



Politechnika  
Śląska



UCZELNIA  
BADAWCZA  
#UCZELNIA DOKONANOSC

Wydział Inżynierii Materiałowej  
Katedra Inżynierii Produkcji

prof. dr hab. inż.  
Krzysztof Nowacki

Katowice, 09.08.2024

**Recenzja pracy doktorskiej mgra inż. Michała PLAWGO**  
**pt.: „Optymalizacja ekologicznych metod ekstrakcji związków biologicznie czynnych**  
**z *Levisticum officinale* WDJ Koch w oparciu o analizę wielokryterialną**  
**z wykorzystaniem nawigacji na zbiorach Pareto”**  
opracowana na zlecenie  
Przewodniczącego Dyscypliny Inżynieria Mechaniczna  
prof. dr hab. Dariusza Andrejko

**Ocena wyboru tematu pracy doktorskiej**

Praca porusza zagadnienie dotyczące znanego procesu ekstrakcji związków z biomasy roślinnej. Doktorant w ramach pracy prowadził eksperymenty oraz analizował ich wyniki w odniesieniu do ekstraktów wodnych. Ekstrakcja fitozwiązków z korzeni lubczyku lekarskiego była badana, o czym informuje literatura tematu, jednak badania w tym zakresie skoncentrowane były głównie na konwencjonalnej ekstrakcji rozpuszczalnikami organicznymi. Do ekstrakcji wykorzystywanych jest szereg różnych metod zgodnych z zasadami tzw. „zielonej chemii”. W aspekcie proekologicznej polityki krajów, szczególnie UE, oraz oczekiwań rozwijającego się proekologicznego społeczeństwa wynikających z obserwowanych rosnących problemów środowiskowych, woda wskazywana jest jako bezpieczny rozpuszczalnik, który powinien być szeroko stosowany m.in. do produkcji ekstraktów roślinnych. Z tego powodu ekstrakcja wodna zyskuje na znaczeniu w ramach „zielonych technologii” i dla zwiększenia skuteczności ekstrahowania związków bioaktywnych wskazana jest optymalizacja parametrów procesu. Badania nad ekstrakcją wodną, w świetle powszechnej tendencji do podejmowania działań proekologicznych stanowią o aktualności tematu rozprawy.

Politechnika Śląska  
Wydział Inżynierii Materiałowej  
Katedra Inżynierii Produkcji

ul. Krasińskiego 8, pok. 141, 40-019 Katowice  
+48 32 603 44 12  
[krzysztof.nowacki@polsl.pl](mailto:krzysztof.nowacki@polsl.pl)

NIP 631 020 07 36  
ING Bank Śląski S.A. o/Gliwice 60 1050 1230 1000 0002 0211 3056



HR EXCELLENCE IN RESEARCH



Działania proekologiczne koncentrują się również w obszarze zaspokojenia potrzeb społecznych, a te dotyczą m.in. oczekiwań naturalnych związków w produktach spożywczych i co najmniej ograniczenia ilości odpadów generowanych przez wszystkie procesy. Obserwowany jest rosnący trend dotyczący badań nad naturalnymi związkami przeciwutleniającymi, które mogłyby zastąpić syntetyczne produkty, w tym dodatki do żywności i agrochemikalia, powszechnie stosowane w produkcji żywności i rolnictwie, w co wpisuje się tematyka dysertacji. Ponadto obecnie wykorzystywane są jako przyprawa przede wszystkim liście *Levisticum officinale*, w związku z tym korzenie tej rośliny zazwyczaj traktowane są jako produkt uboczny, stanowiący odpad. Autor rozprawy proponuje zagospodarowanie tej części rośliny w sposób przyjazny środowiskowo.

Wiele procesów prowadzonych jest na podstawie ugruntowanych, sprawdzonych procedur technologicznych, jednak nie popartych gruntowną analizą. Autor proponuje zastosowanie metod naukowej analizy wyników do optymalizacji procesu, co jest powszechną praktyką w dobrze zorganizowanych procesach przemysłowych. Statystyczna kontrola procesu, poparta wcześniejszą analizą stanowi dziś punkt wyjścia w organizacji procesów produkcyjnych, np. w najlepiej rozwiniętym pod tym kątem sektorze automotive.

