prof. dr hab. inż. Tadeusz Bohdal
Politechnika Koszalińska
Wydział Inżynierii Mechanicznej i Energetyki
Katedra Energetyki
ul. Racławicka 15-17
75-620 Koszalin

Koszalin, 16.01.2025 r.

POLITECHNIKA POZNAŃSKA
WYDZIAŁ INŻYNIERII MECHANICZNEJ
WPŁ. DNIA 23 -01- 2025
Podpis D.Stelmil

R E C E N Z J A

rozprawy doktorskiej mgr. Krzysztofa Gaszka nt.:

„Badanie nad procesem zamrażania żywności (produktów pochodzenia odzwierzęcego) w zamrażarkach płytowych z pośrednim układem chłodzenia"

Opinia została opracowana na zlecenie Dziekana Wydziału Inżynierii Mechanicznej Politechniki Poznańskiej dr hab. inż. Bartosza Gapińskiego profesora Politechniki Poznańskiej – zlecenie z dnia 04.12.2024 r.

Promotorem recenzowanej pracy jest dr hab. inż. Krzysztof Bieńczak - profesor Politechniki Poznańskiej, a rolę promotora pomocniczego pełni dr hab. inż. Leon Bogusławski - profesor Politechniki Poznańskiej.

1. Zawartość rozprawy

Recenzowana rozprawa obejmuje 131 stron i została podzielona na sześć rozdziałów. Dodatkowo podano: streszczenie w języku polskim i angielskim, wykaz ważniejszych oznaczeń i skrótów, bibliografię oraz osiem załączników. W treści rozprawy zawarto:

1. **Wstęp**, gdzie podano informacje o potrzebie doskonalenia metod przechowywania i konserwowania żywności, w tym metod mrożenia różnymi sposobami.
2. **Przegląd literatury,** w którym przedstawiono informacje o obecnie stosowanych metodach zamrażania żywności. Szczególną uwagę zwrócono na efektywne wykorzystanie zamrażarek płytowych w przemyśle, scharakteryzowano czynniki chłodnicze aktualnie używane w układzie pierwotnym oraz opisano właściwości chłodziw stosowanych w układzie pośrednim.
3. **Cel i zakres pracy,** gdzie podano motywację podjęcia tematyki, cel i tezę rozprawy doktorskiej oraz opisano zadania planowane do realizacji.

4. **Opis autorskiego stanowiska laboratoryjnego do badań zamrażarki płytowej** zasilanej mrówczanem potasu. Przedstawiono schemat ideowy i szczegółowy opis pracy tego stanowiska.
5. **Opis prowadzonych badań,** gdzie wskazano sposób wyznaczania rozkładu temperatury na powierzchni płyty mroźniczej, określania podstawowego czasu mrożenia przy założeniu zmiennej grubości wsadu oraz zużycia energii przy wykorzystaniu różnych czynników chłodniczych w procesie mrożenia.
6. **Uproszczony model matematyczny przebiegu procesu zamrażania** przy założeniu nieustalonego przewodzenia ciepła w płaskiej płycie o zdefiniowanej grubości i nieskończonych wymiarach odnośnie długości i szerokości. Podano przykład obliczeniowy dla mrożenia skwarki wieprzowej.
7. **Wyniki badań eksperymentalnych zużycia energii** w procesie zamrażania przy użyciu różnych czynników chłodniczych. Badania przeprowadzono przy zastosowaniu dwóch czynników chłodniczych R449A i R455A.
8. **Wnioski**, gdzie wyeksponowano główne osiągnięcia Autora w zakresie tematu rozprawy.
9. **Kierunki dalszych badań,** gdzie stwierdzono, że istnieje dalsza potrzeba oraz możliwość prowadzenia prac dotyczących funkcjonowania zamrażarek płytowych z pośrednim układem chłodzenia.
10. **Bibliografia**, która obejmuje 66 pozycji literaturowych krajowych i zagranicznych.

