

Dr hab. Inż. Bogusława Łapczyńska-Kordon, prof. UR  
Katedra Inżynierii Mechanicznej i Agrofizyki  
Wydział Inżynierii Produkcji i Energetyki  
Uniwersytetu Rolniczego w Krakowie

## **Recenzja**

### **rozprawy doktorskiej mgr inż. Krzysztofa Kosiarka**

**pt. „Modelowanie procesu rehydratacji suszu z buraków ćwikłowych”,**

wykonanej w Instytucie Inżynierii Rolniczej, w Katedrze Podstaw Inżynierii i Energetyki

Szkoły Głównej Gospodarstwa Wiejskiego w Warszawie

pod kierunkiem dr. hab. inż. Krzysztofa Górnickiego, prof. SGGW (promotora) i dr inż. Anety  
Choińskiej (promotora pomocniczego)

### **Podstawa wykonania recenzji**

Recenzja została wykonana na zlecenie Przewodniczącego Rady Dyscypliny Inżynieria Mechaniczna Szkoły Głównej Gospodarstwa Wiejskiego w Warszawie.

Podstawa prawna: art. 13 ust. 1 Ustawy z dnia 14 marca 2003 r. o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz stopniach i tytule w zakresie sztuki (Dz. U. 2003 Nr 65 poz. 595, z późniejszymi zmianami) oraz art. 179 ustawy z dnia 3 lipca 2018 r. w przepisach wprowadzających ustawę - Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce 3 lipca 2018 roku (Dz. U. z 2018 r. pozycja 1669, z późniejszymi zmianami).

### **Uzasadnienie podjęcia tematu**

Warzywa i owoce stanowią ważne składniki w żywieniu człowieka, ze względu na swe właściwości odżywcze i prozdrowotne: zawartość witamin, cukrów, białka, tłuszczów i innych. Spożywane są w postaci świeżej, ale też przetworzonej. Ponieważ są to produkty o wysokiej wilgotności, dlatego muszą być odpowiednio zabezpieczone podczas przechowywania lub poddane konserwacji. Jedną z metod konserwacji jest suszenie, jako termiczne przetwarzanie, polegające na obniżeniu zawartości wody w suszonym materiale. W wyniku termicznego oddziaływania następują zmiany fizyko-chemiczne i jakościowe w suszonych warzywach i owocach, obniżające ich wartość odżywczą. Susz warzywny i owocowy jest najczęściej ponownie nawilżany, podczas przygotowania produktów do spożycia. Szybkość nawilżania i

końcowa zawartość wody, dają, możliwość oceny pośredniej uszkodzeń tkanki suszonych materiałów za pomocą wskaźników związanych z rehydracją, między innymi stopnia rehydratacji, zmian masy, objętości próbki.

Poznanie zjawisk i procesów zachodzących podczas suszenia, czy ponownego nawilżania umożliwiają, modele matematyczne wyprowadzone na bazie teorii wymiany ciepła i masy w ciałach stałych oraz praw termodynamiki. Takie modele zostały wyprowadzone dla procesu suszenia różnych materiałów pochodzenia roślinnego, które stały się podstawą, do opracowania szczegółowej teorii konwekcyjnego suszenia materiałów roślinnych (np. warzyw, owoców rolnych itp.). W oparciu o takie modele można dokonać identyfikacji zjawisk i procesów oraz zoptymalizować proces suszenia wybranych materiałów roślinnych, między innymi ze względu na jakość produktu, jak też wykorzystać do podejmowania optymalnych decyzji przy wyborze metody i parametrów suszenia, także rehydratacji. Optymalny dobór parametrów dla procesu rehydratacji umożliwi uzyskanie końcowego produktu o dobrej jakości (np. konsystencji, zawartości składników odżywczych itp.)

Odwrotnym procesem do suszenia jest rehydratacja. Ponieważ proces suszenia jest nieodwracalny, w związku z tym nawilżanie materiału odbywa się poprzez inne stany materiału nawilżanego, które osiąga materiał, zgodnie ze zjawiskiem histerezy. Podczas tego procesu zachodzi nie tylko dostarczanie wody do materiału, ale równocześnie wyługowanie suchej substancji. W celu wyjaśnienia i poznania procesów i zjawisk zachodzących podczas rehydratacji podejmowano próby opracowania modeli matematycznych empirycznych, semiempirycznych oraz opartych na prawach wymiany ciepła i masy oraz termodynamiki. Trudności w modelowaniu polegają, na wyznaczeniu współczynników dyfuzji ciepła i masy, wnikania ciepła i masy na brzegu obszaru oraz zmienności, które decydują, o szybkości i efektywności procesu.

Dlatego zasadne było podjęcie przez mgr. inż. Krzysztofa Kosiorka próby sformułowania matematycznego modelu rehydratacji suszu warzywnego (na przykładzie buraka ćwikłowego), na bazie praw wymiany ciepła i masy oraz termodynamiki, a także opracowanie modeli empirycznych opisujących współczynniki dyfuzji i wnikania masy, poprzedzonych doświadczalną analizą, tego procesu, dla różnych warunków prowadzenia procesu, w celu zidentyfikowania parametrów i modeli empirycznych.

