

prof. dr hab. inż. Sebastian Skoczypiec  
Katedra Inżynierii i Automatyzacji Produkcji  
Politechnika Krakowska im. Tadeusza Kościuszki

4 września 2023 r.

Recenzja pracy doktorskiej pt.

## Modernizacja produkcji elektrody zbiorczej dla przemysłu energetycznego

Autor pracy: mgr inż. Paweł Tracz

Promotor: dr hab. inż. Krzysztof Waclawiak

Promotor pomocniczy: dr inż. Joanna Lisok

*Podstawą opracowania recenzji jest pismo Przewodniczącej Rady Dyscypliny Inżynieria Mechaniczna Politechniki Śląskiej prof. dra hab. inż. Ewy Majchrzak, nr RDIME/156/51/2023, z dnia 12 lipca 2023 roku.*

### 1 Charakterystyka pracy

Praca doktorska Pana mgra inż. Pawła Tracza dotyczy szeroko pojętej tematyki wytwarzania paneli elektrod zbiorczych elektrofiltru suchego, a jej celem głównym było opracowanie podstaw technicznych i ekonomicznych uzasadniających wdrożenie do produkcji nowej linii produktowej elektrod zbiorczych o zmniejszonej masie. Przedstawiona w dysertacji kompleksowa analiza problemu objęła wszystkie istotne dla wdrożenia aspekty związane z projektowaniem i produkcją elektrody o zmniejszonej grubości tj. analizę istniejącej linii technologicznej, analizę wpływu właściwości wsadu technologicznego na cechy produktu, zaprojektowanie stacji wielotaktowego gięcia rolkowego, wykonanie symulacji procesu gięcia, wstępne sprawdzenie cech geometrycznych i wybranych właściwości użytkowych elektrod oraz analizę ekonomiczną i ocenę ryzyka inwestycyjnego.

Dysertacja składa się z siedemnastu rozdziałów i można ją podzielić na trzy powiązane tematycznie części. W rozdziałach od 1 do 2 przedstawiono wprowadzenie oraz uzasadniono podjęcie tematyki, sformułowano tezę i cele oraz przedstawiono zakres pracy. Rozdziały od 3 do 9 zawierają przegląd literatury związanej z tematyką pracy tj.:

- opis uwarunkowań prawnych dotyczących ochrony powietrza (rozdział 3),
- syntetyczne omówienie przebiegu procesu odpylania oraz klasyfikację urządzeń do odpylania gazów (rozdział 4),



- przedstawienie zasady działania, konstrukcji oraz podstawowych charakterystyk pracy odpylaczy elektrostatycznych (rozdział 5),
- charakterystykę rynku elektrofiltrów, główne kierunki rozwoju oraz nowe zastosowania tych urządzeń (rozdział 6),
- aktualny stan badań dotyczących konstrukcji, działania i projektowania elektrofiltrów (rozdział 7) ,
- opis konstrukcji, technologii i procesu produkcji elektrody zbiorczej (rozdziały 8 i 9).

W rozdziałach od 10 do 17 przedstawiono wyniki badań własnych Doktoranta. Prace te dotyczyły:

- analizy statystycznej właściwości półfabrykatu i ich wpływu na dokładność wykonania elektrod zbiorczych (rozdział 10),
- modelowania numerycznego procesu profilowania elektrody (rozdział 11 i 12),
- analizy numerycznej drgań własnych i wymuszonych (rozdział 13),
- ekonomicznych aspektów procesu produkcji oraz identyfikacji głównych czynników wpływających na jakość produkcji elektrod (rozdziały 14 i 15),
- propozycji zmian modernizacyjnych oraz oceny ich opłacalności (rozdział 16),
- wniosków z przeprowadzonych prac badawczych w odniesieniu do technologii i procesu produkcji elektrod zbiorczych (rozdział 17).

Dodatkowo praca zawiera jednostronicowe streszczenia w języku polskim i angielskim, zestawienie bibliograficzne, spis rysunków, spis tablic oraz załączniki przedstawiające widoki izometryczne zestawu rolek profilujących oraz projekt rozwinięcia profilu trzech analizowanych kształtów elektrody zbiorczej.