2. Cel, teza i zakres pracy

Doktorant w rozdziale drugim podał cel, tezę i zadania do realizacji. Jako cel przyjął opracowanie praktycznych procedur obliczeniowych procesu zamrażania produktów spożywczych w zamrażarkach płytowych z pośrednim układem chłodzenia płyt zamrażalniczych, a w szczególności opracowanie metod obliczeniowych wyznaczania czasu zamrażania w zamrażarce płytowej dla dowolnych jej wymiarów oraz ocenę wpływu zmiany czynnika chłodniczego na pracę układu chłodniczego. Tezę swojej pracy sformułował następująco: „*Istnieje możliwość oszacowania czasu mrożenia wsadu przy wykorzystaniu prostych procedur obliczeniowych i oceny wpływu zmiany czynnika chłodniczego w agregacie sprężarkowym na efektywność energetyczną*". Mając na uwadze udowodnienie powyższej tezy Doktorant zaplanował następujące zadania do realizacji: 1 - zaprojektowanie i wykonanie stanowiska badawczego składającego się z agregatu chłodniczego, modułu hydraulicznego oraz odbiornika „chłodu", 2 - opracowanie teoretycznego modelu jednowymiarowego nieustalonego przewodzenia ciepła wewnątrz zamrażarki płytowej, 3 - walidację opracowanego modelu na podstawie wyników badań eksperymentalnych przeprowadzonych na specjalnie wykonanym stanowisku badawczym, odzwierciedlającym najbardziej powszechne w użyciu zamrażarki płytowe. Poprzez realizację wyżej wymienionego zakresu prac Doktorant zrealizował cele swojej rozprawy doktorskiej oraz uzasadnił postawioną tezę.

3. Rozwinięcie celu, tezy i zakresu pracy

Przedstawiona do oceny rozprawa doktorska dotyczy opracowania praktycznych procedur obliczeniowych procesu zamrażania produktów spożywczych w zamrażarkach płytowych z pośrednim układem chłodzenia płyt zamrażalniczych. Doktorant zaplanował opracowanie

metod obliczeniowych wyznaczania czasu zamrażania w zamrażarce płytowej dla dowolnych jej wymiarów oraz przeprowadzenie oceny wpływu zmiany czynnika chłodniczego na pracę układu chłodniczego. Prowadząc swoje rozważania zwrócił nie tylko uwagę na potrzebę wzrostu efektywności pracy tych urządzeń, ale także na ograniczenie szkodliwego wpływu na otaczające środowisko. Wynika to z potrzeb ekologicznych oraz z coraz bardziej restrykcyjnych przepisów prawnych, które wprowadzają znaczne ograniczenia w tym zakresie. Mając powyższe na uwadze zaproponował stosowanie proekologicznych czynników chłodniczych oraz ograniczenie ich ilości w instalacji poprzez zastosowania czynników pośrednich, tak zwanych chłodziw w postaci roztworów solankowych.

We wstępie rozprawy Doktorant zwrócił uwagę na potrzebę doskonalenia i zwiększenia zakresu stosowania różnych metod konserwowania żywności. Wynika to z faktu, że jak podaje Komisja do spraw Wyżywienia i Rolnictwa przy Organizacji Narodów Zjednoczonych (FAO) liczba marnotrawionej żywności sięga jednej trzeciej całej rocznej globalnej produkcji. Takie marnotrawstwo jest niedopuszczalne, ponieważ równocześnie na całym świecie ponad 800 mln ludzi nie ma co jeść i cierpi głód. Jedną z efektywnych metod konserwowania żywności jest jej mrożenie, w tym z wykorzystaniem zamrażarek pływowych.