Ze względu na aktualne dążenia do wprowadzenia zasad „zielonej chemii” i zgodnie z Europejskim Zielonym Ładem zastosowanie metod optymalizacyjnych ekstrakcji związków biologicznie czynnych *Levisticum officinale* wpisuje się w trendy badawcze dotyczące wspomaganie projektowania procesów, z uwzględnieniem zmniejszenia ich natychmiastowego i długoterminowego wpływu na środowisko. Biorąc pod uwagę powyższe, pozytywnie oceniam wybór tematu realizowanej pracy doktorskiej Pana mgr inż. Michała Plawgo, choć w mojej opinii zwrot „w oparciu” można było zamienić na „na podstawie”. Temat dysertacji spełnia warunek aktualności i jednocześnie stanowi odpowiedź na zapotrzebowanie na działalność badawczą w dyscyplinie inżynieria mechaniczna, szczególnie w obszarach inżynieria produkcji i inżynierii rolniczej.

#### **Charakterystyka i ocena pracy doktorskiej**

Recenzowana praca doktorska zredagowana jest według klasycznego i akceptowanego schematu na 89 stronach, podzielona na 27 numerowanych rozdziałów i podrozdziałów, które obejmują:

- część literaturową (rozdz. 1), zawierającą wprowadzenie w problematykę dysertacji,
- hipotezy badawcze i cel naukowy (rozdz. 2),
- charakterystykę materiału badawczego i metod badań (rozdz. 3),
- część analityczną (rozdz. 4) przedstawiającą wyniki prowadzonych badań i analiz oraz ich interpretację,
- wnioski (rozdz. 5)

Ponadto w treści pracy zamieszczono spis bibliograficzny (rozdz. 6) oraz nienumerowane załączniki w postaci kopii opublikowanych prac wchodzących w skład cyklu publikacji i oświadczenia Doktoranta oraz Współautorów dotyczące ich wkładu w przygotowanie opublikowanych prac naukowych.

Spis bibliograficzny, zawiera 119 prawidłowo wskazanych aktualnych pozycji krajowych i zagranicznych. Niestety w wykazie bibliografii nie wskazano pozycji autorstwa Doktoranta, choć zostały one wymienione na str. 2 pracy jako

„publikacje stanowiące rozprawę doktorską”. Publikacje te zostały załączone do rozprawy, co wskazuje na zadowalającą aktywność Doktoranta w tym obszarze.

We wprowadzeniu Doktorant przedstawia czytelnikowi genezę rozprawy mającą stanowić uzasadnienie przedstawionego później problemu badawczego. Wymieniane są metody ekstrakcji, z akcentem na ekstrakcję wodną, a także stanowiące obszar badań wspomaganie procesu mikrofalami lub ultradźwiękami. Dalej Autor przedstawia potencjał przeciwutleniający ekstraktów roślinnych oraz korzystne właściwości farmakologiczne roślin aromatycznych czy zielarskich, które są związane z obecnością różnorodnych wtórnych metabolitów roślinnych. Doktorant wskazuje, że „niezwykle trudnym zadaniem jest opracowanie jednego, ogólnego i wydajnego protokołu ekstrakcji związków czynnych, w tym związków fenolowych, z różnych materiałów roślinnych. W związku z tym proces ekstrakcji powinien być zoptymalizowany dla każdej matrycy roślinnej”. Dalej twierdzi, że „optymalizację procesu prowadzi się z wykorzystaniem wielu metod, w tym metod empirycznych, statystycznych i łączonych. Podkreślić należy fakt, że odpowiednia procedura optymalizacji i jej efekty są niezbędne do przyszłościowego przemysłowego zastosowania procesu oraz komercjalizacji wytworzonego produktu”. Jako częsty sposób optymalizacji wspomagającej proces ekstrakcji wskazuje optymalizację wielokryterialną, której istotę przybliża. Podsumowując aktualny stan wiedzy, Autor twierdzi, że „najważniejszym aspektem jest interdyscyplinarność badań. Dopiero takie podejście umożliwi efektywne korzystanie z surowców i odpadów, z poszanowaniem zasad ochrony środowiska i dążenia do zwiększenia wydajności produkcji bioaktywnych związków o różnorodnym potencjale”. Oceniając tę część rozprawy, należy stwierdzić, że Doktorant dokonał kompleksowego przeglądu literaturowego, bogato przytaczając aktualne pozycje bibliograficzne, oraz poruszył wszystkie kwestie które są istotne z punktu widzenia tematyki rozprawy. Niestety tematyka w większości zagadnień została przedstawiona syntetycznie, co skutkowało ostatecznie objętością zaledwie 8 stron maszynopisu. Wiele pojęć zostało wprowadzonych do tekstu, jednak Autor ich nie wyjaśnił lub nie przedstawił mechanizmów działania procesów.