## 2 Ocena pracy

### 2.1 Ocena wyboru tematyki

Elektrofiltry to jedne z najpopularniejszych urządzeń służących do usuwania pyłów, dymów czy aerozoli z różnych procesów przemysłowych. Wykorzystywane są m.in. w elektrowniach, ciepłowniach, cementowniach, hutach czy spalarniach śmieci, gdzie pozwalają na istotne ograniczenie emisji pyłu i innych substancji toksycznych do atmosfery. Popyt na te urządzenia zależy m.in. od regulacji prawnych wprowadzających coraz bardziej rygorystyczne normy dotyczące emisji substancji szkodliwych, w tym pyłu w spalinach z energetyki lub innych gałęzi przemysłu. Wprowadzone w ostatnich latach przez Komisję Europejską konkluzje dotyczące najlepszych dostępnych technik (tzw. BAT) wymusiły na podmiotach branży energetycznej rozpoczęcie inwestycji związanych z modernizacją i dostosowaniem swoich instalacji



do wymogów dotyczących wartości emitowanych zanieczyszczeń do środowiska. Należy się też spodziewać, że wraz z realizacją wskazanych przez Komisję Europejską celów transformacji energetycznej, w kolejnych latach istotnie zostaną zwiększone obowiązki operatorów branży energetycznej dotyczące emisji szkodliwych spalin do atmosfery.

Analizując podjętą przez Doktoranta tematykę warto również zwrócić uwagę na strukturę produkcji energii elektrycznej w Polsce. Pomimo, że rynek energii na świecie i w Polsce zmienia się dynamicznie a udział odnawialnych źródeł energii miksie energetycznym systematycznie rośnie, nadal energetyka węglowa to około 70% krajowego rynku energii elektrycznej. Sytuację tę może zmienić oddanie do eksploatacji elektrowni jądrowych, jednak zgodnie z bardzo optymistycznymi założeniami *Programu polskiej energetyki jądrowej* pierwszy reaktor zostanie uruchomiony w 2033 roku. W perspektywie kolejnych kilkunastu lat produkcja energii elektrycznej i ciepła z węgla będzie więc gwarantem utrzymania przez Polskę rezerw i bezpieczeństwa energetycznego, a elektrofiltry będą nadal stanowiły podstawowy sposób redukcji emisji zanieczyszczeń do atmosfery.

Praca doktorska Pana mgr inż. Pawła Tracza dotyczy modernizacji produkcji elektrody zbiorczej, czyli jednego z najważniejszych elementów elektrofiltru, który decyduje charakterystyce eksploatacyjnej i cenie całego urządzenia. Elektrody zbiorcze to kształtowane plastycznie wielkogabarytowe elementy cienkościenne, które w zależności od warunków pracy, wykonane są z wybranych gatunków stali węglowej, stali przeznaczonych do pracy w podwyższonej temperaturze, stali o podwyższonej odporności na korozję atmosferyczną lub stali nierdzewnych. Stanowią one ponad 30% masy całkowitej elektrofiltru, więc w aspekcie znaczącego w ostatnich latach wzrostu cen stali, modernizacja ich konstrukcji i procesu produkcji może w istotny sposób wpłynąć na całkowity koszt wytworzenia elektrofiltru.

Wymienione powyżej przesłanki jednoznacznie uzasadniają potrzebę realizacji podjętych przez Pana mgr inż. Pawła Tracza badań i analiz. **Uważam, że tematyka opiniowanej rozprawy jest odpowiedzią na aktualne problemy producentów elektrofiltrów a jej wybór uważam za słuszny przede wszystkim ze względów użytecznych.**

## 2.2 Ocena merytoryczna

Głównym celem ocenianej rozprawy doktorskiej było opracowanie podstaw technologii produkcji nowej i tańszej elektrody zbiorczej dla przemysłu energetycznego. Autor postawił tezę, że możliwe jest opracowanie procesu produkcji tańszej elektrody zbiorczej o mniejszej grubości. Dość ogólnie sformułowany cel pracy został uszczegółowiony poprzez wyróżnienie: (1) celu merytorycznego wskazującego na potrzebą opracowania etapów złożonego procesu projektowania i produkcji elektrody o mniejszej grubości, (2) celu użytkowego związanego



z opracowaniem statystycznym właściwości wsadu technologicznego oraz (3) celu naukowego skoncentrowanego na zastosowaniu modelowania numerycznego do analizy procesu profilowania elektrod.