**Zatem, w mojej ocenie temat pracy jest w ogólnym zakresie zgodny z treścią pracy, chociaż zagadnienie modelowania zostało niewyeksponowane.**

Niemniej tematyka pracy mieści się w dyscyplinie INŻYNIERIA MECHANICZNA

## Ocena formalna pracy

Rozprawa ta stanowi opracowanie naukowe o charakterze doświadczalno-teoretycznym, dotyczące badań oraz modelowania procesu rehydratacji suszu z buraka ćwikłowego, obejmujące zmiany masy, zawartości wody, suchej substancji oraz objętości w czasie procesu. Praca ta ma charakter zarówno poznawczy, jak i aplikacyjny.

Recenzowana rozprawa składa się ze 148 stron maszynopisu, zawartych w 8 merytorycznych rozdziałach: *Wstępie* (2 str.), *Przeglądzie literatury* (50 str.), *Celu i zakresie pracy* (2 str.), *Materiałach i metodyce* (12 str.), *Wynikach badań* (65 str.), *Podsumowaniu* (2 str.), *Wnioskach* (1 str.), *Bibliografii* (10 str.), wraz ze streszczeniami w języku polskim i angielskim (2 str.), wykazem oznaczeń (1 str.) oraz oświadczeniami (2 str.).

We *Wstępie* mgr inż. Krzysztof Kosiarek wprowadził czytelnika w tematykę przedstawioną w rozprawie. W następnym *Przeglądzie literatury* opisał dotychczasowe badania prezentowane w opublikowanych pracach naukowych na temat procesu suszenia głównie owoców i warzyw (wybrane metody suszenia i warunki prowadzenia procesu) i jego wpływu na proces rehydratacji, samego procesu rehydratacji suszu i wpływu poszczególnych czynników na proces uwadniania. W dalszej części tego rozdziału Doktorant zaprezentował tematykę związaną z modelowaniem procesu suszenia i rehydratacji, poprzez wskaźniki rehydratacji, modele empiryczne, semiempiryczne i teoretyczne oraz opisał metody numeryczne elementów skończonych, stosowaną do rozwiązywania nieliniowych równań różniczkowych cząstkowych. Dokonany przegląd literatury umożliwił mu w kolejnym rozdziale przedstawienie sformułowanego celu i zakresu pracy. W następnych rozdziałach przedstawił metodykę, w której opisał sposób przebiegu badań, mających na celu identyfikację parametrów modelu procesu rehydratacji i analizę wpływu różnych czynników na przebieg tego procesu oraz opracowanie modeli procesu rehydratacji i modeli współczynników dyfuzji oraz wnikania masy. Na podstawie analizy, interpretacji i dyskusji wyników badań oraz obliczeń z wykorzystaniem modeli, a także ich weryfikacji i walidacji, Doktorant dokonał podsumowania i sformułował wnioski. Część merytoryczną pracy zakończył rozdziałem, w którym zamieścił spis literatury.

**Praca ta została zredagowana poprawnie pod względem językowym, natomiast układ pracy budzi moje zastrzeżenia. Dotyczy to kolejności rozdziałów i podrozdziałów. Temat pracy dotyczy modelowania procesu rehydratacji - opracowania matematycznego modelu strukturalnego. W związku z tym, zgodnie ze sztuką modelowania, najpierw**

powinien być zamieszczony rozdział, w którym Doktorant przedstawił wyprowadzenie modelu. Poza tym nie można mówić, w przypadku tego zagadnienia, osobno o modelu wymiany masy, wymiany ciepła i zmian objętości, bo te wielkości są sprzężone i modelem procesu jest układ trzech równań różniczkowych z odpowiednimi warunkami początkowo-brzegowymi.

Cytowana w rozprawie literatura obejmuje 278 pozycji: głównie publikacji naukowych, monografii, prac doktorskich i kilku podręczników związanych z tematyką suszenia i rehydratacji suszu, dotyczących badań oraz modelowania, a także odniesień do encyklopedii i Roczników statystycznych. Są to opracowania zarówno w języku polskim, jak i angielskim. Doktorant korzystał ze źródeł obejmujących lata: od 60-tych XX wieku po publikacje z 2021 roku.

**W mojej ocenie przegląd literatury zawiera nadmiarową ilość informacji, zwłaszcza podstawowych wynikających z wiedzy podręcznikowej, czy encyklopedycznej (definiowanie procesów suszenia i rehydratacji, opis wybranych procesów suszenia itp.). Ponadto uważam, za zbędną analizę pozycji literatury prezentującej matematyczne modele procesów suszenia. Przegląd literatury powinien umożliwić zidentyfikowanie problemu naukowego. Tematyka pracy dotyczy modelowania procesu rehydratacji, dlatego Doktorant powinien skupić się na pracach związanych z tym zagadnieniem. Po za tym niektóre podrozdziały powinny się znaleźć w metodyce badań, ponieważ są narzędziami do przygotowania materiału badawczego (proces suszenia), czy przeprowadzenia obliczeń symulacyjnych z wykorzystaniem modelu (metoda elementów skończonych). W rozdziale Metodyka badań opis materiału badawczego (buraka ćwikłowego) powinien być skrócony do charakterystyki odmiany, którą poddano badaniom.**

### **Ocena merytoryczna**

Na podstawie analizy literatury z zakresu podjętej tematyki w rozprawie doktorskiej, mgr inż. Krzysztof Kosiarek sformułował cel i zakres pracy, który miał odzwierciedlić rozwiązywany problem naukowy. Stwierdził, że niewiele jest publikacji na temat badań i modelowania procesu rehydratacji suszu z buraka ćwikłowego, a prezentowane modele to modele empiryczne opracowane na podstawie danych pomiarowych, które nie dają możliwości poznania i wyjaśnienia zjawisk zachodzących podczas uwadniania suszu z buraka ćwikłowego, a wyniki pomiarów są fragmentaryczne.

