



AKADEMIA GÓRNICZO-HUTNICZA

IM. STANISŁAWA STASZICA W KRAKOWIE

Wydział Inżynierii Lądowej i Gospodarki Zasobami

Katedra Inżynierii Środowiska

Prof. dr hab. inż. Barbara Tora

Kraków, 2. lutego 2024r.

Recenzja rozprawy doktorskiej

Pana mgr inż. Grzegorza Nehringa pt **Badania wpływu szybkości chłodzenia i domieszkowania popiołów lotnych z energetyki zawodowej na właściwości fizyczne witrifikatów celem polepszenia ich parametrów użytkowych**

#### **Podstawa formalna**

Podstawą wykonania niniejszej recenzji jest uchwała Rady Dyscypliny Naukowej Inżynieria Środowiska, Górnictwo i Energetyka Politechniki Warszawskiej z dnia 21 listopada 2023 r. powołująca recenzentów w przewodzie doktorskim mgr inż. Grzegorza Nehringa. Recenzja została wykonana zgodnie z Ustawą z dnia 20 lipca 2018 r. Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz. U. 2018 poz. 1668 z późn. zmianami) i pismem w tej sprawie profesora dr hab. inż. Tomasza Wiśniewskiego, Przewodniczącego Dyscypliny Naukowej Inżynieria Środowiska, Górnictwo i Energetyka z dnia 5.12.2023 r.

#### **Ocena rozprawy doktorskiej**

Recenzowana rozprawa doktorska mgr inż. Grzegorza Nehringa pt: *Badania wpływu szybkości chłodzenia i domieszkowania popiołów lotnych z energetyki zawodowej na właściwości fizyczne witrifikatów celem polepszenia ich parametrów użytkowych* została przygotowana w Instytucie Techniki Ciepłej Politechniki Warszawskiej oraz w Instytucie Energetyki w Zakładzie Procesów Ciepłych Promotorem rozprawy jest prof. dr hab. inż. Krzysztof Badyda.

Rozprawa stanowi podsumowanie dotychczasowych prac Doktoranta i jest powiązana z badaniami przedstawionymi w sześciu wcześniejszych publikacjach których Doktorant jest współautorem.

poprawy ich parametrów wytrzymałościowych. Przebadanym parametrem jest zmiana szybkości chłodzenia roztopionego popiołu i domieszkowanie go stłuczką szklaną. Ważnym etapem rozwiązania problemu badawczego jest wykonanie badań w celu sprawdzenia możliwości wysokosprawnej separacji popiołów i możliwości modyfikacji właściwości fizykochemicznych otrzymywanych witrifikatów. W tym celu zaprojektowano stanowiska badawcze i przeprowadzono badania na stanowisku do przetapiania popiołu i zmiany sposobu chłodzenia, stanowisku do przygotowywania próbek o płaskiej powierzchni w tygielkach, stanowisku do ciekłego odprowadzania żużła w skali 1 MW<sub>th</sub> wyposażonego w dedykowany do tej technologii palnik czterodyszowy. Dla przemysłowej produkcji witrifikatów w ramach pracy została zaproponowana technologia ciekłego odprowadzania żużła.

Badania zainicjowane zostały w pracach nad sposobem zagospodarowania popiołu z wykorzystaniem ciekłego odprowadzania żużła. W trakcie prac koncepcyjnych powstał pomysł przeprowadzenia badań w celu sprawdzenia możliwości wysokosprawnej separacji popiołów i możliwości modyfikacji właściwości fizykochemicznych otrzymywanych witrifikatów. W wyniku badań wstępnych wypracowano koncepcję nowych stanowisk badawczych na których realizowane były prace doświadczalne.

W pracy wykorzystano popioły z elektrowni: EC „Siekierki”, Zakład „Jastrzębie-Zdrój” i EC „Fortum Zabrze”. Przygotowanie próbek było realizowane na zaprojektowanych i wykonanych w Instytucie Energetyki stanowiskach badawczych, a same pomiary parametryczne witrifikatów przeprowadzono w Instytucie Techniki Lotniczej i Mechaniki Stosowanej Politechniki Warszawskiej.

### **Cel, zakres i tezy pracy**

Pierwotnym zamierzeniem Autora było przebadanie wpływu szybkości chłodzenia witrifikatu powstającego w procesie spalania węgla na jego właściwości w celu wykorzystania powstałych, ulepszonych cieplnie witrifikatów w materiałach budowlanych i inżynierskich. Jednak w trakcie wykonywania badań i szerokiego przeglądu literatury, Autor wywnioskował, że sama szybkość chłodzenia witrifikatu nie zapewni unikatowych właściwości pozyskanych w ten sposób materiałów. Dlatego zakres badań został poszerzony o prace mające na celu uzyskanie właściwego składu mieszanki przetapianej poprzez domieszkowanie innych składników, takich jak: stłuczka szklana, korund, popiół ze spalania z kotłów „wszystkopalnych” przy znacznym udziale RDF. Celem tych dodatkowych badań było uzyskanie witrifikatu o zwiększonej odporności na ścieranie i lepszych właściwościach wytrzymałościowych, tak aby spełnić wymagania prób wytrzymałościowych (badania w młynku Los Angeles) wytrzymałości na miażdżenie i innych.