Praca została zrealizowana w etapach obejmujących:

- analizę stanu obecnego, w co wpisuje się opis i analiza istniejącej linii produkcyjnej, inwentaryzacja danych dotyczących materiałowchłonności, energochłonności oraz jakości produkcji oraz analiza, w oparciu o dane empiryczne, wpływu parametrów wsadu technologicznego na wybrane cechy geometryczne elektrod zbiorczych,
- wybór wariantów modyfikacji elektrody w odniesieniu do grubości taśmy i gatunku stali,
- przeprowadzenie modelowania numerycznego procesu wielotaktowego gięcia rolkowego, co obejmuje również opracowanie projektów rozwinięcia kształtowników oraz konstrukcje rolek profilujących,
- zdefiniowanie wskaźników technologicznych wielotaktowego gięcia rolkowego,
- analizę wybranych cech geometrycznych i eksploatacyjnych elektrod zbiorczych,
- opracowanie kryteriów oceny procesu profilowania względem kosztów materiału, zużycia energii elektrycznej i jakości produkcji,
- identyfikację czynników kształtujących całkowity koszt produkcji,
- propozycję zakresu zmian modernizacyjnych,
- ocenę rentowności oraz ryzyka inwestycyjnego związanego z wdrożeniem projektu.

Na podstawie przeprowadzonej analizy najczęściej stosowanych kształtów profili elektrod suchych Autor wytypował do badań trzy typy elektrod osadczycy o kształcie Sigma, rynnowym i płytowym ZT24. Dla każdego typu elektrody opracowane zostały modele numeryczne dla trzech grubości półfabrykatu w postaci taśmy stalowej o grubości 1 mm, 1,25 mm i 1,5 mm. Modelowanie numerycznego procesu wielotaktowego gięcia rolkowego przeprowadzono przyjmując jako materiał stal zimnowalcowaną DC01 oraz stal trudnordzewiejącą Corten A i stal austenityczną 1.4301 (tylko w przypadku procesu gięcia elektrod rynnowych). Jako grubość referencyjną do dalszych analiz przyjęto standardową, stosowaną przez większość producentów, grubość taśmy wynoszącą 1,5 mm.

W trakcie realizacji pracy wykorzystano różnorodne i zaawansowane narzędzia informatyczne takie jak oprogramowanie do projektowania kształtowników COPRA RF, oprogramowanie do symulacji procesu profilowania COPRA FEA, programy do symulacji metodą elementów skończonych Ansys i Autodesk Nastran oraz oprogramowanie wspomagające statystyczną kontrolę procesów Minitab.



W ocenie merytorycznej pracy na podkreślenie zasługują:

- bardzo szczegółowa i swobodnie poprowadzona przez Autora analiza literatury uwzględniająca całokształt zagadnień dotyczących budowy i warunków eksploatacji elektrofiltrów, procesu produkcji elektrod osadczycy elektrofiltru, stan badań dotyczących konstrukcji, działania i projektowania elektrofiltrów oraz kierunków rozwoju tych urządzeń,
- odpowiednio dobrana metodyka oraz prawidłowo zaplanowany, bardzo szeroki zakres przeprowadzonych badań i analiz uwzględniający wszystkie istotne dla wdrożenia nowego typu elektrod aspekty związane z projektowaniem i produkcją tj. analizę istniejącej linii technologicznej z uwzględnieniem analizy przyczyn i skutków wad produkcyjnych, analizę wpływ właściwości wsadu technologicznego na cechy produktu, zaprojektowanie stacji wielotaktowego gięcia rolkowego i wykonanie symulacji procesu gięcia, wstępne sprawdzenie cech geometrycznych i wybranych właściwości użytkowych elektrod oraz analizę ekonomiczną i ocenę ryzyka inwestycyjnego,
- zastosowanie różnorodnych i adekwatnych narzędzi badawczych pozwalających na kompleksową analizę projektu i technologii produkcji elektrod zbiorczych,
- rzetelność i duża staranność w opracowaniu i prezentacji otrzymanych wyników, przy czym warto podkreślić bardzo dużą liczbę analizowanych danych ponieważ analiza statystyczna właściwości wsadu technologicznego i tolerancji wykonania elektrod zbiorczych została przeprowadzona na próbie wynoszącej 816 sztuk elektrod (około 100 ton blachy) a analiza numeryczna gięcia objęła trzy typy elektrod, trzy grubości półfabrykatu oraz trzy rodzaje materiału.

Przedstawione w dysertacji analizy teoretyczne i doświadczalne wykazały, że możliwe jest wykonywanie w pełni funkcjonalnych elektrod zbiorczych elektrofiltrów z taśmy stalowej o grubości mniejszej niż 1,5 mm spełniając równocześnie wymagania związane z jakością i niezawodnością procesu produkcyjnego. Zaproponowany przez Autora sposób rozwiązania problemu, łączący badania empiryczne i analizy numeryczne, można traktować jako pewien wzorzec postępowania podczas wdrażania nowych konstrukcji elektrod. Autor pokazał że zastosowanie narzędzi informatycznych pozwala na oszacowanie wybranych cech i odchyłek geometrycznych czy wybranych parametrów eksploatacyjnych elektrody, umożliwiając tym samym wyeliminowanie kosztownych błędów już na wczesnym etapie projektu lub analizę możliwych scenariuszy w odniesieniu do rozwoju produktu i technologii. Przeprowadzona analiza statystyczna właściwości wsadu technologicznego pokazała natomiast jak istotne znaczenie ma zastosowanie narzędzi statystycznej kontroli procesu w utrzymaniu jakości bieżącej produkcji. Praca dotyczy bardzo wąskiego i specjalistycznego obszaru, dlatego też znaczenie naukowe uzyskanych wyników jest ograniczone, jednak w mojej ocenie posiada



ona bardzo duże znaczenie praktyczne dla branży producentów elektrofiltrów oraz innych przedsiębiorstw prowadzących działalność w zakresie obróbki plastycznej wielkogabarytowych elementów cienkościennych.

Reasumując stwierdzam, że rozprawa stanowi zamkniętą całość, a postawiony przez mgra inż. Pawła Tracza cel pracy został w pełni zrealizowany. Doktorant wykazał się niezbędną przy rozwiązywaniu złożonych problemów badawczych interdyscyplinarną wiedzą z zakresu inżynierii mechanicznej oraz nauk o zarządzaniu i jakości. Uwzględniając powyższe uzasadnienie pracę pod względem merytorycznym oceniam bardzo dobrze.