W rozdziale pierwszym rozprawy Doktorant dokonał przeglądu literatury dotyczącej tematu pracy. Przedstawił informacje o obecnie stosowanych zamrażarkach pływowych. Zwrócił uwagę na zastosowania zamrażarek płytowych w przemyśle, możliwość modernizacji tych urządzeń oraz perspektywy rozwoju mając na uwadze sposób ich zasilania oraz charakterystykę pracy układu chłodniczego. Przegląd literatury obejmuje również analizę procesu mrożenia produktów spożywczych, w tym ryb, krewetek itp. Autorzy publikacji akcentują fakt pojawienia się ukrytego ciepła krzepnięcia wody podczas procesu mrożenia, które objawia się oddawaniem ciepła bez zmiany temperatury wewnątrz produktu. Podczas procesu mrożenia zachodzi zjawisko magazynowania energii w tworzonych kryształkach lodu. Występuje też zależności pomiędzy szybkością procesu mrożenia a wielkością kryształów lodu. Ze wzrostem tempa mrożenia kryształy te stają się mniejsze. Doktorant podał również informacje o czynnikach chłodniczych, w tym stawiane wymagania pod względem ochrony środowiska. Przedstawił charakterystykę wybranych naturalnych i syntetycznych czynników. Określił współczynniki ujmujące ich negatywny wpływ na środowisko naturalne, wskazał sposoby zwiększenia efektywności pracy instalacji oraz zagwarantowania bezpieczeństwa użytkowania. Podał informacje o własnościach proponowanych do stosowania w zamrażarkach płytowych czynnikach chłodniczych: R404A, R455A, R449A oraz zaproponował chłodziwa do stosowania w układach pośrednich.

Na podstawie wniosków z przeglądu dostępnej literatury Doktorant określił cel i zakres swojej pracy oraz podał jej tezę. Cel pracy wynikał z potrzeby przyśpieszenie zamrażania wybranych produktów spożywczych w formach wygodnych dla dalszego przechowywania i wtórnej obróbki. Ponadto w zamrażarkach pływowych brak powietrza między powierzchnią mroźniczą a produktem, prowadzi do znacznej intensyfikacji tegoż procesu względem konwencjonalnych metod owiewowych. Tezę i zakres pracy opisano szczegółowo w rozdziale drugim niniejszej opinii.

Mając na uwadze udowodnienie postawionej tezy Autor opracował konstrukcję i wykonał laboratoryjne stanowisko do badań eksperymentalnych procesu zamrażania produktów spożywczych w zamrażarce płytowej. Była to zamrażarka płytowa z pionowym położeniem płyt (tak zwana zasypowa). Na potrzeby projektowania stanowiska badawczego wykonano obliczenia bilansowe niezbędne do określenia mocy cieplnych poszczególnych elementów. Zgodnie z założeniami pracy, dedykowane stanowisko przygotowane zostało do przetwarzania produktów pochodzenia odzwierzęcego. W tym celu na potrzeby bilansu energii przyjęto dane dotyczące właściwości mięsa wieprzowego. Prawidłowo podzielono proces zamrażania

produktów spożywczych na trzy etapy: proces chłodzenia, proces zamrażania właściwego i proces domrożenia.

Stanowisko badawcze zawierało trzy główne zespoły w postaci: agregatu chłodniczego niskotemperaturowego z wymiennikiem ciepła na czynnik chłodniczy/roztwór soli, modułu hydraulicznego odpowiedzialnego za dystrybuowanie cieczy pomiędzy wymiennikiem ciepła a zamrażarką płytową oraz zamrażarki płytowej dostosowanej do współpracy z roztworem soli (mrówczan potasu) jako chłodziwem. Ciepło odpadowe powstałe w procesie skraplania, zostało zagospodarowane za pomocą płytowego wymiennika do ogrzewania zbiornika akumulującego ciepło dedykowane do procesu rozmrażania płyt. Opisano też metodykę badawczą, aparaturę pomiarową, rozmieszczenie czujników pomiarowych itp. Nie wnosi się zastrzeżeń w tym zakresie.

Na stanowisku badawczym zrealizowano trzy cykle badawcze, podczas których mierzono rozkłady temperatury na powierzchni płyty mroźniczej, wyznaczano podstawowy czas mrożenia towaru w zamrażarce płytowej przy założeniu zmiennej grubości wsadu, określano wielkość zużycia energii dla różnych czynników chłodniczych. Niezrozumiałym jest dlaczego do celów testowania stanowiska badawczego użyto jako wsadu płyty gipsowo - kartonowej o własnościach fizycznych diametralnie innych od własności produktów pochodzenia zwierzęcego (o wartościach kilkukrotnie niższych). Uzyskane wyniki badań wykorzystano do weryfikacji opracowanego modelu teoretycznego procesu mrożenia.