Zauważa, że były formułowane matematyczne modele w oparciu o prawo Ficka dla innych warzyw i owoców, opisujące zmiany zawartości wody i ubytki suchej substancji podczas procesu uwadniania suszu, które umożliwiły lepsze poznanie tego procesu. Ponadto stwierdza, że przedstawione w publikacjach badania nad procesem rehydratacji suszu z owoców i warzyw pokazują, że proces uwadniania zależy od obróbki wstępnej materiału przed suszeniem, metody i temperatury suszenia, temperatury rehydratacji rodzaju i ilości cieczy nawadniającej próbki oraz kształtu próbek.

Bazując na pozyskanej wiedzy Doktorant sformułował problem badawczy w celu pracy.

Celem pracy było *„sformułowanie matematycznego modelu, opartego na teorii wymiany ciepła i masy, opisującego zmiany temperatury, stężenia (koncentracji) wody, stężenia (koncentracji suchej substancji i objętości oraz analiza i procesu rehydratacji suszu z buraków ćwikłowych”*.

Cel ogólny podzielił na cele cząstkowe:

„1. Ustalenie wpływu procesów suszenia i rehydratacji na przebieg procesu rehydratacji suszu z buraków ćwikłowych.

2. Wyjaśnienie procesu rehydratacji, na bazie teorii wymiany ciepła i masy, dzięki sformułowaniu matematycznego modelu rehydratacji.

3. Identyfikacja charakterystyk materiałowych suszu, charakterystyk procesów suszenia i rehydratacji, i ich wpływu na współczynniki wymiany masy (wnikania masy oraz dyfuzji masy) w procesie rehydratacji suszu z buraka ćwikłowego.”

**Uważam, że sformułowanie pierwszego celu cząstkowego jest bardzo ogólne. Należałoby uściślić, jakich parametrów procesów na jakie parametry suszu.**

Pomimo powyższych uwag, uważam, że cel pracy Doktorant przedstawił poprawnie pod względem formalnym. Zakres pracy obejmował badania, analizy wybranych metod i parametrów procesu suszenia oraz parametrów procesu rehydratacji na parametry i właściwości uwadnianego suszu, opracowanie matematycznego modelu procesu rehydratacji w oparciu o prawa nauki, a także zidentyfikowanie modeli współczynników dyfuzji i wnikania masy, a w efekcie przeprowadzenie obliczeń symulacyjnych z wykorzystaniem modelu za pomocą metody elementów skończonych i dokonanie weryfikacji i walidacji modelu.

Doktorant, cel pracy zrealizował według logicznie zaplanowanych zadań, polegających na przygotowaniu próbek, przeprowadzeniu badań odpowiadających zakresowi pracy.

Zaplanowane doświadczenia wykonano według ogólnie stosowanej metodyki, zgodnie z obowiązującymi Polskim Normami, w których przedstawione są metody oznaczania zawartości wody, zawartości suchej substancji, gęstości i porowatości owoców i warzyw, a także metody pomiaru takich parametrów jak masa, temperatura i objętości. W opisie metod badawczych mgr inż. Krzysztof Kosiorek, bardzo słusznie, podaje błędy bezwzględne pomiaru. Tylko w przypadku pośredniego wyznaczania wielkości (np. zawartości wody) ważnym jest podanie sposobu określenia tego błędu. Poza tym obecnie należy posługiwać się pojęciami niepewności pomiarowych. W metodyce Doktorant nie podał też, jak była mierzona prędkość liniowa nawadnianych cząstek. Jak był kodowany parametr „metoda suszenia” podczas opracowywania modeli empirycznych współczynników wnikania i dyfuzji masy?

Jak już wcześniej wspomniałam sposób opisu metodyki jest, w mojej ocenie, niepoprawny. Tematem i zatem celem pracy jest opracowanie modelu rehydratacji suszu z buraka ćwikłowego. Zatem opis w metodyce powinien rozpoczynać się od sformułowania modelu, zgodnie z etapami modelowania: założeniami do modelu, określeniem struktury modelu na podstawie praw wymiany ciepła i masy oraz termodynamiki, hipotez istnienia lub wyjaśniających do sformułowania modeli empirycznych współczynników dyfuzji i wnikania masy, a następnie przeprowadzenie identyfikacji parametrów modelu i zaproponowanie algorytmu obliczeń modelu.

Przedstawione równania w modelu opisujące wymianę ciepła i masy są ze sobą powiązane, w związku z tym model procesu rehydratacji jest układem równań różniczkowych cząstkowych, wynikających z prawa zachowania energii i masy, w powiązaniu z warunkami początkowo-brzegowymi.

