

Gdańsk, 22.10.2023 r.

Prof. dr hab. inż. Jerzy Mizeraczyk
Katedra Elektroniki Morskiej
Wydział Elektryczny
Uniwersytet Morski w Gdyni
Morska 81-87
81-225 Gdynia

Recenzja rozprawy doktorskiej mgr. inż. Artura Marchewicza
pt.

Analiza mechanizmów aglomeracji cząstek aerozolu pod wpływem sił elektrostatycznych

1. Podstawa prawna wykonania recenzji

- Uchwała Rady Naukowej IMP PAN nr 66/2023 z dnia 15.06.2023 r. w sprawie powołania recenzentów w postępowaniu o nadanie mgr. inż. Arturowi Marchewiczowi stopnia doktora.
- Prośba Zastępcy Dyrektora do spraw Naukowych Instytutu Maszyn Przepływowych PAN w Gdańsku, dr hab. inż. Grzegorza Żywicy, profesora IMP PAN z dnia 26.07. 2023 r. o opracowanie recenzji wyżej wymienionej rozprawy doktorskiej.
- Art. 13 z dnia 14 marca 2003 r. *o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki* (Dz. U. z 2017 r., poz. 1789. z późn. zm.) oraz art. 179 ust. 2 ustawy z dnia 3 lipca 2018 r. *Przepisy wprowadzające ustawę Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce* (Dz. U. z 2018 r., poz. 1669 z późn. zm.)

2. Sylwetka Doktoranta

Mgr inż. Artur Marchewicz, którego dalej będę nazywał Doktorantem, urodził się w 1989 r. w Kartuzach. W roku 2013 po obronieniu pracy magisterskiej pt. „*Badania optymalizacyjne dyszy rozpylacza z elektrostatycznym ładowaniem kropli*” ukończył studia magisterskie na Wydziale Mechanicznym Politechniki Gdańskiej (PG) na kierunku Mechanika i Budowa Maszyn w specjalności Zaawansowane Technologie Ciepłno-Przepływowe. Rok wcześniej, tj. w roku 2012 Doktorant rozpoczął pracę w Instytucie Maszyn Przepływowych P.A.N. w Zakładzie Elektrodynamiki, najpierw na stanowisku specjalisty a następnie od roku 2018 do dnia dzisiejszego - na stanowisku asystenta. Jego przewód doktorski został otwarty 16.04.2019 r.

Doktorant uczestniczył w kilku projektach badawczych, które dotyczą bezpośrednio lub pośrednio tematyki pracy doktorskiej. Są to:

- Projekt NCBiR o akronimie HYBRYDA+ (POIR.04.01.04-00-0096/17-02) pt.: *HYBRYDOWY system ograniczenia emisji składników kwaśnych i popiołów lotnych ze spalin* (2018-2022). W ramach projektu opracowany został system oczyszczania spalin w skali przemysłowej, którego jednym z elementów był aglomerator elektrostatyczny. Doktorant był współautorem projektu aglomeratora i stanowiska pomiarowego, uczestniczył w pracach konstrukcyjnych i wykonał obszerne badania eksperymentalne, których wyniki m.in. analizuje w recenzowanej rozprawie doktorskiej.
- Projekt NCBiR o akronimie ELAGLOM (PBS2/B4/9/2014) pt.: *Opracowanie innowacyjnej metody ograniczenia emisji cząstek submikronowych w spalinach i gazach odlotowych* (2014-2017). Celem projektu było opracowanie dwustopniowego systemu usuwania cząstek popiołu lotnego ze spalin. System składał się z elektrofiltru i aglomeratora elektrostatycznego. Doktorant był współautorem projektu aglomeratora elektrostatycznego i stanowiska pomiarowego oraz uczestniczył w pracach konstrukcyjnych i badawczych.
- Projekt UE FP7 o akronimie DEECON (grant agreement no 284745) pt.: *Innovative After-Treatment System for Marine Diesel Engine Emission Control* (2011-2014). Projekt ten dotyczył wytworzenia innowacyjnych urządzeń oczyszczających gazy spalinowe powstające w silnikach okrętowych. Doktorant uczestniczył w pracach projektowych, konstrukcyjnych i badawczych skrubera elektrostatycznego do usuwania submikrometrowych cząstek stałych.

