 z dnia 5.12.2023 na podstawie uchwały Rady Naukowej Dyscypliny Inżynieria Środowiska, Górnictwo i Energetyka Politechniki Warszawskiej z dnia 21.11.2023r.

Charakterystyka ogólna rozprawy

Recenzowana rozprawa doktorska pana mgr inż. Grzegorza Nehringa powstała pod opieką naukową prof. dr hab. inż. Krzysztofa Badydy.

Rozprawa składa się z 7 ponumerowanych rozdziałów obejmujących 115 stron maszynopisu, przy czym rozdział piąty stanowi spis literatury, a rozdziały 6 i 7 to spis rysunków i spis tabel zawartych w pracy.

Wykaz literatury zawiera 82 pozycje. Dobór i wykorzystanie w pracy źródeł literaturowych nie budzi zastrzeżeń pomimo, że liczba cytowań artykułów z uznanych czasopism międzynarodowych nie jest duża na tle różnych materiałów o zasięgu lokalnym. Doktorant powołał się na 6 pozycji literaturowych, w których jest autorem i współautorem (obejmujące 2 artykuły, 1 referat konferencyjny i 3 sprawozdania z badań).



Celem recenzowanej rozprawy było zbadanie możliwości polepszenia własności użytkowych witrifikatów otrzymywanych z popiołów lotnych w procesie spalania paliw stałych poprzez zmianę parametrów procesu witrifikacji oraz poprzez dodatek substancji obniżających temperaturę topnienia i zwiększających odporność na ścieranie.

Dość powszechnie popioły lotne traktuje się jako szkodliwy odpad paleniskowych co jest mylne, bowiem ten bogaty w glinokrzemiany materiał może znaleźć (i znajduje) zastosowanie w gospodarce (np. do utwardzania gruntów, produkcji spoiw bezzementowych, jako dodatku do cementu, do produkcji betonu, produkcji kruszyw lekkich, wykorzystania w rolnictwie i ogrodnictwie). Odpowiednie przetworzenie takich produktów ubocznych ze spalania paliw pozwoli też na jeszcze szersze ich gospodarcze wykorzystanie. Umożliwi to ograniczenie ilości materiału wymagającego składowania, także w przypadku UPS ze spalania różnych paliw odpadowych, w tym niebezpiecznych lub zabezpieczenie odpadów niebezpiecznych przed wymywalnością metali ciężkich. Ponadto może być możliwe przetworzenie do materiałów użytkowych odpadów paleniskowych składowanych do tej pory w wielu miejscach.

W związku z powyższym podjęta przez Doktoranta tematyka badawcza jest ważna i wpisuje się doskonale w nurt gospodarki obiegu zamkniętego, a zdefiniowany zakres tematyczny i cel pracy nie budzi zastrzeżeń.

Ocena merytoryczna rozprawy

W rozdziale pierwszym autor zwięźle (na 7 stronach) prezentuje perspektywę wykorzystania paliw kopalnych do produkcji energii, czemu towarzyszyć będzie wytwarzanie *Uboecznych Produktów Spalania* ale jednocześnie wskazuje na potencjach UPS zgromadzonych w latach wcześniejszych i możliwości ich przetworzenia i gospodarczego wykorzystania.

Rozdział 2 stanowi przegląd literatury z zakresu problematyki zagospodarowania UPS z uwzględnieniem ich zeszkliwiania. W punkcie 2.7 przedstawiono kilka metod zeszkliwiania odpadów w skali laboratoryjnej, natomiast w punkcie 2.8 przedstawiono przykłady rozwiązań technicznych procesu witrifikacji w skali przemysłowej (w tym dwie stosowane w Polsce technologie wytwarzania kruszywa przez spiekanie popiołów).

Rozdział 3 (pt. Budowa stanowisk do przygotowywania i zmiany parametrów witrifikatów) zawiera opis koncepcji oraz kolejne etapy budowy stanowisk badawczych, na których realizowane były prace doświadczalne - stanowisko do przetwarzania popiołu ze zmianą sposobu chłodzenia witrifikatu, stanowisko do przygotowywania próbek o płaskiej powierzchni w tygielkach do badań mechanicznych. Duże wrażenie robi instalacja badawcza COŻ do ciekłego odprowadzania żużla zbudowana w skali półtechnicznej i posiadająca duży potencjał badawczy. Doktorant zaprezentował kolejne etapy projektowania i ulepszania konstrukcji stanowisk poprzez eliminację niedociągnięć stwierdzanych w trakcie badań testowych.

