

**dr hab. inż. Arkadiusz Świerczok, prof. PWr.**  
Politechnika Wrocławska  
Wydział Mechaniczno-Energetyczny  
Katedra Techniki Ciepłej

## **RECENZJA ROZPRAWY DOKTORSKIEJ:**

**Imię i nazwisko Doktoranta:** mgr inż. Artur Marchewicz  
**Tytuł rozprawy doktorskiej:** „*Analiza mechanizmów aglomeracji cząstek aerozolu pod wpływem sił elektrostatycznych.*”  
**Promotor:** prof. dr hab. inż. Anatol Jaworek  
**Promotor pomocniczy:** dr inż. Andrzej Krupa  
**Recenzent:** dr hab. inż. Arkadiusz Świerczok, prof. PWr.

### **1. Podstawa formalna opracowania recenzji**

Podstawą formalną opracowania niniejszej recenzji jest pismo Przewodniczącego Rady Naukowej Instytutu Maszyn Przepływowych im. Roberta Szewalskiego PAN o nr RN-421-40/21 z dnia 28 czerwca 2023 roku.

### **2. Ocena wyboru tematu, celu i zakresu rozprawy**

Poruszana w dysertacji problematyka oczyszczania gazów odlotowych z cząstek aerozolu jest ciągle ważna i aktualna. Ciągłe rosnące oczekiwania odnośnie czystości emitowanych z różnych procesów przemysłowych gazów odlotowych powodują poszukiwania sposobów na podnoszenie skuteczności działania urządzeń ochrony atmosfery. Jednym z zasadniczych procesów w tym obszarze jest odpylanie gazów odlotowych, w tym spalin ze spalania paliw kopalnych. Istotne jest w tym miejscu stwierdzenie, że praktycznie wszystkie wysokoskuteczne odpylacze mają minimum efektywności odpylania dla cząstek submikronowych (0,1-1  $\mu\text{m}$ ). Aglomeracja cząstek pyłu jest w tym kontekście jednym ze sposobów podniesienia skuteczności ich odpylania. Dlatego uważam, że Doktorant podjął się ważnego, a zarazem bardzo interesującego problemu badawczego, a jego praca wpisuje się w aktualne trendy prowadzonych prac badawczo-rozwojowych.

Doktorant postawił sobie za cel pracy zbadanie procesu aglomeracji cząstek aerozolu pod wpływem sił elektrostatycznych w przemiennym polu elektrycznym. Na podstawie przeglądu przedmiotowej literatury sformułowana została teza: *możliwa jest aglomeracja jednoimiennie naładowanych cząstek aerozolu w przemiennym polu elektrycznym*. Przegląd literaturowy wskazał na istnienie niszy tematycznej związanej z aglomeracją elektrostatyczną cząstek aerozolu o jednoimiennym ładunku elektrycznym. Warta podkreślenia jest dociekliwość Doktoranta, który wbrew panującym przekonaniom, w trakcie realizacji pracy udowodnił, że jest możliwa aglomeracja cząstek o tym samym znaku ładunku elektrycznego, dzięki wykorzystaniu różnicy w ruchliwości cząstek o różnych wymiarach.

Ponadto Doktorant określił zakres prac badawczych niezbędnych do udowodnienia postawionej tezy i w systematyczny sposób je przeprowadził. Wykonane w początkowym etapie badań symulacje numeryczne potwierdziły możliwość zderzania się cząstek o różnych wielkościach, w dalszej kolejności przeprowadzone zostały badania w warunkach półprzemysłowych z wykorzystaniem jednostopniowego unipolarnego aglomeratora elektrostatycznego będącego częścią instalacji badawczej w elektrowni Łaziska Górne. Wykonane w ramach tej części pracy badania jakościowe i ilościowe morfologii aglomeratów oraz składów ziarnowych próbek pobranych ze spalin ostatecznie potwierdziły występowanie zjawiska aglomeracji cząstek drobnych i dużych, co w efekcie przyczynia się wzrostu skuteczności odpylania cząstek z zakresu 0,3-2  $\mu\text{m}$ . Tym samym postawiona teza została dowiedziona.