W drugiej części pracy Doktorant udowodnił tezę, że możliwe jest wytworzenie witrifikatu w zaproponowanej technologii pyłowego spalania węgla w skali 1 MW<sub>th</sub>. (wielkość jak dla dużego zakładu energetycznego) - z jednoczesną generacją ciepła i wysoko sprawną separacją popiołów pochodzących bezpośrednio z paliwa węglowego lub z dodatkowego

strumieniem popiołu. Możliwość modyfikacji właściwości witrifikatu polepszająca jego właściwości jest pochodną wyników otrzymanych w pierwszej części pracy.

### **Struktura rozprawy**

Rozprawa składa się z pięciu rozdziałów, zawartych na 122 stronicach standardowego tekstu. Rozdział pierwszy zawiera wprowadzenie dotyczące perspektyw produkcji energii elektrycznej w Polsce oraz potencjalnej produkcji popiołów lotnych w energetyce zawodowej, oraz opis genezy, celu i zakresu pracy

Rozdział drugi zawiera przegląd literatury w którym Doktorant opisał kierunki zagospodarowania ubocznych produktów spalania, szczególnie popiołów lotnych, metody witrifikacji popiołów i ich przemysłowe wdrożenia.

Trzeci rozdział zawiera opis przygotowanego stanowiska do witrifikacji zabudowanego w Instytucie Energetyki – skonstruowano stanowisko do przetapiania popiołu i kolejno modyfikowano sposób chłodzenia, stanowisko do przygotowaniu próbek o płaskiej powierzchni, stanowisko (o mocy 1MW<sub>Th</sub>) do ciekłego odprowadzenia zużła.

Rozdział czwarty jest poświęcony opisowi badań stanowiskowych przeprowadzonych przez Autora – zawiera wyniki badań badanych popiołów, badania procesu witrifikacji, badania produktów witrifikacji a także analizę opłacalności przedsięwzięcia.

W rozdziale piątym Autor przedstawił wnioski końcowe ze wskazaniem kierunków dalszych badań.

Autor zamieścił również wykaz wykorzystanych pozycji literaturowych, spis tabel i rysunków. Układ pracy jest poprawny, proporcje kolejnych części dobrze oddają ich istotność.

### **Wykorzystana literatura**

Przeгляд literatury zawiera 82 pozycje – obejmuje publikacje zagraniczne i krajowe, w tym dyrektywy, normy i ustawy. Doktorant przytoczył sześć pozycji literaturowych dotyczących witrifikacji popiołów lotnych których jest współautorem. Literatura jest starannie wyselekcjonowana z dużej ilości dostępnych pozycji i jest dobrze wykorzystana w treści rozprawy.

### **Realizacja celu rozprawy, metodyka**

Proces witrifikacji (zeszkliwienia) popiołów często jest wykorzystywany do neutralizacji składników niebezpiecznych w nich zawartych, w tym metali ciężkich. Metoda witrifikacji pozwala uzyskać produkt bezpieczny dla środowiska, chętnie wykorzystywany w przemyśle ceramicznym czy w budownictwie. Uzyskanie szklanej postaci wymaga stopienia popiołu (w temperaturze 1300÷1450°C), a następnie jego intensywnego schłodzenia. Zeszklenie popiołów możliwe jest dzięki krzemionce (SiO<sub>2</sub>) obecnej w ich masie. Dodatek rozdrobnionego szkła gospodarczego do witrifikacji popiołów obniża temperaturę reakcji syntezy termicznej i w konsekwencji zmniejsza zapotrzebowanie na energię.

Cel recenzowanej pracy został określony wyniki podsumowania szeregu prac badawczych jakie zostały przeprowadzone z udziałem Doktoranta w Instytucie Energetyki.

