

Opole, dnia 26.08.2020 r.

Dr hab. inż. Jolanta Królczyk, profesor uczelni
Katedra Technologii Maszyn i Automatykacji Produkcji
Wydział Mechaniczny
Politechnika Opolska
ul. Prószkowska 76, 45-758 Opole

RECENZJA

rozprawy doktorskiej mgr inż. Joanny Woźniak

pt.: „**Doskonalenie sterowania rozproszonymi systemami wytwarzania przyrostowego**”.

Promotor pracy doktorskiej: **prof. dr hab. inż. Grzegorz Budzik (Politechnika Rzeszowska)**

Promotor pomocniczy: **dr inż. Łukasz Przeszlowski (Politechnika Rzeszowska)**

1

1. Podstawa opracowania recenzji

Podstawą opracowania recenzji jest pismo Pana dr hab. inż. Aleksandra Mazurkowa, prof. PRz, Przewodniczącego Rady Dyscypliny Inżynierii Mechanicznej z dnia 26.06.2020 r (znak pisma RM-530-14-04/19/2020).

2. Znaczenie podjętej tematyki badawczej

Dostarczona do recenzji praca doktorska pt. „**Doskonalenie sterowania rozproszonymi systemami wytwarzania przyrostowego**”, której autorem jest Pani mgr inż. Joanna Woźniak poświęcona została ważnemu zagadnieniu w dziedzinie nauk technicznych, jakimi są metody wytwarzania przyrostowego. Dokonuje się obecnie Czwarta Rewolucja Przemysłowa zwana również Industry 4.0, w której metody szybkiego prototypowania odgrywają coraz większą rolę. Metody te coraz chętniej i częściej znajdują zastosowanie w przemyśle, dzięki swoim zaletom, tj. redukcja kosztów wytwarzania oraz szybki czas dostawy do klienta od momentu zlecenia. Autorka w dysertacji zajęła się przeprowadzeniem badań procesu wytwarzania opartym o technologie przyrostowe, kontrolą jakości wyrobów gotowych, jak również analizą bieżącej sytuacji w tym sektorze przemysłu na rynku krajowym. Na tej podstawie Doktorantka sformułowała wnioski, które mogą być istotną wskazówką dla przedsiębiorców działających w tej branży. Wdrażanie innowacyjnych rozwiązań do przemysłu na podstawie wyników badań naukowych jest istotnym celem gospodarki opartej na wiedzy.

3. Ogólna charakterystyka pracy

Rozprawa obejmuje 126 stron i podzielono ją na 8 rozdziałów, w tym: wstęp; analiza stanu zagadnienia; teza, cele i zakres pracy; następnie część doświadczalna; kolejno analiza rynkowa branży druku 3D; podsumowanie i wnioski; literatura oraz załączniki. W pracy umieszczono 161 pozycji literaturowych oraz 9 odniesień do stron internetowych. Rozprawa obejmuje ponadto 11 tabel oraz 89 rysunków. Układ pracy jest właściwy, a wszystkie rozdziały wraz z podrozdziałami tworzą razem logiczną całość. Należy zauważyć staranność opracowania rozprawy, nie tylko pod względem układu, ale również pod względem językowym i graficznym. Wykresy oraz tabele są precyzyjnie opisane, a w tekście znajduje się odwołanie do każdego rysunku, tabeli czy wykresu. Autorka posługuje się poprawnym językiem. Rysunki wykonane są starannie oraz wplecione są umiejętnie w całość. To sprawia, że zapoznawanie się z zawartością rozprawy jest stosunkowo łatwe. Recenzowana dysertacja mieści się w zasadniczym nurcie współczesnych kierunków badań inżynierii mechanicznej. Zastosowane w pracy metody badawcze wraz ze statystycznym opracowaniem wyników pozwoliły na zgłębienie podejmowanej tematyki. Badania przedstawione w pracy są kontynuacją i dalszym rozwinięciem obszarów badawczych realizowanych z sukcesem od wielu lat przez pracowników Wydziału Budowy Maszyn i Lotnictwa Politechniki Rzeszowskiej. To liczący się ośrodek naukowo – badawczy, który wnosi twórczy i widoczny wkład w rozwój nauk technicznych, szczególnie w obszarze technik przyrostowych. Recenzowana rozprawa doktorska Pani mgr inż. Joanny Woźniak powstała więc na starannie przygotowanym gruncie wcześniejszego rozpoznania merytorycznego i metodycznego.