Doktorant jest współautorem 37 recenzowanych artykułów naukowych. 23 z tych artykułów zostało opublikowane w czasopismach indeksowanych w bazie Clarivate Web of Science (m.in. w *Progress in Energy and Combustion Science*, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, *Wear*, *Tribology International*, *Process Safety and Environmental Protection*, *Separation and Purification Technology*, *Journal of Electrostatics*). W 3 z tych artykułów Doktorant jest pierwszym autorem. Doktorant zaprezentował 2 postery i 5 komunikatów oralnych oraz jest współautorem 41 prezentacji na konferencjach krajowych i zagranicznych. Otrzymał nagrodę „Günter Lüttgens Young Scientist Award” za najlepsze wystąpienie na konferencji *International Conference on Electrostatics*, która odbyła się we Wrocławiu w 2022 roku. Jest współautorem 1 patentu krajowego. Artykuły Doktoranta były cytowane 490 razy (bez autocytowań). Indeks Hirscha przypisywany Doktorantowi wynosi 12.

Jak widać z powyższej notki biograficznej, Doktorant zaznaczył swoją obecność naukową w środowisku naukowym zajmującym się oczyszczaniem spalin, mechaniką aerozoli i elektrostatyką.

3. Aktualność problematyki naukowej rozprawy i celowość jej podjęcia

Tematyka niniejszej rozprawy doktorskiej dotyczy aglomeracji cząstek aerozoli w kontekście zastosowania tego zjawiska do oczyszczania różnego rodzaju gazów spalinowych. Kontrola emisji gazów spalinowych pod kątem obecności w nich submikrometrowych i mikrometrowych cząstek stałych i ciekłych stanowi obecnie jedno z najważniejszych zadań ochrony środowiska naturalnego. Obecność cząstek stałych i ciekłych w atmosferze stanowi zagrożenie dla zdrowia i życia ludzi oraz zwierząt. Badania wpływu wdychanych cząstek na układy oddechowy i krążenia ludzi ciągle dostarczają nowych dowodów na związek między zanieczyszczeniem atmosfery a chorobami, w tym nowotworowymi stwierdzonymi w populacji ludzkiej. Ze statystyk wynika, że setki tysięcy ludzi umiera rocznie na świecie z powodu chorób spowodowanych obecnością w ich organizmach cząstek, które są pozostałością procesu oddychania.

Emisja do atmosfery niebezpiecznych dla ludzi i zwierząt cząstek w różnych rodzajach aerozolu jest objęta regulacjami i kontrolą prawną. Regulacje te ulegają ciągłemu zaostrzeniu, co sprawia, że istnieje zapotrzebowanie na wysokosprawne urządzenia, które zmniejszają liczbę cząstek w emitowanych aerozolu. O ile usuwanie z aerozoli cząstek o mikrometrowych rozmiarach jest stosunkowo dobrze opanowane technicznie, to dużą trudność stanowi usuwanie cząstek submikrometrowych ($0,1 - 1 \mu\text{m}$), które z powodu swoich rozmiarów są szczególnie niebezpieczne dla organizmów żywych. Poszukuje się zatem takich urządzeń, które skutecznie usuwałyby także cząstki submikrometrowe z emitowanych aerozoli.