Realizacja tematyki badawczej podejmowanej przez Instytut Energetyki dotyczącej spalanie paliw trudnych, o obniżonej zawartości części lotnych i dużej zawartości popiołu, doprowadziła do opracowania konstrukcji palników wysokostabilizujących proces spalania. Do zainteresowań badawczych należało również przekształcanie UPS do postaci materiałów użytecznych. Ponadto w trakcie współpracy z jedną z polskich elektrowni węgla brunatnego w Instytucie opracowano założenia technologiczne i ekonomiczne utylizacji popiołu do postaci produktu rynkowego, w celu jego zagospodarowania z dodatnim wynikiem ekonomicznym. Zaproponowanym sposobem zagospodarowania popiołu było ciekłe odprowadzanie żużla. W trakcie prac koncepcyjnych powstał pomysł przeprowadzenia szerzej zakrojonych badań w celu sprawdzenia możliwości wysokosprawnej separacji popiołów i możliwości modyfikacji właściwości fizykochemicznych otrzymywanych witrifikatów. Zakres tych badań był na tyle szeroki, a wstępne wyniki obiecujące, że pojawiła się koncepcja rozwinięcia ich i kontynuacji na nowo opracowanych stanowiskach badawczych, a następnie podsumowania w postaci recenzowanej rozprawy doktorskiej.

Pierwotnym zamierzeniem Doktoranta było przebadanie wpływu szybkości chłodzenia witrifikatu powstającego w procesie spalania węgla na jego właściwości w celu wykorzystania powstałych, ulepszonych cieplnie, witrifikatów w materiałach budowlanych i inżynierskich. W trakcie wykonywania badań i szerokiego przeglądu literatury, Doktorant wywnioskował, że sama szybkość chłodzenia witrifikatu nie zapewni unikatowych właściwości pozyskanych w ten sposób materiałów. Z tego powodu zakres badań został poszerzony o prace mające na celu uzyskanie właściwego składu mieszanki przetapianej poprzez domieszkowanie innych składników, takich jak: stłuczka szklana, korund, popiół ze spalania z kotłów „wszystkopalnych” przy znacznym udziale RDF.

Celem tych dodatkowych badań było wyprodukowanie witrifikatu o zwiększonej odporności na ścieranie i lepszych własnościach wytrzymałościowych, tak aby spełnić wymagania odbiorców w zakresie parametrów fizycznych.

Na treść rozprawy składają się dobrze przedstawione:

- wstęp teoretyczny dotyczący perspektyw czasowych energetyki opartej na węglu w kontekście nieuniknionej i niezbędnej transformacji polskiej energetyki; przegląd metod zagospodarowania ubocznych produktów spalania; przegląd technologii witrifikacji i przemysłowego wykorzystania procesu pełnej lub częściowej witrifikacji;
- opis koncepcji oraz budowy stanowisk badawczych, na których realizowane były prace doświadczalne (stanowisko do przetapiania popiołu i zmiany sposobu chłodzenia, stanowisko do przygotowywania próbek o płaskiej powierzchni w tygielkach, stanowisko do ciekłego odprowadzania żużla zbudowane w skali półtechnicznej – moc 1 MW);
- opis przeprowadzonych badań stanowiskowych próbek witrifikatu, w tym witrifikatu z domieszkami substancji mających poprawić jego własności,
- ocena przeprowadzonych badań oraz parametrów badanych materiałów oraz analizy opłacalności produkcji witrifikatów.

Doktorant dobrze zaplanował i zrealizował cykl badań. Uzyskane wyniki potwierdzają pomyślne zrealizowanie celów pracy i udowodnienie założonych tez rozprawy. Przyjęta metodyka badawcza jest adekwatna do założonych celów pracy i pozwoliła na uzyskanie pozytywnych rezultatów.

#### **Wykorzystanie praktyczne uzyskanych wyników**

Efektem energetycznego wykorzystania paliw kopalnych jest m.in. powstawanie odpadów stałych (żużli i popiołów). Celowym kierunkiem badań nad zagospodarowanie odpadów elektrownianych jest poszukiwanie innych metod wykorzystania, alternatywnych do składowania. Przykładem takich metod są metody termiczne, a szczególnie witryfikacja, która sprawdziła się w unieszkodliwianiu odpadów niebezpiecznych i przemysłowych ze względu na stabilność i wysoką odporność chemiczną otrzymywanych produktów w różnorodnych warunkach środowiskowych. Dzięki odpowiedniemu doborowi składników w procesie witryfikacji można otrzymać szkła i materiały ceramiczne o chemicznych i fizycznych właściwościach porównywalnych lub lepszych niż dostępne produkty komercyjne. Zastosowanie w tym procesie jako surowców materiałów odpadowych stwarza możliwość ponownego ich wykorzystania i wprowadzenia na rynek jako pełnowartościowego produktu bez konieczności składowania jakichkolwiek pozostałości po procesie