Oceniana praca zawiera podstawowe elementy pracy doktorskiej, ma charakter naukowo-badawczy, a także potencjał aplikacyjny. Treść rozprawy doktorskiej jest zgodna z tytułem, proporcje oraz przyjęte

rozdziały nie budzą zastrzeżeń. Cel rozprawy został spełniony, a wnioski znajdują potwierdzenie w opracowaniu wyników badań.

4. Merytoryczna ocena pracy.

Doktorantka rozpoczęła swoją rozprawę od rozdziału nazwanego „Wstęp”, w którym krótko przedstawia dynamiczny rozwój technologii cyfrowych, koncepcję Industry 4.0 oraz rosnące znaczenie technologii przyrostowych.

Rozdział drugi prezentuje główne etapy rozwoju przemysłu, rozwiązania usprawniające procesy produkcyjne, tj. Lean Manufacturing, systemy klasy MRP, systemy CRM oraz Industry 4.0. Autorka wyjaśnia czym jest koncepcja Industry 4.0. To właśnie technologie addytywne należą do grupy nowoczesnych technologii wytwarzania prototypu czy produktu. Doktorantka bardzo słusznie zauważa i podkreśla, iż wdrożenie i utrzymanie koncepcji oraz technologii związanych z Industry 4.0 będzie wyzwaniem dla nowoczesnych inżynierów. To właśnie kompetencje z zakresu automatyki, jak i informatyki są niezbędne w nowoczesnym kształceniu kadr wszechstronnych inżynierów – ITmatyków. W kolejnym rozdziale Autorka dokonuje syntetycznej charakterystyki metod szybkiego prototypowania i branży druku 3D. Niezwykle istotne informacje Pani mgr inż. Joanna Woźniak przedstawia w następnym rozdziale dotyczącym przeglądu istniejących systemów zarządzania systemami wytwarzania przyrostowego i dokonuje podziału na trzy warianty – struktura bezpośrednia, pośrednia oraz funkcjonująca w ramach koncepcji Industry 4.0.

Trzeci rozdział opisuje tezy i cele postawione w pracy, a następnie przedstawia zakres pracy. Pani mgr inż. Joanna Woźniak na podstawie dokonanej analizy obecnego stanu wiedzy postawiła tezę, iż doskonalenie systemu zarządzania produkcją w procesach wytwarzania addytywnego może istotnie wpływać na poprawę jakości wytwarzanych prototypów oraz skrócenie czasu dostaw. Kolejną tezę pracy doktorskiej jest możliwość identyfikacji potrzeb zastosowania narzędzi zarządzania produkcją w przyrostowych procesach wytwórczych za pomocą badania ankietowego. Autorka zauważa również, iż w czasach obecnie padającej pandemii zastosowanie systemów zarządzania zdalnego jest odpowiedzią na bieżące problemy związane z koniecznością obniżenia ryzyka epidemiologicznego. Za cel główny Doktorantka postawiła sobie opracowanie metodyki wytwarzania prototypu z zastosowaniem technologii przyrostowych z uwzględnieniem metod doskonalenia procesu opartych o komputerowo wspomagane systemy inżynierskie, jak również sieciowe systemy informatyczne wyposażone w moduły pracy zdalnej. Cel pracy Autorka zrealizowała wieloetapowo dokonując opracowania algorytmu procesu realizacji zleceń produkcyjnych oraz dystrybucyjnych, analizując techniczne i technologiczne aspekty wytwarzania, kontroli jakości w kolejnych etapach wytwarzania, identyfikując zagrożenia w kolejnych etapach produkcyjnych i proponując działania doskonalące. Doktorantka dokonała również analizy branży z uwzględnieniem obsługi logistycznej prowadząc badania ankietowe przedsiębiorstw działających w branży technologii przyrostowych.