Brakuje też, w mojej ocenie, opisu wyprowadzenie równań modelowych na podstawie I lub II Zasady termodynamiki, z uwzględnieniem równań bilansowych wynikających z zasady zachowania masy i energii. Chciałabym wiedzieć, w oparciu o jakie prawa, zasady, twierdzenia nauki uzyskano równanie (25) bilansowe ciepła i równanie (26) opisujące warunek brzegowy. Dlaczego nie przedstawiono równania bilansu substancji w uwadnianej próbce?

Proponuję, żeby Doktorant w czytelny sposób przedstawił w tabeli wartości parametrów, dla jakich zostały przeprowadzone obliczenia symulacyjne. Poza tym, chciałabym, żeby Autor rozprawy jasno określił założenia do modelu. Na przykład, czy założył, że materiał jest anizotropowy? Tak by wynikało z zapisu równań różniczkowych. Czy współczynnik przewodności cieplnej i dyfuzji masy i inne właściwości materiałowe zmieniają się w materiale podczas procesu? Wiele wątpliwości mogłoby być wyjaśnione, gdyby czytelnie Autor rozprawy przedstawił dane do obliczeń symulacyjnych.

Recenzowana praca wymaga dogłębnej korekty i uzupełnienia.

W związku z tym mgr inż. Krzysztof Kosiorek może zostać dopuszczony do publicznej obrony, po preredagowaniu, uzupełnieniu i korekcie swojej rozprawy doktorskiej.

  
Dr hab. inż. Bogusława Łapczyńska-Kordon, prof. UR

Dr hab. inż. Bogusława Łapczyńska-Kordon, prof. UR  
Katedra Inżynierii Mechanicznej i Agrofizyki  
Wydział Inżynierii Produkcji i Energetyki  
Uniwersytetu Rolniczego w Krakowie

**Ponowna recenzja poprawionej  
rozprawy doktorskiej mgr inż. Krzysztofa Kosiarka  
pt. „Modelowanie procesu rehydratacji suszu z buraków ćwikłowych”,  
wykonanej w Instytucie Inżynierii Rolniczej, w Katedrze Podstaw Inżynierii i Energetyki Szkoły  
Głównej Gospodarstwa Wiejskiego w Warszawie  
pod kierunkiem dr hab. inż. Krzysztofa Górnickiego, prof. SGGW (promotora) i dr inż. Anety  
Choińskiej (promotora pomocniczego)**

### **Podstawa wykonania recenzji**

Ponowna recenzja została wykonana na zlecenie Przewodniczącego Rady Dyscypliny Inżynieria Mechaniczna Szkoły Głównej Gospodarstwa Wiejskiego w Warszawie.

Podstawa prawna: art. 13 ust. 1 Ustawy z dnia 14 marca 2003 r. o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz stopniach i tytule w zakresie sztuki (Dz. U. 2003 Nr 65 poz. 595, z późniejszymi zmianami) oraz art. 179 ustawy z dnia 3 lipca 2018 r. w przepisach wprowadzających ustawę – Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce 3 lipca 2018 roku (Dz. U. z 2018 r. pozycja 1669, z późniejszymi zmianami).

Recenzja ta stanowi uzupełnienie do recenzji wcześniejszej wersji rozprawy doktorskiej mgr inż. Krzysztofa Kosiarka z dnia 25.10.2022 r., w której zawarłam uwagi dotyczące niedociągnięć merytorycznych oraz edytorskich i skierowałam pracę do poprawy.

W niniejszej recenzji dokonam oceny zmian, które powinny być wprowadzone przez Autora zgodnie z moimi uwagami, natomiast fragmenty poprzedniej recenzji, dotyczące charakterystyki pracy, opisujące jej pozytywną stronę, zostaną jeszcze raz powtórzone.

### **Uzasadnienie podjęcia tematu**

Nawiązując do poprzedniej recenzji, stwierdzam, że warzywa i owoce stanowią ważne składniki w naszej codziennej diecie, ze względu na swe walory odżywcze oraz prozdrowotne. Mogą być spożywane w postaci świeżej, przetworzonej lub jako dodatki do innych przygotowywanych produktów spożywczych. Warzywa i owoce to produkty o wysokiej zawartości wody, dlatego, żeby zachowały swoje walory smakowe, zdrowotne i wygląd, muszą być odpowiednio zabezpieczone podczas długo- i krótkoterminowego przechowywania lub poddane konserwacji. Jedną z metod konserwacji jest suszenie, należące do termicznych metod przetwarzania, polegające na obniżeniu zawartości wody w



suszonym materiale, przy jednoczesnym zahamowanie szkodliwych procesów biochemicznych i chorobowych. W wyniku termicznego oddziaływanie w suszonym materiale roślinnym następują zmiany fizyko-chemiczne i jakościowe, obniżające jego wartość odżywczą.

Jedną z metod badania jakości suszu, w aspekcie oceny uszkodzeń tkanki suszonych materiałów są wskaźniki związane z rehydratacją (stopniem rehydratacji, zmianą masy, objętości próbki). Rehydratacja jest też jednym z procesów przygotowania suszu owocowo-warzywnego do spożycia. Dlatego istotne znaczenie ma poznanie zjawisk i procesów zachodzących w materiale podczas ponownego uwadniania.