Przedstawione w tej części dysertacji treści wprowadzają czytelnika w analizowane zagadnienia, udowadniając jednocześnie dużą wiedzę Doktoranta w tym temacie. Ich lektura nasuwa jednak kilka pytań:

1. Jaki jest mechanizm wspomaganie procesu ekstrakcji roślinnej mikrofalami?
2. Jaki jest mechanizm wspomaganie procesu ekstrakcji roślinnej ultradźwiękami?
3. Co oznacza pojęcie „zbiór optymalny w sensie Pareto” i jaka jest jego interpretacji w odniesieniu do analizowanego zagadnienia?

Powyższe uwagi należy traktować jako wstęp do dyskusji, mając na uwadze, że nie wpływają one na wysoki poziom merytoryczny tej części pracy.

W rozdziale 2, zgodnie z jego tytułem, Doktorant przedstawił problem badawczy, hipotezy i cel naukowy rozprawy.

Jako problemy badawcze wskazano odpowiedzi na pytania:

- Przy jakiej metodzie i jakich parametrach procesu ekstrakcji wodnej możliwe jest wytworzenie ekstraktów z *Levisticum officinale* o najwyższej zawartości związków biologicznie czynnych?
- Czy bazowanie na modelach matematycznych i optymalizacji wielokryterialnej będzie narzędziem wspierającym podejmowanie decyzji o parametrach procesów ekstrakcji?

Wskazano prawidłowo cel pracy, jako „dobór metody i parametrów procesu ekstrakcji wodnej konwencjonalnej i wspomaganej mikrofalami lub ultradźwiękami dla maksymalizacji zawartości związków biologicznie czynnych z *Levisticum officinale*, z zastosowaniem teorii podejmowania decyzji opartej na modelach matematycznych i optymalizacji wieloobektowej” oraz trzy hipotezy badawcze:

- Zastosowanie analizy wielokryterialnej z wykorzystaniem nawigacji po zbiorach Pareto umożliwia dobór metody i parametrów procesu ekstrakcji związków biologicznie aktywnych z *Levisticum officinale*.
- Zaproponowane metody optymalizacji procesu ekstrakcji umożliwią dobór parametrów procesu ekstrakcji związków bioaktywnych z *Levisticum officinale*.
- Ekstrakcja wodna wspomagana mikrofalami lub ultradźwiękami pozwoli na bardziej wydajną ekstrakcję związków bioaktywnych z *Levisticum officinale* w porównaniu z konwencjonalną metodą ekstrakcji.

W rozdz. 3 Doktorant scharakteryzował materiał badawczy oraz przedstawił metody prowadzonych badań i analiz. W przypadku materiału badawczego zauważalna jest niekonsekwencja w stosowanej terminologii, bowiem Autor wymiennie stwierdza, że prowadzona jest ekstrakcja korzeni *Levisticum officinale*, a także ekstrakcja *Levisticum officinale*. Ostatecznie praca skoncentrowana jest na ekstrakcji zmielonych korzeni. Podobnie jest w przypadku zapisu kwadratu korelacji („R<sup>2</sup>” i „R-kwadrat”). Pomimo starannego opracowania poszczególnych metod badań i analizy nie wyjaśniono wszystkich symboli, np.  $k_1$  do  $k_4$  oraz  $k_1'$  do  $k_4'$ .