Czwarty rozdział dotyczy części doświadczałnej. Doktorantka opracowała przykładowy algorytm postępowania w przypadku realizacji zlecenia wydruku 3D. Modelem badawczy, który podlegał analizie był uchwyt lusterka samochodowego. Modele wykonano na następujących urządzeniach: Object Eden 260V, Drukarka 3D STRATASYS F170, EnvisionTEC Vida, Prusa i# MK3 oraz drukarka UP BOX+, będących na wyposażeniu Katedry Konstrukcji Maszyn Politechniki Rzeszowskiej. Metody wytwarzania wybrane przez Doktorantkę to: metoda PolyJet, FDM, DLP, FFF oraz MEM. Modele wykonane każdą z wymienionych metod Doktorantka poddała kontroli jakości metodą wizualną, za pomocą suwmiarki, skanera ręcznego oraz bezstykowego systemu optycznego. Następnie zaprezentowała wyniki kontroli w postaci tabeli odchyłek oraz graficznie jako mapy odchyłek dokładności. Autorka opracowała dodatkowo platformę on-line do kontroli jakości wyrobów. Rozdział zawiera również informacje o możliwych zagrożeniach powstających podczas procesu produkcyjnego na etapie pre-processingu, processingu oraz post-processingu. Przedstawione są przykładowe działania doskonalące.

W rozdziale piątym Autorka przedstawia wyniki przeprowadzonej analizy rynkowej branży druku 3D. Badaniom poddano 80 przedsiębiorstw i instytucji badawczych oferujących usługi szybkiego prototypowania. Przedmiotem analizy był ten sam element, który stanowił obiekt badań doświadczałnych. Ankietowani odpowiedzieli na szereg pytań otwartych, zamkniętych i półotwartych. Wyniki badań prezentują interesujące wyniki, z których wylania się aktualny stan przemysłu technologii addytywnych w Polsce. Autorka dokonała porównania kosztów wydruku dla trzech wybranych metod

przyrostowych. Otrzymano dość znaczne rozbieżności cenowe dla każdej z metod, np. dla materiału ABS od 38,10 zł do 744,47 zł. Podobne różnice cenowe zaobserwowano dla pozostałych dwóch materiałów: poliamidu i fotopolimeru. Autorka dokonała porównania czasu realizacji zamówień, możliwych form złożenia zamówienia, szybkości odpowiedzi na zapytanie, minimalnej wielkości zamówienia. Z przeprowadzonej analizy statystycznej wynika, iż forma złożenia zamówienia ma istotny wpływ na czas wytwarzania modeli i czas realizacji zamówienia. Nie istnieje za to statystycznie istotna zależność pomiędzy formą złożenia zamówienia a ceną wydruku modelu. Pani mgr inż. Joanna Woźniak przeprowadziła następnie badania poziomu wdrożenia koncepcji Industry 4.0 dla technologii przyrostowych. Wytypowała 148 przedsiębiorstw i instytucji naukowych wykorzystujących te technologie, natomiast wyniki badań otrzymała od 100 podmiotów. Narzędziem badawczym był kwestionariusz ankietowy udostępniony za pomocą metody PAPI, a także metody CAWI. Autorka analizowała zasięg terytorialny prowadzonej działalności, wielkość przedsiębiorstwa, lata działalności na rynku, działalność w konkretnej branży, rodzaj prowadzonej działalności marketingowej, posiadanie wybranych komórek w zakresie inżynierii produkcji, posiadanie chmur obliczeniowych, ilość posiadanych drukarek oraz wykorzystywane metody druku, korzystanie z podwykonawców, jak również korzystanie z platform do automatycznej wyceny modeli. Analiza wyników ankiety dostarczyła ciekawych wniosków na temat stosowanych sposobów kontroli jakości wydruków 3D. Aż 36% ankietowanych zadeklarowało korzystanie jedynie z wizualnej weryfikacji. Autorka dodatkowo pytała ankietowanych o wdrożone obecnie narzędzia Lean Manufacturing, plany dotyczące rozwoju przedsiębiorstw, kierunki dalszego rozwoju oraz szansy i zagrożenia wynikające z wdrożenia koncepcji Industry 4.0.