**Podsumowując stwierdzam, że podjęta przez Doktoranta tematyka jest zasadna i ważna z naukowego oraz aplikacyjnego punktu widzenia. Cel pracy oraz tezy zostały sformułowane prawidłowo, a w efekcie przeprowadzonych badań teza została potwierdzona.**

### **3. Charakterystyka i ocena ogólna rozprawy**

Przedmiotem niniejszej recenzji jest rozprawa doktorska mgr. inż. Artura Marchewicza pt.: „**Analiza mechanizmów aglomeracji cząstek aerozolu pod wpływem sił elektrostatycznych**”. Promotorem pracy jest prof. dr hab. inż. Anatol Jaworek, a promotorem pomocniczym dr inż. Andrzej Krupa. Należy podkreślić, że badania przedstawione w rozdziale 6 zostały zrealizowane w ramach projektu badawczo-rozwojowego (POIR.04.01.04-00-0096/17-02, "HYBRYDOWY system ograniczenia emisji składników kwaśnych i popiołów lotnych ze spalin") finansowanego przez Narodowe Centrum Badań i Rozwoju.

Rozprawa zasadniczo ma charakter eksperymentalny, w połączeniu z analizą numeryczną wybranych zjawisk przebiegających w przestrzeni aglomeratora. Praca w całości, wraz z bibliografią, liczy 183 strony, składa się z siedmiu rozdziałów merytorycznych, z których pierwszy stanowi wprowadzenie, a ostatni wnioski końcowe. Praca kończy się bibliografią oraz listą publikacji Autora dotyczących tematyki rozprawy. Rozprawa zawiera 72 rysunków/wykresów oraz 23 tabele. Autor wykorzystał 171 pozycji bibliograficznych (najnowsza z bieżącego roku). Praca została napisana poprawnym językiem, a sposób jej edycji jest czytelny oraz zrozumiały.

Rozdział 1 to ogólne nakreślenie tematyki podjętej w recenzowanej pracy.

Rozdział 2 przedstawia cel, zakres pracy oraz tezę dysertacji. Doktorant przedstawił w logiczny sposób jak w oparciu o rozpoznane podstawy teoretyczne procesu aglomeracji unipolarnej zaplanować i przeprowadzić badania: zarówno symulacje numeryczne jak i badania eksperymentalne. Tak aby móc w jednoznaczny sposób potwierdzić (lub zaprzeczyć) prawdziwość postawionej tezy. Cel badawczy oraz tezy pracy sformułowane zostały poprawnie i precyzyjnie i są konsekwencją przeprowadzonego przeglądu literatury

Rozdział 3 Przedstawia podstawowe zagadnienia związane z procesem aglomeracji cząstek aerozolu w obecności pola elektrycznego. Opisane zostały: parametry aerozolu,

mechanizmy ładowania cząstek oraz ich ruch, podstawy fizyczne procesu aglomeracji, a w tym zjawiska wpływające na zderzenia cząstek aerozolu, siły wpływające na trwałość aglomeratów. Na końcu zaś przedstawiono metody aglomeracji cząstek aerozolu w układach odpylających, ze szczególnym uwzględnieniem metod elektrostatycznych.

Opracowanie teoretycznej części pracy zawarte w rozdziale 3, oparte na 128 pozycjach literaturowych, pokazuje, że Doktorant posiada bardzo dobrą i aktualną ogólną wiedzę teoretyczną w prezentowanej tematyce.