Poznanie zjawisk i procesów zachodzących podczas rehydratacji, a wcześniej suszenia, umożliwiają modele matematyczne wyprowadzone na bazie teorii wymiany ciepła, masy i pędu w ciałach stałych oraz praw termodynamiki. Takie modele zostały już opracowane dla procesu suszenia różnych materiałów pochodzenia roślinnego i stały się podstawą do opracowania szczegółowej teorii konwekcyjnego suszenia materiałów roślinnych (np. warzyw, płodów rolnych itp.). W oparciu o takie modele można dokonać identyfikacji zjawisk i procesów oraz zoptymalizować procesy suszenia wybranych materiałów roślinnych, między innymi ze względu na jakość produktu, jak też wykorzystać do podejmowania optymalnych decyzji przy wyborze metody i parametrów suszenia. Podjęte zostały również próby sformułowania modeli teoretycznych procesu rehydratacji w oparciu o prawa nauki, żeby móc zoptymalizować też takie procesy i dobierać optymalne parametry ich prowadzenia, aby uzyskać wysokiej jakości produkt końcowy (np. o odpowiedniej konsystencji, zawartości składników odżywczych, kształcie, barwie itp.).

Rehydratacja jest procesem odwrotnym do suszenia. Zaś proces suszenia jest nieodwracalny, w związku z tym uwadnianie materiału odbywa się poprzez inne stany materiału nawilżanego, które osiąga materiał, zgodnie ze zjawiskiem histerezy. Podczas tego procesu zachodzi nie tylko dostarczanie wody do materiału, ale równocześnie wyługowanie suchej substancji. W celu poznania tego procesu opracowano modele empiryczne, semiempiryczne, które niestety nie dawały możliwości wyjaśnienia i poznania zjawisk zachodzących podczas prowadzenia tego procesu, ale tylko informowały o jego przebiegu w danych warunkach oraz dla danego materiału i dostarczały informacji liczbowych o tym procesie. Podejmowano także próby sformułowania modeli tego procesu, opartych na prawach fizyki. Trudności w przypadku takich modeli polegały na złożoności procesów fizycznych, związanych z absorbowaniem wody i wyługiwaniem suchej substancji z nawilżanego materiału, ze zmianą konsystencji, kształtu itp.. Złożoność tych procesów fizyko-chemicznego stwarzała problemy związane z wyznaczeniem współczynników występujących w równiach tworzących strukturę modelu, takich jak współczynniki dyfuzji masy i ciepła, wnikania ciepła i masy na brzeg obszaru oraz ich zmienności, które decydują o szybkości oraz efektywności procesu rehydratacji.

Dlatego zasadne było podjęcie przez mgr inż. Krzysztofa Kosiorka próby sformułowania matematycznego modelu rehydratacji suszu warzywnego (na przykładzie buraka ćwikłowego), na bazie praw zachowania ciepła, masy i pędu oraz termodynamiki, uwzględniającego transport ciepła, wody i

suchej substancji oraz pędu, a także zidentyfikowanie parametrów procesu oraz modeli empirycznych opisujących współczynniki dyfuzji i wnikania masy, w funkcji parametrów mających istotny wpływ na przebieg procesu rehydratacji suszu, poprzedzonych doświadczalną analizą tego procesu, dla próbek o różnych kształtach i zróżnicowanych warunków jego prowadzenia.

**Zatem, uważam, tak jak to stwierdziłam w poprzedniej recenzji, że temat pracy jest w ogólnym zakresie zgodny z treścią pracy i mieści się w dyscyplinie INŻYNIERIA MECHANICZNA**

### **Ocena formalna pracy**

Stwierdzam ponownie, że rozprawa ta stanowi opracowanie naukowe o charakterze doświadczalno-teoretycznym, dotyczące badań oraz opracowania modelu procesu rehydratacji suszu z buraka ćwikłowego, opisującego zmiany masy, zawartości wody, suchej substancji oraz objętości w czasie procesu oraz temperatury próbki, a także identyfikację modeli empirycznych współczynników dyfuzji masy oraz współczynników wnikania suchej substancji i wody. Praca ma charakter zarówno poznawczy, jak i aplikacyjny.

Poprawiona rozprawa składa się ze 167 stron maszynopisu, zawartych w 8 merytorycznych rozdziałach: *Wstępie* (2 str.), *Przeglądzie literatury* (38 str.), *Celu i zakresie pracy* (3 str.), *Materiałach i metodyce* (21 str.), *Wynikach badań* (76 str.), *Podsumowaniu* (2 str.), *Wnioskach* (1 str.), *Bibliografii* (11 str.), wraz ze *Streszczeniami* w języku polskim i angielskim (2 str.), *Wykazem oznaczeń* (2 str.) oraz oświadczeniami i podziękowaniem (5 str.), *Spisem treści* (2 str.) stroną tytułową (1 str.).