Do tej części pracy mam kolejne pytania:

4. Jaka była temperatura początkowa ekstrakcji przy wspomaganie jej mikrofalowo i oraz ultradźwiękowo?
5. Dlaczego wybrano częstotliwość rezonansową 20 kHz?
6. Czy analizowano jaka była rzeczywista moc akustyczna dostarczona do próbki?
7. Jak głęboko i czy było to kontrolowane, była zanurzona sonotroda w próbce?
8. Na jakiej podstawie przyjęto wagi  $w_1$  do  $w_4$  dla poszczególnych kryteriów, uwzględnione w równaniu 21?

W rozdziale 4 pracy Doktorant przedstawia wyniki prowadzonych badań ich analizę oraz dyskusję. W kolejnych podrozdziałach przedstawiono wyniki optymalizacji konwencjonalnej ekstrakcji wodnej, ekstrakcji wodnej wspomaganej mikrofalami oraz ekstrakcji wodnej wspomaganej ultradźwiękami. Wyniki ilustrowane są licznymi wykresami, które ułatwiają czytelnikowi śledzenie poszczególnych etapów analizy. Niestety niektóre z wykresów, ze względu na zbyt małą czcionkę są trudne do interpretacji. Każda z analizowanych metod opatrzona jest dyskusją wyników wraz z ich odniesieniem do istniejącego stanu wiedzy oraz podsumowaniem.

W odniesieniu do konwencjonalnej ekstrakcji wodnej procedury optymalizacyjne pokazały dużą złożoność rozpatrywanego problemu badawczego, co utrudniło wybór jednej najlepszej odpowiedzi i znalezienie jednego najlepszego rozwiązania, więc wyznaczono zbiory rozwiązań. Stwierdzono, że „konwencjonalną ekstrakcję można zastosować jako bezpieczną metodę (nie wymagającą wykorzystywania szkodliwych dla środowiska rozpuszczalników), wytwarzania bogatych w bioaktywne związki ekstraktów z *Levisticum officinale*. Zoptymalizowane ekstrakty można wykorzystać do opracowania nowych preparatów biostymulujących dla rolnictwa lub żywności funkcjonalnej lub kosmetyków naturalnych”.

W przypadku ekstrakcji wodnej wspomaganej mikrofalowo wykazano, że biomasa korzeni *Levisticum officinale* jest zasobna w związki bioaktywne o wysokim potencjale przeciwutleniającym oraz że ekstrakcja wodna, wspomagana mikrofalowo, jest odpowiednią metodą do ekologicznego pozyskiwania fitozwiązków z biomasy lubczyku. Wskazano zestawy rozwiązań Pareto- optymalnych, kompromisowych oraz preferowanych, które pozwolą na maksymalizację wydajności ekstrakcji związków bioaktywnych z biomasy roślinnej. W podzbiorach optymalnych wykazano, że dla satysfakcjonującego poziomu związków bioaktywnych, ekstrakcja powinna być przeprowadzona przy maksymalnej mocy mikrofal na poziomie 750 W.

W obszarze badań ekstrakcji wodnej wspomaganej ultradźwiękami, wykazano że całkowita pula związków fenolowych i flawonoidów oraz potencjał antyoksydacyjny wzrastały z wydłużaniem procesu ekstrakcji do osiągnięcia wartości krytycznej czasu, po którym analizowane wskaźniki przyjmowały już podobną stałą wartość. Redukcja zbiorów Pareto i wykorzystanie podejścia tzw. Smart Pareto, umożliwiło wyznaczenie podzbiorów rozwiązań preferowanych. W podzbiorach optymalnych odnotowano, że dla podwyższonej wydajności ekstrakcji TPC, TFC oraz TAA procedura ekstrakcyjna może być prowadzona w czasie 8,5714 minut, przy zachowaniu stosunku biomasa/rozpuszczalnik – 0,0679, 0,0714, 0,0750 g/ml oraz mocy ultradźwięków – 201,4286, 214,2857 i 188,5714 W. Natomiast druga opcja w tym podziorze wskazuje na brzegowy czas ekstrakcji, wynoszący 9 minut, stosunek masy korzeni *Levisticum officinale* do wody na poziomie od 0,0643 do 0,0750 g/ml oraz mocy ultradźwięków od 175,7143 do 240,0000 W. Nowością i oryginalnością przedstawionych badań jest zaprojektowanie i optymalizacja zrównoważonej ekstrakcji, wspomaganej ultradźwiękami, dla maksymalizacji wydajności pozyskiwanych cennych związków bioaktywnych, ze wskazaniem rozwiązań Pareto- optymalnych, preferowanych oraz kompromisowych. Przedstawione powyżej wyniki, wskazują na nadzwyczajną dokładność, w praktyce nieosiągalną. Przedstawiając wyniki analiz matematycznych, Doktorant powinien je przedstawić z realną do uzyskania w praktyce dokładnością.