W swojej rozprawie Doktorant analizuje jedno z rozwiązań takiego urządzenia. Proponuje mianowicie wykorzystanie zjawiska aglomeracji submikrometrowych cząstek unipolarnych z obecnymi w aerozolu cząstkami większymi jako skuteczny sposób na zmniejszenie ilości cząstek submikrometrowych a w końcowym efekcie na zwiększenie skuteczności usuwania wszystkich cząstek z aerozolu. Zaproponowana przez Doktoranta problematyka badawcza związana z tą propozycją wychodzi naprzeciw aktualnemu zapotrzebowaniu na urządzenia odpylające skutecznie także cząstki submikrometrowe.

Liczba badań dotyczących zjawiska aglomeracji cząstek unipolarnych, opisanych w literaturze naukowej jest skromna. Badania i ich wyniki zaprezentowane przez Doktoranta

w niniejszej rozprawie są ważnym wkładem do wiedzy na temat podstaw i zastosowań praktycznych tego zjawiska.

Podsumowując, tematyka aglomeracji cząstek unipolarnych aerozolu będąca przedmiotem badań Doktoranta jest aktualnym i ważnym obszarem badawczym zarówno z punktu widzenia badań podstawowych jak i perspektywy zastosowania praktycznego w obszarze oczyszczania różnego rodzaju gazów ekologicznie szkodliwych.

4. Cel i teza rozprawy

Zadaniem, jakie Doktorant sobie postawił było teoretyczne i eksperymentalne przebadanie procesu aglomeracji unipolarnych cząstek aerozolu pod wpływem sił elektrostatycznych w przemiennym polu elektrycznym. W realizacji tego celu niewiele mu pomagały wyniki nielicznych publikacji w literaturze przedmiotu, bazujące na modelach statycznych tego zjawiska i prawie oddziaływania Coulomba, które sugeruje, że aglomeracja unipolarnych cząstek aerozolu jest niemożliwa. W tej sytuacji głównym celem Doktoranta było więc zrewidowanie istniejących modeli aglomeracji cząstek aerozolu pod kątem przeanalizowania mechanizmów umożliwiających aglomerację jednoimiennie naelektryzowanych cząstek aerozolu podczas ich ruchu.

Doktorant stawia zatem następującą tezę badawczą: ***możliwa jest aglomeracja jednoimiennie naładowanych cząstek aerozolu w przemiennym polu elektrycznym.***

Z tekstu rozprawy wynika, że Doktorant ma na myśli aglomerację jednoimiennie naładowanych cząstek aerozolu w przemiennym polu elektrycznym w jednostopniowym aglomeratorze.

Według Doktoranta udowodnienie tezy rozprawy wymaga rozwiązania dwóch problemów badawczych. Pierwszym problemem (P1) jest opracowanie modelu fizycznego mechanizmu umożliwiającego aglomerację jednoimiennie naelektryzowanych cząstek aerozolu. Drugim problemem badawczym (P2) jest eksperymentalna weryfikacja tego modelu, czyli eksperymentalne sprawdzenie, czy pod wpływem elektrostatycznej aglomeracji cząstek unipolarnych zmienia się koncentracja, morfologia i rozkład frakcyjny cząstek aerozolu oraz czy następuje poprawa frakcyjnej skuteczności oczyszczania aerozolu.

Warto podkreślić, że drugi problem badawczy (P2), czyli weryfikację postawionej tezy na drodze eksperymentalnej Doktorant realizował w rzeczywistych warunkach przemysłowych na instalacji badawczej umieszczonej na kanale spalin bloku nr 12 o mocy 225 MW w Elektrowni Łaziska Górne w ramach projektu NCBiR o akronimie HYBRYDA+. Przeprowadzona w tych

warunkach weryfikacja metody aglomeracji jednoimiennie naładowanych cząstek aerozolu jest demonstracją praktycznej użyteczności badań realizowanych przez Doktoranta.

W mojej opinii sformułowanie celu i tezy rozprawy nie budzi wątpliwości.

5. Zakres rozprawy

Rozprawa doktorska składa się z 7 rozdziałów i wykazu literatury. Łącznie liczy ona 170 stron.