We *Wstępie* mgr inż. Krzysztof Kosiarek wprowadził czytelnika w tematykę przedstawioną w rozprawie. W następnym rozdziale *Przeglądzie literatury*, zgodnie z sugestiami zawartymi w poprzedniej recenzji, logicznie podzielił treść tego rozdziału na podrozdziały. Doktorant najpierw opisał dotychczasowe badania dotyczące kinetyki suszenia materiałów roślinnych, głównie owoców i warzyw, w zależności od wybranej metody i parametrów procesu oraz rodzaju wstępnej obróbki. Jednocześnie przedstawił doniesienia naukowe na temat zmian, które powstają w materiale podczas suszenia (skurcz, zmiana właściwości fizykochemicznych, jakościowych itp.) Odniósł się również do wyników badań procesu suszenia w warunkach nieustalonych (przy zmiennych parametrach) i wpływu na przebieg kinetyki procesu oraz jakość gotowego produktu. Zaprezentowane zostały również wyniki badań odnoszące się do metod suszenia: konwekcyjnego suszenia w warunkach konwekcji naturalnej i wymuszonej oraz w warstwie fluidyzacyjnej oraz procesu suszenia innymi metodami (mikrofalowo próżniowe, liofilizacyjne i inne). W następnych podrozdziałach, zgodnie z tematem pracy, przedstawił wyniki badań nad procesem rehydratacji, uwzględniając publikacje na temat wpływu obróbki wstępnej świeżego materiału przed suszeniem, metody suszenia, temperatury suszenia, temperatury rehydratacji oraz geometrii produktu ogólnie dla suszonych materiałów rolno-spożywczych, żeby w następnym

kroku opisać badania nad suszeniem różnymi metodami i rehydracją suszu z buraka ćwikłowego, w ten sposób uzasadniając podjęcie tematyki badawczej. Przegląd literatury zakończył Doktorant zaprezentowaniem dotychczas stosowanych metod modelowania i opracowanych modeli procesu rehydracji suchych produktów uzyskanych z materiałów roślinnych. Stwierdził, że w literaturze prezentowane są modele głównie empiryczne lub semiempiryczne, opisujące przebieg kinetyki uwadniania i odkształcania próbek materiału oraz wskaźniki rehydracji, służące do ilościowego opisu tego procesu. Następnie dodał, że proces rehydracji był też opisywany modelami opartymi na teorii wymiany ciepła i masy, termodynamiki oraz mechaniki płynów - teorii dyfuzji ciepła i masy, przepływie kapilarnym oraz modele, które opisują odkształcenia zachodzące podczas rehydracji, wynikające z praw mechaniki. Odnosił się również do publikacji opisujących metody elementów skończonych, wykorzystywanych do numerycznego opracowania modeli symulacyjnych procesu suszenia i rehydracji, kończąc rozdział doniesieniami na temat modelowania suszenia i rehydracji buraka ćwikłowego.

Tak przedstawiony przegląd literatury umożliwił Doktorantowi, sformułowanie w kolejnym rozdziale celu i zakresu pracy. W następnych zaś rozdziałach, zgodnie z sugestią zawartą we wcześniejszej recenzji, przedstawił metodykę, rozpoczynając od opracowania modelu procesu rehydracji opartego na teorii wymiany ciepła, masy i pędu oraz sposobu przeprowadzenia obliczeń symulacyjnych (rozwiązania modelu). W dalszej części opisał sposób identyfikacji parametrów modelu: charakterystykę materiału badawczego, jego przygotowanie do badań, metody pomiaru i przebieg badań. Na podstawie analizy, interpretacji i dyskusji wyników badań oraz obliczeń z wykorzystaniem modeli, a także ich weryfikacji i walidacji, Doktorant dokonał podsumowania i sformułował wnioski. Część merytoryczną pracy zakończył rozdziałem, w którym zamieścił spis literatury.

Cytowana w rozprawie literatura obejmuje 303 pozycje: głównie publikacji naukowych, monografii, prac doktorskich i kilku podręczników związanych z tematyką suszenia i rehydracji suszu, dotyczących badań oraz modelowania, a także odniesień do encyklopedii i Roczników statystycznych. Są to opracowania zarówno w języku polskim, jak i angielskim. Doktorant korzystał ze źródeł obejmujących lata: od 60-tych XX wieku po publikacje z 2021 roku.

*Przegląd literatury* został poprawiony zgodnie z moją sugestią i przedstawiony tak, że można uznać, że umożliwił sformułowanie problemu badawczego, a zweryfikowana i opisana *Metodyka badań* stała się logiczna w odniesieniu do realizacji celu pracy i bardziej przejrzysta i czytelna.

### **Ocena merytoryczna**

Na podstawie analizy literatury z zakresu podjętej tematyki w rozprawie doktorskiej, mgr inż. Krzysztof Kosiarek sformułował cel i zakres pracy, który miał odzwierciedlić rozwiązywany problem naukowy. Stwierdził, że niewiele jest publikacji na temat badań i modelowania procesu rehydracji suszu z buraka ćwikłowego, a prezentowane modele to modele empiryczne opracowane na podstawie

danych pomiarowych, które nie dają możliwości poznania i wyjaśnienia zjawisk zachodzących podczas uwadniania suszu z buraka ćwikłowego, a wyniki pomiarów są fragmentaryczne.

Zauważa, że były też formułowane matematyczne modele w oparciu o prawo Ficka dla innych warzyw i owoców, opisujące zmiany zawartości wody oraz ubytki suchej substancji podczas procesu uwadniania suszu, które dawały już możliwość lepszego poznania tego procesu. Ponadto stwierdza, że przedstawione w publikacjach badania nad procesem rehydratacji suszu z owoców i warzyw pokazują, że proces uwadniania zależy od obróbki wstępnej materiału przed suszeniem, metody i temperatury suszenia, temperatury rehydratacji rodzaju oraz ilości cieczy nawadniającej próbki, a także kształtu próbek.

Takie spostrzeżenie mgr inż. Krzysztofa Kosioraka można by uznać za niejawnie sformułowaną hipotezę badawczą.