W rozdziale 4 (pt. Badania stanowiskowe) przedstawiono wyniki badań laboratoryjnych. Rozdział ten zawiera opis przeprowadzonych badań laboratoryjnych wraz z wynikami badań

parametrów fizycznych otrzymanych próbek witrifikatów, w tym witrifikatów z domieszkami substancji mających poprawić jego własności. Wykazano wpływ sposobu chłodzenia witrifikatów na własności wytrzymałościowe

Pomimo ograniczeń w ilości przeprowadzonych prób na stanowisku w skali półtechnicznej (o czym doktorant wspomina na str. 108) tę część pracy uważam za niezwykle wartościową, gdyż wskazuje na faktyczny potencjał metody w skali przemysłowej. W tym etapie pracy otrzymane witrifikaty poddano badaniom na wymywalność, wytrzymałość na rozdrabnianie oraz miazdzenie wskazując na przydatność do wykorzystania gospodarczego lub bezpiecznego składowania. Szkoda tylko, że dla witrifikatów otrzymanych w skali laboratoryjnej i większej nie wykonano tego samego zestawu badań mechanicznych według tej samej procedury co pozwoliłoby wprost wnioskować o bezpośrednim wpływie zwiększenia skali instalacji.

W końcowej części rozprawy Doktorant przedstawił także analizę opłacalności produkcji witrifikatów w skali przemysłowej przy założeniu wybranego rozwiązania technologicznego i różnych kosztów składowania odpadów

Uwagi redakcyjne

Rozprawa została napisana starannie z dużą dbałością o język i jakość ilustracji prezentujących wyniki pomiarów i obliczeń. W treści pracy znaleźć można pewne drobne błędy pisarskie, jak np. „dodatkowego strumieniem popiołu” (148), „spływie żużla do w kierunku” (66¹⁰), „materiał mał strukturę” (69⁹), jednak jest ich niewiele i nie pomniejszają bardzo pozytywnego odbioru pracy.

Uwagi szczegółowe i dyskusyjne dotyczące rozprawy

- w punkcie 1.3. przedstawiono cele pracy - należy jednak zauważyć, że tezy pracy nie wybrzmiały w tym miejscu wyraźnie i trzeba doszukiwać się ich „między wierszami”. Wydaje się, że czytelniej przedstawiono je we wnioskach końcowych.
- str. 60 – w przypadku konstrukcji komory instalacji CO₂ nasuwają się pytania o zagadnienia mogące wpływać na efektywność procesu - czy modelowano także rozkład temperatury w płomieniu dobierając układ palnikowy? Jakie założono prędkości powietrza wtórnego w zastosowanym układzie 4-dyszowym i czy strefy maksymalnych temperatur płomienia „rzucane” mogły być na ściany komory paleniskowej? Czy pył do witrifikacji podawany był do komory punktowo jak wynika ze schematu na Rys. 34 (jeśli tak to czy jest to optymalne rozwiązanie jeśli podaje się go, zgodnie z założeniami, czterokrotnie więcej niż poprzez palnik)?
- w procedurze badania witrifikatów pod kątem odporności na ścieranie zabrakło wyjaśnienia co stanowi o wyniku badania – czy czas na pełne wytarcie próbki w naczyniu? Na stronie 77 Doktorant stwierdza, że dla próbek z dodatkiem stłuczki szklanej i korundu uzyskuje się odporność na ścieranie na poziomie żeliwa, a dla próbek

7,8,9 na poziomie nieco lepszym od szkła. Na jakiej podstawie wysunięto takie wnioski i jak ma się to do Rys. 42?