Rozdział 1 jest krótkim wstępem omawiającym aerozole, cząstki aerozoli, ich negatywny wpływ na środowisko naturalne oraz sposoby usuwania cząstek aerozoli, w tym aglomerację cząstek unipolarnych i bipolarnych.

W rozdziale 2 przedstawiony jest cel i teza badawcza rozprawy oraz jej zakres. Wydaje się, że skumulowanie tych trzech wątków w jednym rozdziale zmniejsza przejrzystość rozprawy. Cel i tezę badawczą rozprawy omówiłem powyżej w rozdziale 4. Poniżej krótko przedstawiam zakres rozprawy.

Rozdział 3 poświęcony jest równaniom mechaniki naelektryzowanego aerozolu. W podrozdziale 3.1 przedstawione są podstawowe zagadnienia dotyczące mechaniki naelektryzowanego aerozolu. Omówione zostały w nim parametry mechaniczne i elektryczne charakteryzujące naelektryzowany aerosol. Opisany został także polowy i dyfuzyjny mechanizm elektryzowania cząstek aerozolu. Przedstawione zostało równanie ruchu cząstek aerozolu, uwzględniające podstawowe siły działające na cząstki w turbulentnym polu przepływu gazu, polu elektrycznym i polu grawitacyjnym. W podrozdziale 3.2 omówiono podstawy fizyczne procesu aglomeracji cząstek aerozolu. Opisano m.in. dyfuzję cząstek, ich bezwładność oraz oddziaływanie z turbulentnym polem przepływu i siłami grawitacji. Omówiono udział siły elektrycznej w zderzeniach cząstek oraz jej wpływ na trwałość aglomeratów. Przedstawiono także inne siły wpływające na trwałość aglomeratów, tj. siłę Van der Waalsa i siłę wynikającą z obecności mostków cieczowych. W końcowej części tego podrozdziału omówiono metody badań eksperymentalnych morfologii, koncentracji i rozkładów wielkości cząstek, których znajomość jest podstawą do oceny skuteczności procesu aglomeracji. W podrozdziale 3.3 przedstawiono metody aglomeracji cząstek aerozolu w układach odpylających. Skupiono się głównie na dwóch elektrostatycznych metodach aglomeracji: unipolarnej i bipolarnej. Pokróćce omówiono także inne metody aglomeracji cząstek stosowane w technice odpylania (aglomerację chemiczną i akustyczną oraz aglomerację spowodowaną formowaniem się tzw. mostków cieczowych).

Rozdział 4 jest szczegółowym opisem metodyki badawczej zastosowanej w rozprawie. W podrozdziale 4.1 Doktorant opisał przedmiot badań, którym był jednostopniowy aglomerator unipolarny zastosowany w badaniach eksperymentalnych w filtrze hybrydowym umieszczonym na terenie Elektrowni Łaziska (Tauron Wytwarzani S.A.) w kanale spalin bloku nr 12 eksploatującego pyłowy kocioł węglowy OP-650 (RAFAKO S.A.). Dla tego aglomeratora Doktorant przedstawia w podrozdziale 4.2. metodykę teoretycznej analizy mechanizmów elektrostatycznej aglomeracji cząstek unipolarnych. Proponuje 3 modele teoretyczne, pierwszy opisujący pole elektryczne w układzie elektrod badanego aglomeratora, drugi opisujący ruch pojedynczej cząstki w przemiennym polu elektrycznym o trapezowym przebiegu napięcia, i trzeci model ruchu małej cząstki aerozolu opływającej większą cząstkę, uwzględniający oddziaływanie elektrostatyczne obu cząstek aerozolu. W podrozdziale 4.3 Doktorant prezentuje opracowaną przez siebie metodę automatycznej detekcji aglomeratów. W metodzie tej Doktorant zaadaptował znane algorytmy cyfrowej obróbki obrazów SEM, umożliwiające ilościowe wyznaczenie stopnia aglomeracji i rozkładu wielkości aglomeratów. W podrozdziale 4.4 Doktorant omawia metodę eksperymentalną, którą zastosował w badaniach widmowych rozkładów wielkości cząstek aerozolu (za pomocą zaprojektowanej przez siebie sondy izokinetycznej, dilutera PALAS VKL10 i optycznego analizatora wielkości cząstek TOPAS LAP 322).