W rozdziale 4.2.1. przedstawiono uproszczony model matematyczny przebiegu procesu zamrażania wsadu w zamrażarce płytowej. W założeniach do modelu matematycznego przyjęto nieustalone przewodzenie ciepła w płaskiej płycie o zdefiniowanej grubości i nieskończonych wymiarach odnośnie długości i szerokości. Oznacza to, że przestrzeń roboczą zamrażarki płytowej wypełnionej wsadem można uznać w przybliżeniu za chłodzoną płytę opisaną modelem jednowymiarowym. Zaprezentowany model obliczeniowy jest bardzo uproszczony, oparty na równaniu różniczkowym (27), które opisuje nieustalone przewodzenie ciepła poprzez płaską płytę. Niezrozumiałym jest dlaczego Autor cały proces zamrażania postanowił rozpatrywać jednocześnie, chociaż w inżynierskim przykładzie obliczeniowym podanym w rozdziale 3.2 swojej rozprawy, prawidłowo podzielił proces zmrażania produktów spożywczych na trzy etapy: etap 1 - proces chłodzenia, etap 2 - proces zamrażania właściwego i etap 3 - proces domrożenia. Zaproponowane równanie zachowania energii – uproszczone równanie Kirchhoffa-Fouriera (wzór 27) ujmuje tylko proces nieustalonego przewodzenia ciepła (i jest prawidłowe dla etapów 1 i 3). Dla etapu 2 równanie (27) należy uzupełnić o człon związany z wewnętrznymi ujemnymi źródłami ciepła, które stanowią powstające kryształki tworzącego się lodu z wody w produkcie spożywczym. Jako rozwiązanie swojego modelu Doktorant podał *„nie wchodząc w szczegóły procedur matematycznych"* równanie (28), które wykorzystał do przeprowadzenia obliczeń z zastosowaniem dwóch wersji nomogramu Heislera. Należy zauważyć, że Doktorant nie uwzględnia zmiany własności fizycznych produktów przed i po ich zamrożeniu. Na stronie 83 przedstawił swoje założenia zakładając ich stałą wartość dla procesu mrożenia. Nie podał jednak jakiej temperatury produktów one dotyczą. A przecież zmianie temperatury produktu spożywczego (przed i po zamrożeniu) towarzyszą duże różnice wartości własności fizycznych (w tym również współczynnika wyrównywania temperatury a). W celu walidacji zaproponowanego modelu obliczeniowego przeprowadzono obliczenia teoretyczne (według tego modelu) i badania eksperymentalne cyklu mrożenia skwarki wieprzowej na stanowisku badawczym. Stwierdzono, że uzyskane wyniki posiadają zbliżone wartości czasu zamrażania. Wynika to z faktu, że do badań wybrano skwarkę wieprzową o małej zawartości wody (poniżej 20%). W przypadku produktów mięsnych (o zawartości wody ponad 70%) zapewne tak dużej zgodności by nie było.

W rozdziale 4.3 1. przedstawiono wyniki badań eksperymentalnych zużycia energii w procesie zamrażania przy użyciu różnych czynników chłodniczych. Badania przeprowadzono przy zastosowaniu dwóch czynników chłodniczych R449A i R455A. Określono wartości współczynników wydajności urządzenia chłodniczego, czasy osiągnięcia temperatury głębokiego mrożenia, wartości zużytej energii elektrycznej itp. Stwierdzono, że opracowany model pracy instalacji chłodniczej zamrażarki płytowej poprawnie opisuje zachodzące w niej procesy i może być wykorzystany do analizy dla innych czynników chłodniczych możliwych do stosowania w agregatach chłodniczych.