W recenzowanej pracy przedstawiono wyniki badań nad możliwością modyfikacji parametrów procesowych wytwarzania witryfikatów z popiołów w celu podniesienia parametrów wytrzymałościowych, a przez to zwiększenia atrakcyjności ekonomicznej otrzymywanych w ten sposób półproduktów. Podstawowym parametrem przebadanym w rozprawie jest zmiana szybkości chłodzenia roztopionego popiołu i domieszkowanie go stłuczką szklaną i/lub korundem w różnych konfiguracjach. W pracy wykorzystano popioły z elektrowni: EC „Siekierki”, Zakład „Jastrzębie-Zdrój” i EC „Fortum Zabrze”. Przygotowanie próbek było realizowane na zaprojektowanych i wykonanych w Instytucie Energetyki stanowiskach badawczych, a same pomiary parametryczne witryfikatów przeprowadzono w Instytucie Techniki Lotniczej i Mechaniki Stosowanej Politechniki Warszawskiej i w firmach zewnętrznych. Dla przemysłowej produkcji witryfikatów w ramach pracy została zaproponowana technologia ciekłego odprowadzania żużla w skali 1 MW<sub>th</sub> wyposażona w dedykowany do tej technologii palnik czterodyszowy. W ramach pracy zostały przeprowadzone obliczenia ekonomiczne, będące podstawą do przedstawienia oceny opłacalności produkcji witryfikatów w technologii węglowej z wykorzystaniem kotła energetycznego współpracującego z komorą topienia.

Pytanie uzupełniające:

1. Proszę o komentarz na temat Analizy Cyklu Życia (LCA) witryfikatu i śladu środowiskowego procesu, jak witryfikacja wpisuje się w zasady zrównoważonego rozwoju
2. Proszę o analizę możliwości odzysku ciepła odpadowego z instalacji witryfikacji popiołów
3. Możliwość zastosowania procesów witryfikacji w postępowaniu z odpadami niebezpiecznymi

## Podsumowanie

Stwierdzam, że pan mgr inż. Grzegorz Nehring posiada szeroką wiedzę teoretyczną w dziedzinie Nauk Inżynieryjno-Technicznych, w dyscyplinie Inżynieria Środowiskowa, Górnictwo i Energetyka, co pozwoliło mu przedstawić rozprawę doktorską pokazującą własne osiągnięcie naukowe w szerokim kontekście zagadnień związanych wykorzystaniem popiołów lotnych z elektrowni zawodowych.

Przedstawione rozwiązanie stanowi oryginalny dorobek Doktoranta.

W recenzowanej rozprawie Doktorant przedstawił wyniki badań nad możliwością modyfikacji parametrów procesowych wytwarzania wtryskiwaczy z popiołów w celu podniesienia parametrów wytrzymałościowych. Podstawowym przebadanym parametrem jest zmiana szybkości chłodzenia roztopionego popiołu i domieszkowanie go stłuczką szklaną i/lub korundem w różnych konfiguracjach. W celu zrealizowania celu pracy Doktorant zaprojektował i wykonał specjalistyczne stanowiska badawcze. Dla przemysłowej produkcji wtryskiwaczy zaproponował technologię ciekłego odprowadzania żużla (badania na stanowisku w skali 1 MWt) z wykorzystaniem dedykowanego do tej technologii palnika czterodyszowego.

Zrealizowany zakres pracy świadczy o dużej wiedzy Doktoranta i Jego umiejętności rozwiązywania problematyki badawczej.

W podsumowaniu rozprawy Doktorant przedstawił obliczenia ekonomiczne, przedstawiając ocenę opłacalności produkcji wtryskiwaczy w opracowanej przez siebie technologii węglowej z wykorzystaniem koka energetycznego współpracującego z komorą topienia.

Przedstawiona rozprawa doktorska stanowi oryginalne rozwiązanie problemu naukowego, który posiada istotne znaczenie dla rozwoju wiedzy w dyscyplinie „Inżynieria Środowiska, Górnictwo i Energetyka”, szczególnie w odniesieniu do technologii wykorzystania odpadów z energetyki zawodowej. W trakcie realizacji rozprawy Doktorant wykazał bardzo dobrą znajomość ogólnej i szczegółowej wiedzy związanej z tematyką rozprawy doktorskiej oraz wysokimi kompetencjami zawodowymi w obszarze planowania badań laboratoryjnych i półtechnicznych, interpretacji i analizy wyników. Umiejętnie korzystał z zaawansowanych i nowoczesnych technik badawczych i walidacji uzyskanych wyników. W pełni potwierdził umiejętność organizacji pracy naukowej oraz jej samodzielnej realizacji.

Na tej podstawie stwierdzam, że zostały spełnione wszystkie wymagania formalne stawiane rozprawom doktorskim, określone w obowiązującej Ustawie z dnia 20 lipca 2018 r., Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz. U. 2023, poz. 742) i wnoszę do Rady Dyscypliny Inżynieria Środowiska, Górnictwo i Energetyka Politechniki Warszawskiej o **przyjęcie rozprawy doktorskiej mgr inż. Grzegorza Nehringa i dopuszczenie Go do dalszych etapów postępowania o nadanie stopnia doktora nauk technicznych.**