Rozdział 5 zatytułowany *Analiza numeryczna mechanizmów elektrostatycznej aglomeracji cząstek unipolarnych* jest pierwszym rozdziałem, w którym Doktorant przedstawia wyniki swoich badań. Analizując mechanizmy elektrostatycznej aglomeracji unipolarnych cząstek aerozolu, Doktorant określa wpływ sił elektrycznych na trajektorie zderzeniowe cząstek aerozolu. W przeprowadzonej analizie Doktorant rozpatruje 3 modele numeryczne opisane w rozdziale 4.2. Pierwszy model dotyczy analizy rozkładu przestrzennego pola elektrycznego w układzie elektrod badanego jednostopniowego aglomeratora unipolarnego. Wyniki tej analizy przedstawia Doktorant w podrozdziale 5.1. W podrozdziale 5.2 dotyczącym drugiego modelu zaproponowanego w podrozdziale 4.2 Doktorant przedstawia wyniki numeryczne trajektorii ruchu pojedynczych cząstek aerozolu w zewnętrznym przemiennym polu elektrycznym o przebiegu trapezowym. Z otrzymanych trajektorii wynika, że naelektryzowane cząstki aerozolu poruszają się po trajektoriach oscylacyjnych o amplitudzie zależnej od wielkości cząstek. Na podstawie otrzymanych wyników rozkładu pola elektrycznego i trajektorii pojedynczych cząstek w aglomeratorze Doktorant sformułował założenia do modelu trajektorii zderzeniowych cząstek podczas procesu aglomeracji i wykorzystał je do

obliczeń w trzecim modelu opisanym w podrozdziale 4.2. Model ten dotyczy ruchu małej cząstki aerozolu opływającej większą cząstkę. Wyniki tych obliczeń w postaci trajektorii dwóch naelektryzowanych cząstek oraz analiza sił działających w procesie aglomeracji unipolarnych cząstek aerozolu ze wskazaniem najważniejszych sił Doktorant przedstawił w podrozdziale 5.3.

Wyniki przedstawione w podrozdziale 5.3 są zatem spełnieniem pierwszego (nazwanego „problemem P1” w rozdziale 4) z dwóch warunków udowodnienia tezy rozprawy. Warunkiem tym było opracowanie modelu mechanizmu fizycznego umożliwiającego aglomerację jednoimiennie naelektryzowanych cząstek aerozolu.