W rozdziale piątym podsumowano uzyskane wyniki badań oraz podano wnioski. Stwierdzono, iż opracowany model teoretyczny mający za zadanie określenie czasu mrożenia wsadu zamrażarki płytowej zależnie od grubości płyty mroźniczej, w odniesieniu do skwarki wieprzowej jest poprawny, zastosowanie czynnika chłodniczego R455A do zastosowań niskotemperaturowych, w agregacie chłodniczym przewidzianym do pracy z czynnikami chłodniczymi z grupy HFC oraz czynnikiem R449A nie stwarza problemów eksploatacyjnych, ponadto wdrożenie do powszechnego użytku zamrażarki płytowej z pośrednim układem chłodzenia, poprzez zmniejszenie ilości czynnika chłodniczego w obiegu, pozwoli na zminimalizowanie emisji substancji szkodliwych do atmosfery.

W rozdziale szóstym przedstawiono kierunki dalszych badań wskazując, że istnieje dalsza potrzeba oraz możliwość prowadzenia prac dotyczących funkcjonowania zamrażarek płytowych z pośrednim układem chłodzenia.

Na podkreślenie zasługuje to, że Autor zastosował w swojej pracy adekwatne do potrzeb narzędzia formalne dotyczące metod badań eksperymentalnych, opracowania i prezentacji wyników, a także doboru aparatury badawczej, które w pełni odpowiadającą założonym celom badań doświadczalnych. Wykazał się dobrym opanowaniem warsztatu badawczego. Przedstawiony program badań jest prawidłowy. Pewne wątpliwości może budzić zastosowanie do celów testowania stanowiska badawczego wsadu z płyty gipsowo - kartonowej o własnościach fizycznych diametralnie innych od własności produktów pochodzenia zwierzęcego (o wartościach kilkukrotnie niższych). Również opracowany model teoretyczny jest bardzo uproszczony, co powoduje, że może on być wykorzystywany w opisie procesu mrożenia produktów o małej zawartości wody. Układ pracy oceniam jako właściwy, a zastosowane metody badawcze w postaci wykorzystania badań eksperymentalnych i procedur obliczeniowych są adekwatne do rozwiązywanych problemów.

4. Oryginalność i wartości poznawcze pracy

Cel i zakres rozprawy doktorskiej wynikają z potrzeby prowadzenia badań naukowych o charakterze poznawczym i stosowanym. Pomimo prowadzenia od wielu lat prac dotyczących zamrażania żywności istnieje ciągła potrzeba rozwijania i doskonalenia różnych metod realizacji tego procesu. Dotyczy to również zamrażania produktów pochodzenia zwierzęcego. Wynika to z potrzeb technologicznych, jak i doskonalenia konstrukcji urządzeń chłodniczych. Istnieje konieczność zwiększania efektywności pracy tych urządzeń i ograniczenia szkodliwego wpływu na otaczające środowisko. Coraz bardziej restrykcyjne przepisy prawne wprowadzają znaczne ograniczenia w tym zakresie. Mając powyższe na uwadze Doktorant zaproponował stosowanie w instalacji proekologicznych czynników chłodniczych oraz ograniczenie ich ilości poprzez zastosowanie czynników pośrednich, tak zwanych chłodziw w postaci roztworów solankowych. Dlatego podjęta tematyka pracy, jej cel i zakres są bardzo aktualne i potrzebne, zarówno pod względem naukowym, jak i aplikacyjnym.

Należy podkreślić oryginalność wyboru tematyki rozprawy doktorskiej. Doskonalenie procesu zamrażania produktów pochodzenia zwierzęcego jest ciągle wskazane zarówno pod względem technologicznym jak i zmniejszenia energochłonności tego procesu. Ponadto od wielu lat wzrasta zapotrzebowanie na stosowanie nowych rozwiązań technicznych przyjaznych dla środowiska i użytkownika. W szczególności dotyczy to urządzeń, w których realizuje się lewobieżne obiegi termodynamiczne. Występują tutaj problemy związane z wykorzystaniem czynników roboczych i sprawnością ogólną tych urządzeń. Dlatego podjęcie przez Doktoranta prac w tym zakresie należy uznać za słuszne i jak najbardziej wskazane.