Rozdział 4 opisuje metodykę badań będących przedmiotem rozprawy. W szczególności przedstawiono: budowę i zasadę działania jednostopniowego unipolarnego aglomeratora elektrostatycznego (Podrozdział 4.1), metodykę teoretycznej analizy mechanizmów unipolarnej aglomeracji elektrostatycznej (podrozdział 4.2), metodykę analizy morfologii cząstek aerozolu oryginalnie opracowaną przez Doktoranta (Podrozdział 4.3) w końcu w podrozdziale 4.4 przedstawiono metody eksperymentalne badań rozkładów wielkości cząstek zastosowane w rozprawie.

Rozdział 5 to przedstawienie wyników teoretycznej analizy mechanizmów unipolarnej aglomeracji elektrostatycznej. Analiza prowadzona była w trzech obszarach: rozkład pola elektrycznego opisano w podrozdziale 5.1, trajektorie ruchu pojedynczych cząstek aerozolu w przemiennym polu elektrycznym (podrozdział 5.2), trajektorie zderzeniowe dwóch cząstek aerozolu z uwzględnieniem wielkości cząstek oraz ich ładunku elektrycznego (podrozdział 5.3). W wyniku przeprowadzonych symulacji Autor potwierdził teoretycznie, że możliwa jest aglomeracja cząstek pod wpływem siły elektrycznej działającej między dwiema jednoimiennie naelektryzowanymi cząstkami aerozolu.

Rozdział 6 to przedstawienie i wnikliwa dyskusja wyników badań eksperymentalnych dotyczących oceny procesu aglomeracji cząstek w jednostopniowym unipolarnym aglomeratorze elektrostatycznym. Badane były charakterystyki prądowo-napięciowe oraz przebiegi napięcia na poszczególnych elektrodach aglomeratora (podrozdział 6.1) będącego jedną ze stref filtra hybrydowego zainstalowanego na kanale spalin bloku nr 12 elektrowni Łaziska Górne. Przedstawiono wyniki jakościowych analiz morfologii cząstek popiołu lotnego pobranego z kanału spalin podczas pracy aglomeratora (podrozdział 6.2) oraz wyniki ilościowej analizy morfologii cząstek aerozolu podczas pracy aglomeratora, z wykorzystaniem metody automatycznej detekcji aglomeratów opracowanej przez Doktoranta (podrozdział 6.3). W podrozdziale 6.4 przedstawiono wyniki badań rozkładów wielkości cząstek próbek aerozolu (zapylnych spalin) pobranych z aglomeratora zmierzonych za pomocą laserowego analizatora wielkości cząstek. W końcu w podrozdziale 6.5 zaprezentowano wyniki badań frakcyjnej skuteczności odpylania aglomeratora. W tym przypadku, podobnie jak w ramach badań opisanych w podrozdziale 6.4, przeanalizowano wpływ napięcia i częstotliwości zasilania elektrod aglomeratora oraz natężenia przepływu spalin na frakcyjną skuteczność odpylania.

Każdy podrozdział kończy się precyzyjnymi wnioskami, które wynikają z treści prezentowanych podrozdziałów.

Rozdział 7 to syntetyczna dyskusja uzyskanych wyników, wskazanie zrealizowanych celów badawczych oraz odniesienie się do celu i tez pracy.

Kolejna część rozprawy to spis literatury, oraz lista osiągnięć Doktoranta.

**Podsumowując, przyjęty układ rozprawy oceniam jako logiczny i czytelny. Sposób edycji pracy nie budzi zastrzeżeń, a strona graficzna rozprawy jest staranna. Rysunki i wykresy są przygotowane poprawnie i czytelnie. Dobór pozycji bibliograficznych jest odpowiedni, aktualny i obszerny.**

#### **4. Uwagi merytoryczne i kwestie dyskusyjne**

Recenzowana praca doktorska wyróżnia się oryginalnością tematyczną oraz walorami aplikacyjnymi. Rozprawa dotyczy zagadnienia słabo rozpoznanego w literaturze i w związku z tym, należy uznać za wartościowe dowiedzenie przez Autora, że możliwe jest przeprowadzenie aglomeracji cząstek jednoimiennych w przemiennym polu elektrycznym.