W rozdziale 6 zaprezentowane są wyniki badań eksperymentalnych w jednostopniowym aglomeratorze unipolarnym zamontowanym w filtrze hybrydowym w elektrowni Łaziska Górne. W podrozdziale 6.1 przedstawione są wyniki pomiarów charakterystyk prądowo-napięciowych aglomeratora dla czystych i „zabrudzonych” elektrod aglomeratora oraz wyniki przebiegów napięcia na poszczególnych jego elektrodach. W podrozdziale 6.2 pokazane są wyniki badań morfologii cząstek popiołu lotnego pobranego z kanału spalin podczas pracy aglomeratora. Badania te opierały się na jakościowej analizie zdjęć mikroskopowych SEM. Natomiast w podrozdziale 6.3 przedstawione są wyniki ilościowej analizy liczby cząstek pierwotnych tworzących aglomeraty. Do analizy ilościowej Doktorant użył opracowanej przez siebie metody detekcji aglomeratów. Metoda ta za pomocą algorytmów cyfrowej obróbki obrazów identyfikuje w pierwszym etapie rozmiary i położenie cząstek pierwotnych a następnie przyporządkowuje poszczególne cząstki pierwotne do odpowiednich aglomeratów. Na podstawie opracowanej metody Doktorant wyznaczył rozkłady wielkości aglomeratów i obliczył stopień aglomeracji. **Otrzymane w tej analizie wyniki wykazały zwiększenie stopnia aglomeracji cząstek podczas pracy jednostopniowego aglomeratora unipolarnego, co jest potwierdzeniem rezultatów wynikających z opracowanego przez Doktoranta modelu mechanizmu fizycznego nazwanego problemem P1, umożliwiającego aglomerację jednoimiennie naelektryzowanych cząstek aerozolu.** W podrozdziale 6.4 Doktorant przedstawił wyniki badań eksperymentalnych wpływu amplitudy i częstotliwości napięcia zasilania aglomeratora na rozkłady wielkości cząstek za aglomeratorem. Natomiast w podrozdziale 6.5 Doktorant pokazał wyniki badań eksperymentalnych frakcyjnej skuteczności odpylania aglomeratora współpracującego z elektrofiltrem płytowym jako pierwszym stopniem filtra hybrydowego. **Wyniki przedstawione w podrozdziałach 6.4 i 6.5 wykazały, że działanie jednostopniowego aglomeratora unipolarnego powoduje znaczny przyrost skuteczności odpylania cząstek, szczególnie w przedziale wielkości cząstek**

0,3-2 μm , a więc także cząstek submikrometrowych 0,3-1 μm . Wyniki te stanowią zatem rozwiązanie problemu P2 przedstawionego w rozdziale 4.

Wyniki eksperymentalne przedstawione rozdziale 6 są spełnieniem drugiego (nazwanego „problemem P2” w rozdziale 4) z warunków udowodnienia tezy rozprawy. Warunkiem tym była eksperymentalna weryfikacja opracowanego modelu mechanizmu fizycznego umożliwiającego aglomerację jednoimiennie naelektryzowanych cząstek aerozolu.

Wyniki analiz teoretycznych (rozdział 5) i badań eksperymentalnych (rozdział 6) wskazują na to, że oba problemy badawcze P1 i P2 postawione przez Doktoranta zostały rozwiązane, a tym samym teza rozprawy została udowodniona.

Podsumowanie wyników rozprawy prowadzących do udowodnienia tezy rozprawy oraz propozycje dalszych badań w tej dziedzinie Doktorant przedstawił w rozdziale 7.

Na końcu rozprawy znajduje się spis literatury (171 pozycji) wykaz liczego dorobku publikacyjnego Doktoranta (37 artykułów), obejmującego również 14 artykułów dotyczących zagadnień związanych z tematem rozprawy doktorskiej.

Szeroko przeze mnie omówiony powyżej zakres rozprawy, sposób rozwiązania postawionych celów i metodyka wykonanych badań świadczą o tym, że Doktorant posiada dużą wiedzę literaturową oraz umiejętności prowadzenia badań naukowych, które z powodzeniem zastosował do zrealizowania głównych celów niniejszej rozprawy doktorskiej.

6. Znajomość i analiza światowych źródeł literaturowych przez Doktoranta. Umiejętność prezentacji uzyskanych wyników. Redakcja rozprawy

W rozprawie uwzględnione zostały najnowsze dane z dziedziny aglomeracji cząstek aerozolu i oczyszczania gazów z cząstek. Doktorant cytuje łącznie 171 pozycji literaturowych, z których 30 z lat 2010-2023 dotyczy wyłącznie tematyki aglomeracji cząstek aerozolu. W rozdziale 3 Doktorant przedstawił bardzo porządną przeglądu literaturowy dotyczący mechaniki naelektryzowanych cząstek aerozolu z szczególnym omówieniem parametrów wpływających na proces aglomeracji cząstek. Wykonana przez Doktoranta analiza literatury nie budzi wątpliwości.