Przedstawione wyniki badań wraz z ich analizą wymagają uzupełnienia w postaci odpowiedzi na poniższe pytania:

9. Jaki przyjęto poziom istotności  $\alpha$  w testach statystycznych?
10. Dlaczego nie określono siły wpływu poszczególnych parametrów w odniesieniu do założonych kryteriów badawczych  $K_1$  do  $K_4$ ? Określenie siły wpływu być może pozwoliłoby na realne określenie wag  $w_1$  do  $w_4$ .

Część analityczną pracy kończą wnioski. Przedstawiono 9 wniosków wynikających z uzyskanych wyników i prowadzonych analiz oraz 2 wnioski o charakterze użytkowym. Niestety we wnioskach nie odniesiono się bezpośrednio do celu pracy, choć jego realizację potwierdzają poszczególne wyniki. Nie odniesiono się również do postawionych problemów badawczych, szczególnie do problemu 1 „Przy jakiej metodzie i jakich parametrach procesu ekstrakcji wodnej możliwe jest wytworzenie ekstraktów z *Levisticum officinale* o najwyższej zawartości związków biologicznie czynnych?”. Uważam jest to pytanie które wymaga dyskusji ze strony Doktoranta.

Pomimo widocznej dużej staranności w opracowaniu rozprawy, Autor nie ustrzegł się nielicznych błędów językowych i edytorskich. Są to drobne błędy, które nie obniżają wysokiego poziomu naukowego pracy, ale powinny zostać skorygowane w przypadku wykorzystania materiału w dalszych publikacjach.

Wszystkie powyższe uwagi mają w dużej mierze charakter dyskusyjny i nie wpływają na pozytywną ocenę wartości merytorycznej pracy, ogólnej prawidłowości koncepcji badań i zastosowanych technik badawczych.

### Wniosek końcowy

Biorąc pod uwagę aktualność tematyki rozprawy doktorskiej, mającą znaczenie poznawcze i użyteczne oraz umiejętności Autora, który:

- sformułował i rozwiązał samodzielnie określony problem badawczy zgodnie z postawionymi hipotezami oraz dobrał do niego właściwe metody badawcze,
- wykazał dobre opanowanie warsztatu badawczego, szczególnie w zakresie prowadzenia ekstrakcji wodnej biomasy roślinnej oraz metod wspomagających te procesy (mikrofale, ultradźwięki)
- wykazał dobre opanowanie warsztatu badawczego w zakresie analizy statystycznej wyników badań,
- na podstawie badań własnych uzupełnił wiedzę naukową w dyscyplinie inżynierii mechanicznej, w obszarach inżynierii produkcji i inżynierii rolniczej,

stwierdzam, że przedstawiona do recenzji praca doktorska pt.: „Optymalizacja ekologicznych metod ekstrakcji związków biologicznie czynnych z *Levisticum officinale* WDJ Koch w oparciu o analizę wielokryterialną z wykorzystaniem nawigacji na zbiorach Pareto” zawiera się w dyscyplinie Inżynieria Mechaniczna oraz spełnia wymagania określone w art. 187 Ustawy Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce z dn. 20 lipca 2018r. (DzU 2023 poz. 742 ze zm.).

Na podstawie powyższego wnioskuje o dopuszczenie mgr inż. Michała Pławgo do publicznej obrony rozprawy doktorskiej.