Za szczególnie interesującą można uznać analizę procesu aglomeracji jako zjawiska dynamicznego i opisanie mechanizmu aglomeracji w przemiennym polu elektrycznym polegającego na wychwycie małych cząstek (poruszających się praktycznie prostoliniowo) z cząstkami dużymi poruszającymi się ruchem oscylacyjnym. Dodatkowo wykazano, że na trajektorie zderzeniową znacząco wpływa zjawisko wzajemnego indukowania ładunku obrazowego na powierzchni obu analizowanych cząstek aerozolu oraz zjawisko polaryzacji cząstek w zewnętrznym polu elektrycznym.

Kolejnym istotnym etapem opisywanych w pracy badań jest analiza jakościowa i ilościowa powstających podczas pracy urządzenia przemysłowego aglomeratów. W tym przypadku chodzi o odpowiednie narzędzie służące do jednoznacznej oceny procesu aglomeracji w warunkach przemysłowych. W tym celu Doktorant opracował autorski sposób poboru i analizowania próbek pobranych podczas pracy aglomeratora. Autor rozprawy zaprojektował sondę probierczą o specjalnej konstrukcji, ale przede wszystkim opracował półautomatyczną metodę detekcji aglomeratów. Metoda to wykorzystuje algorytmy cyfrowego przetwarzania zdjęć SEM, takie jak algorytm detekcji krawędzi Canny'ego i transformacja Hougha. Metoda to umożliwia ilościowe określanie liczby, rozmiaru i położenia cząstek pierwotnych tworzących aglomeraty oraz klasyfikuje wykryte cząstki pierwotne do poszczególnych aglomeratów.

Godna podkreślenia jest umiejętność łączenia przez Doktoranta badań nad zjawiskami podstawowymi (aglomeracja) z praktyczną realizacją idei w postaci badań prowadzonych w warunkach półprzemysłowych na instalacji badawczej w elektrowni Łaziska Górne. Wskazane już wcześniej autorskie rozwiązania związane z poborem i analizą próbek świadczą o Jego dobrym przygotowaniu inżynierskim. Dobrze rokuje to na przyszłość w kontekście prowadzenia przez Doktoranta samodzielnej pracy badawczej. Pośrednio potwierdza to również Jego bogaty dorobek publikacyjny, na który składają się: 37 publikacje w recenzowanych czasopiśmie polskich i międzynarodowych, w tym 14 publikacji bezpośrednio związanych z tematyką rozprawy doktorskiej, a także 41 prezentacji konferencyjnych.

Podczas lektury dysertacji nasunęły mi się uwagi, pytania i wątpliwości wymagające wyjaśnienia:

1. Str. 37, wzór (3.66) – błędnie dokonano przekształcenia prowadzącego do tego wzoru
2. Str. 72, pierwszy akapit od góry – jest: „(...) zakłada ruch cząstek kulistych o średnicach z zakresu (100 nm – 100  $\mu$ m).” Czy to założenie wynika z pomiarów przeprowadzonych na badanym obiekcie, czy z innych przesłanek.
3. Str. 72, przedostatni punkt – jest: „cząstka aerozolu porusza się w gazie o jednorodnym polu prędkości (...)” co Doktorant ma na myśli pisząc o jednorodnym polu prędkości.
4. Str. 81, pierwszy akapit od góry – jest: „(...) pochodzących ze spalania paliwa Diesla”, należy zwrócić uwagę, że nie ma paliwa Diesla a raczej **olej napędowy**.
5. Str. 92, pierwszy akapit - Doktorant opisuje istotę działania sondy aspiracyjnej: „Prędkość przepływu aerosolu na wlocie sondy powinna być dostosowana do prędkości przepływu spalin w komorze aglomeratora, (...)” Pomijając niepoprawną formę „aerosolu” opis jest niezręczny i niepoprawnie przedstawia działanie sondy zasysającej izokinetycznie zapyłony gaz. Idea izokinetyczności polega na dostosowaniu **prędkości zasysania**, tak aby dostosować ją do miejscowej prędkości panującej w danym miejscu kanału przepływowego.
6. Str. 92, drugi akapit - Doktorant pisze: „(..) w którym koncentracja cząstek została rozcieńczona do wartości koncentracji dopuszczalnych dla analizatora (..)” to sformułowanie również jest niezręczne: rozcieńczona została bowiem próbka gazu. Natomiast stężenie w wyniku tego rozcieńczenia zmalało.
7. Proszę skomentować nietypowe usytuowanie aglomeratora w stosunku do elektrofiltru, zwykle bowiem jest to stopień wstępny przed ESP. Czy w jakiś sposób ogranicza to użyteczność prezentowanych wyników prac eksperymentalnych?
8. W pracy analizowane były praktycznie tylko cząstki kuliste (chodzi o cząstki pierwotne), co nie jest częste dla pyłów przemysłowych, szczególnie dla popiołów lotnych ze spalania węgla. Czy jest możliwe wykorzystanie opracowanej przez Doktoranta ilościowej metody detekcji aglomeratów do cząstek o nieforemnych kształtach?
9. W odniesieniu do wyników z punktu 6.3.3 (str. 137) podsumowanych w tabeli 6.1 dlaczego występuje tak duża różnica w liczności cząstek pierwotnych ( $N_{pT}$ ) dla wariantów pracy ESP ON vs. AGL ON. Czy aby nie wpływa to na wyniki określania parametrów potwierdzających efektywność aglomeracji?

## 5. Uwagi edytorskie

Podczas lektury dysertacji zauważyłem następujące błędy i niedociągnięcia edytorskie:

1. W całym tekście rozprawy autor posługuje się notacją anglosaską: oddzielając miejsca dziesiętne w liczbach za pomocą kropki, zamiast przecinka jak jest przyjęte w języku polskim.

2. Str.12, 7 linijka od góry - jest: „natężenia” - powinno być: „**natężenia**”.
3. Str. 41, akapit nad rys.3.3. – cały ten akapit będący opisem rys.3.3 ma zamienione oznaczenia (w stosunku do rysunku) cząstek  $p_1$  i  $p_2$ .
4. Str. 49, w opisie pod wzorem (3.91) używane jest oznaczenia  $R_{p1}$  i  $R_{p2}$  podczas gdy we wzorze (3.91) są  $r_{p1}$  i  $r_{p2}$
5. Str. 55, ostatni akapit – jest: „(...) w zakresie (1,3)” - powinno być: „(...) w zakresie (**1-3**)”
6. Str. 75, pierwszy punkt oraz w innych miejscach tekstu rozprawy – jednostka gęstości pisana jest „kg/m3” powinno być: „**kg/m<sup>3</sup>**”.
7. Str. 78, pierwszy akapit - jest: „(..) odpowiednie  $Q_{p1}$  i  $Q_{p2}$ .” powinno być: : „(..) **odpowiednio**  $Q_{p1}$  i  $Q_{p2}$ .”
8. Str. 79, pierwszy akapit w rozdz. 4.3.1, jest: „(...) aby zapobiec odywaniu się cząstek” powinno być: „(...) aby zapobiec **odrywaniu** się cząstek.
9. Str. 130, pierwszy akapit w rozdz. 6.3.1 – zdanie: „Na rysunku 6.16 przedstawiono wykryte aglomeraty cząstek popiołu lotnego pobrane z kanału spalin za aglomeratorem elektrostatycznym podczas.” jest najwyraźniej niedokończone
10. Str. 134, drugi akapit – akapit ten odnosi się do rys. 6.18, błędnie odniesiono się do wariantów pracy instalacji badawczej, jest: (ESP OFF, AGL ON) (rysunek 6.18b) powinno być: (rysunek **6.18c**) , jest: (ESP ON, AGL OFF) (rysunek 6.18a), powinno być: (rysunek **6.18b**)
11. Str.135, opisy na rys. 6.18 - błędnie dwa razy pojawia się opis (b), a tymczasem dla wariantu pracy: ESP OFF, AGL (32kV) powinno być: (c).
12. Str. 137 – błędna numeracja punktu, jest: 6.3.1, powinno być: 6.3.3
13. Str.137, drugi akapit od dołu – Doktorant opisuje wyniki zawarte w tabeli 6.1 i używa oznaczenia  $N_{pp1}$  , którego nie ma w tabeli 6.1.. Co prawda na stronie 54 zostało wcześniej wyjaśnione, że  $N_{pp1}=N_{cz1}$  ale dla porządku lepiej to zmienić.