Ostatni rozdział „Podsumowanie i wnioski” zawiera podsumowanie otrzymanych wyników. Wnioski korespondują z założonymi celami pracy i wynikają z przeprowadzonych badań i analizy wyników. Wyniki badań ujawniły, iż wiele przedsiębiorstw nie jest obecnie przygotowana do wdrożenia koncepcji Industry 4.0, ale nawet nie ma świadomości konieczności wdrożenia rozwiązań Lean Manufacturing. Autorka proponuje wykorzystanie kilku narzędzi w celu usprawnienia procesu produkcji, tj. nadzorowanie produkcji przez centralny system osadzony w chmurze, zdalne sterowanie procesem wytwarzania. Ponadto w podsumowaniu zawarto wskazówki praktyczne dla przedsiębiorstw w zakresie stosowania narzędzi 5S, zintegrowanych gniazd obróbczych, przeprowadzenia analizy zasadności wprowadzonych metod pomiaru jakości oraz rekomendacje dla klientów. Rozdział kończy przedstawienie kierunków dalszych badań Doktorantki.

5. Uwagi szczegółowe

Uwagi krytyczne, głównie o charakterze dyskusyjnym, które nasuwają się podczas czytania pracy, przedstawione zostały poniżej. Są to jednak uwagi, po uwzględnieniu których praca nabrałaby większej czytelności i przejrzystości. Sformułowane w niniejszej recenzji uwagi nie umniejszają wartości pracy. Autorka popełniła niewiele drobnych omyłek merytorycznych czy nietrafnych sformułowań. Wybrane uwagi szczegółowe wyszczególniono poniżej:

- Autorka zauważa w pracy, iż wytwarzanie przyrostowe często nazywane jest drukiem 3D. W pracy stosuje te terminy wymiennie, mimo, iż posiadają pewne różnice. Za zasadne wydaje się wyjaśnienie tych różnic w pracy, gdyż jest to rozprawa doktorska dotycząca technik przyrostowych.
- Doktorantka zgromadziła wiele cennych informacji dotyczących nie tylko technologii przyrostowych, ale również posiada cenną wiedzę dotyczącą bieżącej sytuacji rynkowej w branży, którą nabyła na podstawie przeprowadzonych ankiet, zatem zasadne byłoby opracowanie wytycznych dla osób zarządzających firmami mających na celu stopniowe zmiany w firmie w kierunku wdrożenia koncepcji Industry 4.0.
- Na str. 60 w tabeli 4.3 niepoprawnie wskazano jednostkę: jest „Mm”, a powinno być „mm”.
- Autorka w kilku miejscach pracy stosuje dość nieprecyzyjne określenia, np. str. 69 „dobry stosunek ceny do jakości”, str. 72 „złe wymiary”, „złe zaprojektowany model”, „złe ustawienie parametrów wydruku”, „zła kalibracja”, „złe zabezpieczenie”, str. 73 „w konsekwencji popsuc wydruk”.
- Wskazana na str. 69 rozprawy strona internetowa z platformą do kontroli jakości wyrobów wytwarzanych przyrostowo na dzień wykonania recenzji, tj. 26.08.2020 r. nie pozwala na

zapisanie wyników i podgląd modelu. Czy Doktorantka zamierza udostępnić platformę komercyjnie innym użytkownikom?