Bazując na pozyskanej wiedzy Doktorant sformułował problem badawczy w celu pracy.

Celem pracy było „*sformułowanie matematycznego modelu, opartego na teorii wymiany ciepła i masy, opisującego zmiany temperatury, stężenia (koncentracji) wody, stężenia (koncentracji suchej substancji i objętości oraz analiza i procesu rehydratacji suszu z buraków ćwikłowych*”.

Cel ogólny podzielił na cele cząstkowe:

„1. Ustalenie wpływu procesów suszenia (kształt i wielkość suszonej cząstki, metoda suszenia, temperatura i prędkości rehydratacji na przebieg procesu rehydratacji suszu z buraków ćwikłowych.

2. Wyjaśnienie procesu rehydratacji, na bazie teorii wymiany ciepła i masy, dzięki sformułowaniu matematycznego modelu rehydratacji.

3. Identyfikacja charakterystyk materiałowych suszu, charakterystyk procesów suszenia i rehydratacji, i ich wpływu na współczynniki wymiany masy (wnikania masy oraz dyfuzji masy) w procesie rehydratacji suszu z buraka ćwikłowego.”

Pomimo powyższych uwag, uważam, że cel pracy Doktorant przedstawił poprawnie pod względem formalnym, z uwagą, że z pracy wynika, że model zawierał również równanie opisujące odkształcenie materiału, a wynikające z prawa zachowania pędu, jak podał sam Autor w opisie modelu procesu. Zakres pracy obejmował badania, analizy wybranych metod i parametrów procesu suszenia oraz parametrów procesu rehydratacji na parametry i właściwości uwadnianego suszu, opracowanie matematycznego modelu procesu rehydratacji w oparciu o prawa nauki, a także zidentyfikowanie modeli współczynników dyfuzji i wnikania masy, a w efekcie przeprowadzenie obliczeń symulacyjnych z wykorzystaniem modelu za pomocą metody elementów skończonych i dokonanie weryfikacji i walidacji modelu.

Doktorant, cel pracy zrealizował według logicznie zaplanowanych zadań, polegających: na sformułowaniu modelu procesu rehydratacji opartego na teorii wymiany ciepła, masy i pędu, określeniu metody rozwiązania symulacyjnego modelu, na przygotowaniu próbek, przeprowadzeniu badań odpowiadających zakresowi pracy.

Zaplanowane doświadczenia, służące do identyfikacji parametrów modelu i modeli empirycznych współczynników dyfuzji i wnikania wody i suchej substancji, wykonano poprawnie, według ogólnie stosowanej metodyki, zgodnie z obowiązującymi Polskim Normami, w których przedstawione są metody oznaczania zawartości wody, zawartości suchej substancji, gęstości i porowatości owoców i warzyw, a także metody pomiaru takich parametrów jak masa, temperatura i objętości. Ponadto mgr Kosiorek wykonał badania procesu rehydratacji suchych cząstek buraka ćwikłowego o różnym kształcie prostopadłościanu i plastrów o różnej grubości, których wyniki posłużyły do walidacji modelu. Istotność wpływu badanych czynników została potwierdzona analizą statystyczną.

Na podstawie przeprowadzonych badań procesu rehydratacji cząstek suszu z buraka ćwikłowego, o kształcie prostopadłościennych (10x25 mm) cząstek i plastrów o dwóch różnych grubościach (5 i 10 mm), otrzymanych podczas suszenia trzema różnymi metodami: konwekcji naturalnej, wymuszonej i fluidyzacyjnej, w trzech różnych temperaturach wody destylowanej (20, 45, 70 °C), różnych początkowych zawartościach wody (0,007; 0,1; 0,5; 1 i 4 kg H<sub>2</sub>O kg<sup>-1</sup> s.s.), przy trzech różnych stosunkach masy próbki do masy wody i trzech prędkościach liniowych próbek Doktorant stwierdził, że parametry powyższe mają wpływ na zmianę ogólnej masy próbek, masy suchej substancji i zawartości wody, objętości rehydrowanej próbki oraz porowatości. Wpływ tych parametrów jest istotny, co potwierdziła statystyczna analiza wariancji. Również istotny wpływ na zmianę suchej substancji oraz zawartości wody miało mieszanie, czyli nadanie prędkości cząstkom.

Otrzymane wyniki pomiarów zostały zastosowane do walidacji modelu - polegającej na porównaniu pomierzonych wartości z określonymi na podstawie obliczeń symulacyjnych, za pomocą błędów względnych. W ten sposób Doktorant potwierdziła poprawność modelu matematycznego i zidentyfikowanych modeli empirycznych współczynników dyfuzji i współczynników wnikania suchej substancji i wody. Autor podjął się też próby weryfikacji logicznej, odnoszą się ogólnie do praw fizyki, na podstawie których została określona struktura modelu.

Uważam, że przeprowadzone badania, wyniki i ich analiza, interpretacja, a także dyskusja w odniesieniu do danych literaturowych, pozwala na stwierdzenie, że problem badawczy został rozwiązany, a zatem cel ogólny tej rozprawy oraz cele szczegółowe, w pełni zrealizowano w założonym zakresie.

Sformułowane wnioski są zgodne z założonym ogólnym celem i celami cząstkowymi.