Do oryginalnych osiągnięć Doktoranta należy zaliczyć:

- **dokonanie analizy stanu wiedzy** w zakresie charakterystyki obecnie stosowanych zamrażarek płytowych, czynników chłodniczych, współczynników ujmujących ich negatywny wpływ na środowisko naturalne itp. Doktorant podał informacje o własnościach proponowanych do stosowania w zamrażarkach płytowych czynnikach chłodniczych: R404A, R455A, R449A oraz zaproponował chłodziwa do stosowania w układach pośrednich.
- **opracowanie i wdrożenie w 2022 roku patentu zamrażarki płytowej z pośrednim układem mrożenia**, gdzie jako medium w układzie pośrednim zaproponowano użycie soli potasowej o handlowej nazwie mrówczan potasu (współtwórca).
- **opracowanie koncepcji i budowa autorskiego stanowiska badawczego**, z wykorzystaniem własnego patentu zamrażarki płytowej z pośrednim układem mrożenia. Stanowisko umożliwiło przeprowadzenie badań zamrażania różnego rodzaju wsadu w zamrażarce płytowej z czynnikiem pośredniczącym.
- **przeprowadzenie systematycznych badań eksperymentalnych** dotyczących zużycia energii w procesie zamrażania przy użyciu dwóch różnych czynników chłodniczych: R449A i R455A. Uzyskane wyniki badań pozwoliły na określenie wartości współczynników wydajności urządzenia chłodniczego, czasów osiągnięcia temperatury głębokiego mrożenia, wartości zużytej energii elektrycznej itp.
- **zaproponowanie bardzo uproszczonego modelu matematycznego przebiegu procesu zamrażania wsadu w zamrażarce płytowej**. Poprzez przyjęte zbyt duże uproszczenia, które traktują zamrażanie jako proces nieustalonego przewodzenia ciepła (bez uwzględnienia wewnętrznych ujemnych źródeł ciepła podczas procesu zamarzania wody) zaproponowany model ma ograniczony zakres zastosowania do wsadu z małą zawartością wody.
- **wykazanie, że możliwe jest zastosowanie alternatywnych czynników chłodniczych** w istniejącym układzie chłodniczym bez dokonywania wymiany jego komponentów. Ponadto, że istnieje możliwość zastosowania przyjaznych środowisku i użytkownikom czynników chłodniczych R449A i R455A dla powszechnie stosowanych składowych układu chłodniczego zamrażarek płytowych.
- **zaproponowanie konstrukcji zamrażarki płytowej z pośrednim układem chłodzenia**, co pozwala na zmniejszenie ilości czynnika chłodniczego w obiegu, a przez to zminimalizowanie emisji substancji szkodliwych do atmosfery.

Reasumując Doktorant, zgodnie z postawioną tezą pracy wykazał, że istnieje możliwość zastosowania oszacowania czasu mrożenia wsadu (o małej zawartości wody) przy wykorzystaniu prostych procedur obliczeniowych i oceny wpływu zmiany czynnika chłodniczego w agregacie sprężarkowym na efektywność energetyczną instalacji chłodniczej.

Wyniki przeprowadzonych analiz i przedstawione wnioski przyczyniają się znacznie do wzrostu stanu wiedzy w zakresie realizowanego tematu.

5. Wartości użytkowe pracy

Prezentowana rozprawa doktorska ma duże znaczenie aplikacyjne. Dotyczy bowiem zamrażania, jednego z podstawowych sposobów konserwowania żywności. Mając na uwadze potrzebę przyśpieszenia zamrażania wybranych produktów spożywczych w formach wygodnych dla dalszego przechowywania i wtórnej obróbki Doktorant zaproponował stosowanie zamrażarek płytowych z czynnikiem pośredniczącym w postaci mrówczanu potasu. Postawiony problem analizował od strony technologicznej procesu zamrażania jak i rozwiązań konstrukcyjnych maszyn i urządzeń instalacji chłodniczej. Zwrócił uwagę na konieczność poprawy efektywności wykorzystania systemów chłodniczych, w tym zastosowania nowych proekologicznych czynników roboczych, wzrostu efektywności energetycznej układu i zapewnienia mniejszego zużycia energii napędowej. Działania te w efekcie powodują pozytywne skutki ekologiczne w postaci zmniejszenia śladu węglowego. Ponadto zastosowanie chłodzenia pośredniego zmniejsza ilość czynnika chłodniczego w instalacji i ogranicza skutki ewentualnych awarii związanych z wyciekiem tego czynnika do atmosfery. Opracowane przy udziale Autora rozprawy, nowe rozwiązanie zamrażarki płytowej z pośrednim układem mrożenia, zostało opatentowane i wdrożone do stosowania w 2022 roku. Należy to uznać za duży sukces Doktoranta.