## 6. Wnioski końcowe

Omówione powyżej uwagi krytyczne oraz kwestie dyskusyjne nie umniejszają wartości merytorycznej opiniowanej pracy doktorskiej, którą oceniam bardzo pozytywnie. Dysertacja odzwierciedla wiedzę Doktoranta w tematyce aglomeracji cząstek stałych, w tym znajomość fundamentalnych zjawisk związanych z ładowaniem cząstek i ich ruchem w polu elektrycznym oraz sposobami analizy morfologii i składów ziarnowych pyłów. Doktorant zademonstrował umiejętności planowania eksperymentu, doboru odpowiednich narzędzi badawczych w celu rozwiązania problemów badawczych. Wykazał się warsztatem naukowym, w tym prowadzeniem systematycznych badań eksperymentalnych oraz umiejętnością opracowania i krytycznej analizy zgromadzonego materiału. Wnikliwość analizy i interpretacji otrzymywanych rezultatów pozwoliła Doktorantowi na osiągnięcie celu pracy i udowodnienie tezy pracy.

Szczególną uwagę zwraca umiejętność połączenia prac teoretycznych, w tym przypadku numeryczne modelowanie procesu unipolarnej aglomeracji elektrostatycznej w przemiennym polu elektrycznym z badaniami eksperymentalnymi na instalacji filtra hybrydowego w elektrowni Łaziska Górne, które prowadzone były w skali pół-przemysłowej. Zastosowanie autorskich rozwiązań zarówno do poboru jak i analizy pobranych próbek pyłu pozwoliło Doktorantowi na potwierdzenie zgodności przewidywań modelu teoretycznego z wynikami eksperymentalnymi. W efekcie potwierdzona została zasadnicza teza pracy, że: możliwa jest aglomeracja jednoimiennie naelektryzowanych cząstek aerozolu w przemiennym polu elektrycznym.

Uważam, że rozprawa doktorska Pana mgr inż. Artura Marchewicza **stanowi oryginalny wkład w rozwój dyscypliny Inżynieria Mechaniczna** i pozwala na stwierdzenie, że **Doktorant wykazał się wiedzą oraz umiejętnością samodzielnego prowadzenia badań naukowych**. Godny podkreślenia jest też dorobek publikacyjny Doktoranta (współautorstwo 23 punktowanych artykułów, 1 patent).

Stwierdzam, że recenzowana rozprawa spełnia wymogi stawiane pracom doktorskim, określone w artykuł 13 *Ustawy z dnia 14 marca 2003 r. o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz stopniach i tytule w zakresie sztuki* (Dz.U. z 2017 r., poz. 1789) oraz *Ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. Przepisy wprowadzające ustawę - Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce* (Dz.U.2023 r., poz. 742).

**W związku z powyższym wnioskuję do Rady Naukowej Instytutu Maszyn Przepływowych im. Roberta Szewalskiego PAN w Gdańsku o dopuszczenie Pana mgr. inż. Artura Marchewicza do dalszych etapów postępowania doktorskiego i publicznej obrony rozprawy doktorskiej.**

**Po zapoznaniu się z recenzowaną rozprawą oraz dorobkiem naukowym Doktoranta stawiam również wniosek o jej wyróżnienie.**