Uważam, że niewątpliwym osiągnięciem Doktoranta jest zidentyfikowanie czynników mających istotny wpływ na przebieg procesu rehydratacji: oraz opracowane empirycznych modeli współczynników wnikania i dyfuzji wody oraz suchej substancji dla suszu z buraka ćwikłowego, a także opracowanie matematycznego modelu procesu rehydratacji, uwzględniającego nie tylko zmiany zawartości wody, ale też odkształcenia materiału i ubytki suchej substancji. Przeprowadzone obliczenia symulacyjne i walidacja potwierdziły poprawność tych modeli, które mogą znaleźć zastosowanie w doborze optymalnych metod i parametrów suszenia oraz rehydratacji.

Lektura ponownie recenzowanej poprawionej rozprawy nasuwa jednak pewne pytania i uwagi do opracowania opisującego badania prezentowane w poszczególnych publikacjach.

1. Pominięto w pracy algorytm obliczeń symulacyjnych w oparciu o model procesu rehydratacji, który byłby domknięciem zagadnienia modelowania oraz całego zadania badawczego.
2. Nie opisano też w pracy algorytmu opracowania modeli empirycznych współczynników wnikania i dyfuzji suchej substancji oraz wody w zależności od zadanych parametrów procesu. W jaki sposób wyznaczono ich wartości przed sformułowaniem modeli empirycznych, czy na podstawie liczb kryterialnych podobieństwa?
3. Czy zbiór otrzymanych wyników pomiarów posłużył zarówno do wyznaczenia modeli empirycznych współczynników dyfuzji i wnikania suchej substancji oraz wody, a także walidacji modelu? Czy były to wyniki dwóch różnych eksperymentów doświadczalnych?
4. **Nadal Autor nie przedstawił w jawny sposób wszystkich danych do obliczeń symulacyjnych za pomocą sformułowanych modeli.**
5. Wykresy utworzone na podstawie obliczeń symulacyjnych są nieczytelne i enigmatycznie opisane osie x, y (rysunki 34, 35, 36, 37, 39 oraz tabele 15, 16, 17, 22)
6. Rozdział *Wyniki badań* powinien mieć dodany podrozdział *Dyskusja wyników*. Doktorant taka dyskusję zamieścił w opisie analizy wyników badań. Ta uwaga dotyczy raczej późniejszej publikacji.
7. W spisie literatury znajdują się pozycje nie cytowane w pracy:
  - HERNÁNDEZ J.A., PAVÓN G., GARCÍA M.A., 2000. Analytical solution of mass transfer equation considering shrinkage for modeling food-drying kinetics. *Journal of Food Engineering* 45(1): 1–10 (pozycja w spisie literatury 76),
  - KALETA A., GÓRNICKI K., WINICZENKO R., CHOJNACKA A. 2012. Evaluation of drying models of apple (var. Ligol) dried in fluidized bed dryer. *Energy Conversion and Management* 67: 179–185, (pozycja w spisie literatury 100),

- LUIKOV A.V., 1952. Teorija Tieploprovodnosti. Gosudarstwennoje Izdatielstwo Techniko-Teoreticzeskoj Litieratury, Moskwa. (pozycja w spisie literatury 148),

- LUIKOV A.V., 1968. Analytical Heat Diffusion Theory. Academic Press, New York, (pozycja w spisie literatury 149).

8. W treści cytowane są pozycje literatury, których brak w spisie literatury:

Gulati i Datta, 2015; Kingsley i in., 2007; Markowski, 1994; Halder i in., 2011; Chemkhi i in., 2004; Woźnica, Lenart, 2006.

9. Praca ma pewne niedociągnięcia formalne – językowe.

Uwagi te nie obniżają wartości merytorycznej rozprawy, która w znaczny sposób poszerza wiedzę na temat wpływu czynników, związanych z przygotowaniem suszu, jak i samym procesem uwadniania materiału, a także modelowania procesu rehydratacji suszu z buraków ćwikłowych, umożliwiając poznanie tego procesu, a w przyszłości wykorzystanie do budowy modeli decyzyjnych związanych z termicznym przetwarzaniem materiałów roślinnych.

### **Wniosek końcowy**

Rozprawa doktorska mgr inż. Krzysztofa Jakuba Kosiorka dotyczy naukowego zagadnienia, właściwego dla obszaru nauk technicznych i dyscypliny inżynieria mechaniczna. Doktorant wykazał się wystarczającą wiedzą i umiejętnościami dojrzałego badacza, a uzyskane wyniki badań mają istotne znaczenie poznawcze i aplikacyjne. Uważam, że zamierzony cel został osiągnięty, a rezultaty badań pozwalają na stwierdzenie, że problem naukowy został rozwiązany w sposób oryginalny.

**Uwzględniając powyższe uwagi, oceniam, że rozprawa doktorska mgr inż. Krzysztofa Kosiorka spełnia wymagania *Ustawy o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz stopniach i tytule w zakresie sztuki* (Dz. U. Nr 65z dn. 14 marca 2003 r., poz. 595) i wnoszę do Wysokiej Rady Naukowej Dyscypliny Inżynieria Mechaniczna Szkoły Głównej Gospodarstwa Wiejskiego w Warszawie o przyjęcie oraz dopuszczenie jej do publicznej obron**

Dr hab. inż. Bogusława Łapczyńska-Kordon, prof. UR