- Dlaczego Doktorantka przeprowadziła analizę rynkową dla wybranych logistycznych aspektów w przyrostowych metodach wytwarzania dla 80 przedsiębiorstw i instytucji (str. 75), natomiast badania poziomu wdrożenia koncepcji Industry 4.0 na 100 respondentach? Z analizy tekstu rozprawy wynika, iż badania prowadzono w 2019 r. Czy nie była to ta sama grupa, a więc 148 podmiotów?
- Czy Doktorantka nie sądzi, aby wydzielić z analizy instytucje badawcze z analizy rynkowej i przeprowadzić osobną analizę w podziale na instytucje badawcze i firmy? Inne są cele tych podmiotów gospodarczych. Przedsiębiorstwa nastawione są na zysk, zatem priorytety tych podmiotów mogą być inne dla instytucji badawczych.
- Przy wnioskowaniu statystycznym Doktorantka używa słowa „prawdopodobnie”, np. „prawdopodobnie forma złożenia zamówienia ma wpływ na czas wytwarzania modeli”; również na str. 82 i 104 Autorka założyła poziom istotności $\alpha=0,05$, zatem wyjaśniając zależności pomiędzy zmiennymi to „prawdopodobieństwo” jest już zawarte w poziomie istotności. Wskazując poziom istotności można było śmiało pominąć to słowo i powiedzieć, iż „forma złożenia zamówienia ma wpływ na czas wytwarzania modeli”.
- Autorka dokonała analizy cen modeli wykonanych przy użyciu różnych metod. Otrzymano ciekawe wyniki w postaci dość zróżnicowanych cen, np. dla materiału ABS cena minimalna to 38,19 zł, a maksymalna to 744,47 zł. Czy Doktorantka pokusiła się o zgłębienie przyczyn tak znacznych rozbieżności? Czy można zaobserwować tutaj jakieś zależności, np. z podziałem na wielkość przedsiębiorstwa?
- W analizie poziomu wdrożenia koncepcji Industry 4.0 aż 16% to przedsiębiorstwa duże (str. 86). Tak znaczny udział dużych firm w badaniu jest dość zaskakujący, gdyż polski sektor przedsiębiorstw jest zdominowany przez mikroprzedsiębiorstwa, których udział w strukturze wszystkich przedsiębiorstw wynosi aż 96,5% [źródło: Raport o stanie sektora małych i średnich przedsiębiorstw w Polsce, Warszawa, czerwiec 2019, PARP]. Skąd tak znaczna ilość dużych przedsiębiorstw?
- W podsumowaniu pojawia się Karta Ocena Dostawcy jako jedna z metod uprawnienia przygotowania procesu produkcyjnego, jednak brak jest opisu tej karty i informacji w pozostałej części pracy.
- Na str. 2 załącznika dot. kontroli jakości proponuję użyć słowa „wymiar” zamiast „odległość”.

Praca przygotowana jest bardzo starannie od strony redakcyjnej i Autorka popełniła niewiele drobnych omyłek pisarskich.

6. Ocena formalna pracy

Praca stanowi oryginalne i samodzielne dzieło twórcze. Treść pracy jest zgodna z tematem podanym w tytule i z zadeklarowanym celem pracy. Praca została napisana starannie, zrozumiałym językiem i zgodnie ze schematem przyjętym dla prac doktorskich. Z rozprawy wynika, iż mgr inż. Joanna Woźniak pogłębiła swoją wiedzę oraz umiejętności badawcze i poznała literaturę przedmiotu, do którego należy temat pracy. Doktorantka przyczyniła się do rozwoju wiedzy naukowej.

Przedstawioną do oceny rozprawę oceniam pozytywnie jako pracę wartościową. Podsumowując stwierdzam, iż rozprawa spełnia wymóg oryginalnego rozwiązania przez Autorkę zagadnienia naukowego, spełnia wymóg wykazania Jej ogólnej wiedzy teoretycznej w uprawianej dyscyplinie oraz wykazuje umiejętność samodzielnego prowadzenia przez Autorkę pracy naukowej.

7. Wniosek końcowy

Ocena stanowiąca podstawę sformułowania merytorycznej oceny pracy jest pozytywna. Rozprawa doktorska Pani mgr inż. Joanny Woźniak stanowi oryginalne rozwiązanie zagadnienia naukowego. Rozprawa potwierdza umiejętność prowadzenia prac badawczych przez Autorkę i jej wiedzę teoretyczną. Stwierdzam, iż recenzowana rozprawa spełnia wymogi Ustawy z dnia 14 marca 2003 r. o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki w dziedzinie nauk inżynieryjno-technicznych i dyscyplinie inżynieria mechaniczna wg klasyfikacji określonej w Rozporządzeniu Ministra Nauki i Szkolnictwa Wyższego z dnia 20 lipca 2018 roku. Przedkładam

więc Radzie Dyscypliny Inżynierii Mechanicznej Politechniki Rzeszowskiej wniosek o dopuszczenie mgr inż. Joanny Woźniak do publicznej obrony recenzowanej przeze mnie pracy pt. „Doskonalenie sterowania rozproszonymi systemami wytwarzania przyrostowego”.

Jelanta Chólmę