- str. 86-88 – pojawiają się wątpliwości do obliczonych wielkości $\Delta T/t_1$ i $\Delta T/t_2$ gdyż wyniki przedstawione w załączonych tabelkach nie do końca korespondują z danymi pokazanymi na odpowiednich rysunkach. Np. dla Rys. 44c podana w tabeli wartość $\Delta T/t_2 = 4,4$, natomiast podstawiając ΔT odczytane z tabeli oraz t_2 odczytane z wykresu wychodzi wartość 4,1. Podobnie rozbieżności występują przy pozostałych rysunkach (poza rysunkami górnymi). Wartości $\Delta T/t_1$ nie da się zweryfikować ponieważ wartość t_1 nie pokazano na rysunku.
- na stronie 98, przy analizowaniu wpływu szybkości chłodzenia wityfikatu Doktorant stwierdził, że w przypadku popiołu „Siekierki+20%stł.” wpływ na wynik miała zmiana punktu odniesienia przy obliczaniu zmiany $\Delta T/t_1$ – proszę to rozwinąć, gdyż nie wynika to wprost z rysunków 44-46.
- w powyższych badaniach wpływu szybkości chłodzenia na parametry fizyczne wityfikatu temperaturę spiekania dla popiołów z dodatkami przyjęto taką samą jak dla czystego popiołu (oznaczając jedynie „*” co wskazywać ma na pojawiającą się w tym miejscu niepewność). Czy nie badano temperatur charakterystycznych przemian dla popiołów z dodatkami (tak jak w przypadku czystych popiołów - Tab. 5)?
- wpływ procesu wityfikacji na strukturę krystaliczną substancji mineralnej w popiołach lotnych można dość dobrze wykazać z użyciem metody dyfrakcji rentgenowskiej XRD (X-ray diffraction). W przypadku zeszlonych wityfikatów uzyskuje się dyfraktogramy wskazujące na amorficzną (bądź krystaliczną) strukturę produktów. Czy takie badania wykonano czy też o amorficzności wityfikatu wnioskowano jedynie po obrazach SEM (str. 97^b)?
- dlaczego zdecydowano się na wykorzystanie różnych procedur badawczych na określenie własności mechanicznych wityfikatów z testów na stanowisku laboratoryjnym w małej skali oraz w skali półtechnicznej?
- w opisie badań na instalacji COŻ (1MWTh) zabrakło informacji o spalonym węglu. Czy było to jeden z węgli wykorzystanych w badaniach na stanowisku laboratoryjnym?

Końcowa ocena pracy

Temat rozprawy doktorskiej oraz jej wybór nie budzi zastrzeżeń zarówno merytorycznych jak i formalnych, a tematykę pracy należy uznać za odpowiednią dla dyscypliny naukowej Inżynieria Środowiska, Górnictwo i Energetyka i może być dopuszczona do publicznej obrony.

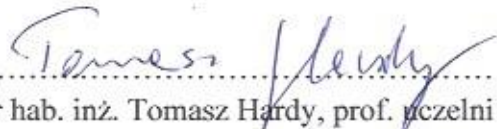
Treść recenzowanej rozprawy wskazuje, że Doktorant bardzo dobrze odnajduje się w poruszanej problematyce badawczej. Praca ma kompleksowy charakter i znaczenie praktyczne. Doktorant wykazał się umiejętnością formułowania problemu badawczego, zaproponował właściwe metody jego rozwiązania przy wykorzystaniu zarówno metod numerycznych jak i badań laboratoryjnych zrealizowanych w różnej skali.

Do osiągnięć naukowych Doktoranta należy zaliczyć zaprojektowanie i budowę unikalnych stanowisk badawczych od skali laboratoryjnej do półtechnicznej (także przy umiejętnym wykorzystaniu obliczeń numerycznych), co pozwoliło mu na eksperymentalną weryfikację postawionych tez. Uzyskane wyniki badań wskazują jednocześnie na potencjał do ich wykorzystania w instalacji skali rzeczywistej, co istotnie podnosi znaczenie praktyczne rozprawy. Doktorant wykazał się umiejętnością rozwiązywania postawionego problemu naukowego oraz umiejętną interpretacją uzyskanych wyników badań, potwierdzając w ten sposób umiejętność samodzielnego prowadzenia pracy naukowej.

Zawarte w recenzji uwagi dyskusyjne, dotyczące treści rozprawy, nie umniejszają osiągnięciu Doktoranta i w żaden sposób nie podważają pozytywnej jej oceny.

Rozprawa doktorska mgr inż. Grzegorza Nehringera pt. „Badania wpływu szybkości chłodzenia i domieszkowania popiołów lotnych z energetyki zawodowej na właściwości fizyczne witrifikatów celem polepszenia ich parametrów użytkowych” spełnia wymagania wynikające z Ustawy o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule naukowym w zakresie sztuki.

Wniosuję do Rady Dyscypliny Naukowej Inżynieria Środowiska, Górnictwo i Energetyka Politechniki Warszawskiej o dopuszczenie Pana mgr inż. Grzegorza Nehringera do dalszych etapów postępowania o nadanie stopnia doktora i do publicznej obrony rozprawy doktorskiej.


.....
dr hab. inż. Tomasz Hardy, prof. uczelni