### 2.3 Ocena strony formalnej rozprawy

Przedstawiona do recenzji rozprawa napisana została w języku polskim i wraz ze streszczeniami w języku polskim i angielskim, zestawieniem bibliograficznym, wykazem norm, spisem rysunków, spisem tabel oraz załącznikami obejmuje 231 stron. Autor podczas przygotowania rozprawy skorzystał z obszernej bazy obejmującej 180 pozycji bibliograficznych oraz 14 norm związanych z tematyką pracy. Szczegółowe rozważania udokumentowane zostały czytelnymi schematami, zdjęciami, tabelami oraz wykresami, a dobrany przez Autora materiał ilustracyjny jest obszerny i bardzo dobrze uzupełnia prowadzoną dyskusję wyników. Objętość rozdziałów pracy zmienia się w szerokim zakresie, od jednej strony (rozdziały 1,3 i 4) do niemal pięćdziesięciu (Rozdział 11) a analiza ich zawartości merytorycznej wskazuje, że niektóre z tematycznie bliskich rozdziałów mogłyby zostać scalone (szczegóły przedstawiono w ramach uwagi krytycznych). Na podkreślenie zasługuje dochowana przez Doktoranta edytorska staranność oraz poprawność językowa. **Praca jest napisana poprawnym technicznie językiem i posiada niezwykle starannie opracowaną szatę graficzną oraz stojącą na wysokim poziomie dokumentację z badań własnych.** Autor nie ustrzegł się drobnych błędów edytorskich i stylistycznych, które jednak w niewielkim stopniu utrudniają analizę przedstawionego materiału oraz nie wpływają na wartość i wysoką ocenę merytoryczną pracy.

## 3 Uwagi krytyczne

Po wnikliwym przestudiowaniu pracy należy stwierdzić, że jest ona poprawna pod względem merytorycznym i metodycznym. Poniżej wymienione zostały uwagi krytyczne odnoszące się do wybranych aspektów dysertacji:

- w mojej ocenie dla poprawy przejrzystości pracy niektóre rozdziały mogłyby zostać scalone w jeden. Przykładowo materiał przedstawiony w rozdziale 3 odnośnie uwarunko-



wań prawnych dotyczących ochrony powietrza z powodzeniem mógł być przedstawiony w ramach wprowadzenia, a rozdziały 14 i 15 połączone w jeden dotyczący efektywności procesu produkcyjnego,

- w ramach przedstawionej w rozdziale 10 analizy statystycznej Autor wykazał, że istnieje korelacja pomiędzy właściwościami chemicznymi i mechanicznymi wsadu technologicznego a tolerancją wykonania elektrod zbiorczych. Dla poprawnej analizy i udoskonalenia procesu produkcji niezbędna jest jednak wiedza o związkach przyczynowo-skutkowych pomiędzy analizowanymi zmiennymi. Nie postawiono jednak hipotez dotyczących takich powiązań, a sam wykazany fakt istnienia korelacji nie oznacza przyczynowości,
- pewien niedosyt budzi brak weryfikacji doświadczalnej opracowanych modeli numerycznych. Nie ulega wątpliwości, że ze względu na bardzo duże koszty weryfikacja doświadczalna modeli dla blach cieńszych niż standardowa tj. o grubości 1,25 mm i 1 mm wydaje się na tym etapie praktycznie niemożliwa, natomiast można rozważać weryfikację modelu w oparciu o dane historyczne dotyczące m.in. geometrii już wykonanej partii elektrod z blachy o grubości 1,5 mm. Sugestie tą należy jednak traktować jako potencjalny kierunek dalszych badań prowadzonych przez Autora.

Powyższe uwagi nie dotyczą jednak zasadniczych zagadnień metodycznych oraz merytorycznych i nie wpływają na moją ostateczną wysoką ocenę pracy.

#### 4 Wniosek końcowy

Praca doktorska mgra inż. Pawła Tracza pt.: *Modernizacja produkcji elektrody zbiorczej dla przemysłu energetycznego* stanowi oryginalne rozwiązanie postawionego problemu naukowego. Dysertacja dotyczy całokształtu zagadnień związanych z produkcją elektrod osadczych i jest potwierdzeniem bardzo dużej wiedzy oraz doświadczenia Autora w tym obszarze. Przeprowadzone badania jednoznacznie pokazały potencjalne kierunki i korzyści wynikające z modernizacji procesu produkcji elektrod zbiorczych elektrofiltrów a uzyskane wyniki mają duże znaczenie utylitarne. W związku z powyższym stwierdzam, że **praca spełnia wymagania stawiane rozprawom doktorskim przez obowiązujące przepisy, jej tematyka mieści się w dyscyplinie inżynieria mechaniczna i może być dopuszczona do publicznej dyskusji przed Radą Dyscypliny Inżynieria Mechaniczna Politechniki Śląskiej.**