Organizacja i strona redakcyjna rozprawy są dobre. W szczególności umiejętnie napisane rozdziały wstępne, od rozdziału 1 do rozdziału 3, przeprowadzają płynnie mniej biegłego czytelnika od podstawowych charakterystyk naelektryzowanych aerozoli poprzez zjawiska

zachodzące w procesie aglomeracji cząstek aerozolu do konkretnych rozwiązań aglomeratorów elektrostatycznych. Rozprawa jest przejrzysta i łatwa w percepcji.

Nie wnoszę uwag do strony redakcyjnej rozprawy.

7. Najważniejsze osiągnięcia rozprawy

Najważniejsze osiągnięcia naukowe Doktoranta zaprezentowane w niniejszej rozprawie doktorskiej są następujące:

- Na drodze analitycznej Doktorant wykazał, że głównymi mechanizmami, które umożliwiają aglomerację cząstek jednoimiennie naelektryzowanych są polaryzacja cząstek w zewnętrznym polu elektrycznym oraz zaindukowanie ładunku na powierzchni zbliżających się do siebie naelektryzowanych cząstek (co skutkuje powstaniem tzw. sił obrazowych). Dotychczasowe modele teoretyczne znane z literatury nie uwzględniały ruchu naelektryzowanych cząstek i jego konsekwencji a uwzględniały jedynie oddziaływanie coulombowskie między cząstkami,
- Doktorant opracował metodę detekcji aglomeratów bazującą na algorytmach cyfrowej obróbki obrazów. Dotychczas algorytmy tego typu były używane do identyfikacji cząstek pierwotnych. Natomiast metoda zaproponowana przez Doktoranta pozwala na identyfikację i ilościową ocenę stopnia aglomeracji cząstek aerozolu na podstawie analizy zdjęć SEM,
- Za pomocą opracowanej metody detekcji aglomeratów Doktorant przeanalizował proces aglomeracji cząstek aerozolu w przemysłowej instalacji jednostopniowego aglomeratora unipolarnego. Z analizy tej wynika, że zastosowanie jednostopniowego aglomeratora unipolarnego zwiększa średnią liczbę cząstek pierwotnych w powstających aglomeratach (inaczej mówiąc następuje wzrost liczności aglomeratu). Największy wzrost liczności powstających aglomeratów (11-krotny) zanotowano dla przypadków, kiedy w aerozolu było dużo cząstek o rozmiarach większych od 10 μm . W takich przypadkach aglomerat powstający z dużej cząstki i mniejszych cząstek pierwotnych średnio składał się z ponad 250 cząstek. Wynika z tego, że w elektrostatycznej aglomeracji cząstek unipolarnych główną rolę odgrywają duże cząstki, do których dołączają się mniejsze cząstki, tworząc aglomeraty. Przedstawione powyżej wnioski z badań eksperymentalnych Doktoranta są jakościowo zgodne z wnioskami wykonanych przez Niego analiz teoretycznych.

Na wyróżnienie zasługuje również to, że Doktorant przetestował opracowaną przez siebie metodykę eksperymentalną w rzeczywistych warunkach przemysłowych w jednostopniowym elektrostatycznym aglomeratorze unipolarnym zainstalowanym na kanale spalin bloku nr 12 w Elektrowni Łaziska Górne.

Powyżej wymienione przeze mnie osiągnięcia Doktoranta poszerzają wiedzę podstawową o zjawisku elektrostatycznej aglomeracji cząstek unipolarnych. Zaproponowane przez Doktoranta metody badawcze są oryginalne z potencjałem użyteczności przemysłowych.

8. Uwagi krytyczne

Wydaje się, że korzystnym uzupełnieniem rozprawy doktorskiej byłoby ustosunkowanie się Doktoranta na jej obronie do poniższych pytań:

- W jakim stopniu pominięcie przez Doktoranta ładunku przestrzennego w obszarze przepływu cząstek w aglomeratorze mogło wpłynąć na rozkład pola elektrycznego w tym aglomeratorze, obliczonym w symulacji numerycznej za pomocą programu COMSOL Multiphysics?
- W jakim stopniu trajektoria cząstki aerozolu w przemiennym polu elektrycznym zależy od parametrów materiałowych cząstki? Jaka była zgodność między parametrami materiałowymi cząstek będących przedmiotem analizy teoretycznej a parametrami materiałowymi rzeczywistych cząstek w aglomeratorze zainstalowanym na kanale spalin bloku nr 12 w Elektrowni Łaziska Górne? Czy ewentualne różnice materiałowe mogły mieć wpływ na porównanie wyników analizy teoretycznej i badań eksperymentalnych?
- Doktorant wykazał jakościową zgodność między wynikami analizy teoretycznej a wynikami pomiarów w „przemysłowej instalacji” jednostopniowego aglomeratora unipolarnego, Czy są jakieś wnioski ilościowe z porównania wyników teoretycznych i eksperymentalnych?

9. Podsumowanie, ocena i wnioski końcowe

Recenzowana rozprawa doktorska mgr. inż. Artura Marchewicz przedstawia samodzielnie i oryginalnie rozwiązane zadanie naukowe polegające na teoretycznych i eksperymentalnych badaniach mechanizmów aglomeracji jednoimiennie naelektryzowanych cząstek aerozolu pod wpływem sił elektrycznych. Doktorant sformułował tezę rozprawy następująco: „Możliwa jest

aglomeracja jednoimiennie naładowanych cząstek aerozolu w przemiennym polu elektrycznym”.

W rozważaniach teoretycznych i badaniach eksperymentalnych Doktorant w pełni zrealizował cel rozprawy i udowodnił postawioną tezę, wykazując że „aglomeracja jednoimiennie naładowanych cząstek aerozolu w przemiennym polu elektrycznym jest możliwa”, a mechanizmem, który umożliwia aglomerację cząstek jednoimiennie naelektryzowanych jest polaryzacja cząstek w zewnętrznym polu elektrycznym oraz zaindukowanie ładunku na powierzchni zbliżających się do siebie naelektryzowanych cząstek.

Rezultaty otrzymane przez Doktoranta są ważnym wkładem do wiedzy o mechanizmach aglomeracji cząstek. Mają one także znaczenie praktyczne. Opracowany model teoretyczny wyznaczania trajektorii naelektryzowanych cząstek aerozolu w polu elektrycznym jest narzędziem, które pozwala na określenie optymalnych parametrów pracy jednostopniowych aglomeratów unipolarnych. Oryginalna metoda detekcji aglomeratów może zostać także użyta do analizy aglomeratów cząstek kulistych aerozolu w innych zastosowaniach, m. in. w medycynie, metalurgii i nanotechnologii,

Świadectwem wysokiego poziomu prac badawczych wykonanych przez Doktoranta jest opublikowanie przez niego 37 artykułów, w tym 23 w czasopiśmie indeksowanych w bazie Clarivate Web of Science (w 3 z nich Doktorant występuje jako pierwszy autor). Doktorant przedstawił 2 postery i miał 5 wystąpień na różnego rodzaju konferencjach w kraju i za granicą. Na jednej z nich (*International Conference on Electrostatics 2022*) otrzymał nagrodę „Günter Lüttgens Young Scientist Award” za najlepsze wystąpienie. Doktorant jest współautorem 1 patentu krajowego.

Podsumowując moją recenzję stwierdzam, że cel rozprawy doktorskiej został osiągnięty i jej teza udowodniona a recenzowana rozprawa doktorska spełnia wymagania wynikające z odpowiednich przepisów. Wobec tego faktu wnioskuję o przyjęcie niniejszej rozprawy jako rozprawę doktorską i dopuszczenie mgr. inż. Artura Marchewicza do dalszych etapów przewodu doktorskiego w dyscyplinie Inżynieria mechaniczna.

Prof. Jerzy Mizeraczyk