Cenne są również podane w rozprawie uwagi w zakresie eksploatacji instalacji chłodniczych. W tym, że zastosowanie czynników chłodniczych R455A I R449A w układach niskotemperaturowych w agregacie chłodniczym przewidzianym do pracy z czynnikami chłodniczymi z grupy HFC nie stwarza problemów eksploatacyjnych. Układ pracuje stabilnie, nie powodując problemów eksploatacyjnych, charakteryzując się absolutną bezobsługowością. Ponadto, że wskaźniki efektywności energetycznej oraz czasu głębokiego mrożenia produktów dla czynników R449A i R455A pozostają zbieżne, co w kontekście GWP na poziomie 149 premiuje je dla zastosowań niskotemperaturowych. Istotnymi są również spostrzeżenia dotyczące wykorzystania energii odpadowej w skraplaczu oraz sposobu podłączenia węży zasilających płyty mrożące chłodziwem.

Rezultaty prac Doktoranta znajdą zapewne zastosowanie w małym i średnim chłodnictwie. Prezentowana rozprawa doktorska jest istotnym wkładem do poszukiwania nowatorskich rozwiązań w zakresie rozwoju niskotemperaturowej energetyki. Oznacza to, że zaprezentowana rozprawa doktorska w pełni spełnia wymagania stawiane aplikacyjności prowadzonych badań naukowych.

6. Uwagi krytyczne i dyskusyjne

Uwagi o charakterze merytorycznym

1. W pracy na stronie 31 podano informacje dotyczące najbardziej rozpowszechnionych chłodziw w układach pośrednich. W przypadku płynów z grupy Ergolit użyto określenia, że są to płyny niezamarzające. Takie stwierdzenie nie jest poprawne. Każdą substancję można zestalić. Są to płyny niskokrzepnące, dla których temperatura krzepnięcia w zależności od odmiany wynosi od -35 do – 15 °C.
2. Na stronie 33, 7 wiersz od góry, użyto pojęcia „lepsza lepkość dynamiczna". Należy podać co oznacza to stwierdzenie.
3. Na str. 35, 6 wiersz od góry napisano, że opracowując jednowymiarowy model nieustalonego przewodzenia ciepła wewnątrz zamrażarki płytowej przyjęto stałe właściwości fizyczne (nie podano czego) ze względu na brak informacji literaturowych o ich zmienno-

ści w funkcji czasu. Taki zapis jest niezrozumiały. Jeżeli chodzi o produkty spożywcze, to ich własności fizyczne w krótkim okresie czasu są stałe i praktycznie nie zależą od czasu. Natomiast podczas zamrażania produktów spożywczych ich własności zmieniają się wraz ze zmianą temperatury i to znacznie. Wartości własności fizycznych produktów spożywczych w różnych temperaturach można znaleźć w dostępnej literaturze. Prowadząc obliczenia dla procesu zamrażania żywności należy koniecznie uwzględniać takie zależności.

4. W rozdziale 3.2 podano obliczenia bilansowe będące podstawą do projektowania stanowiska badawczego. Prawidłowo podzielono proces zamrażania produktów spożywczych na trzy etapy: proces chłodzenia, proces zamrażania właściwego i proces domrożenia. Jednak prowadząc obliczenia dla procesów chłodzenia i zamrażania przyjęto dla każdego procesu stałą wartość ciepła właściwego, chociaż jest ono funkcją temperatury produktu. Bardziej poprawnym jest stosowanie różnicy entalpii produktu określonej dla początku i końca procesu. Takie postępowanie uwzględnia zmianę wartości ciepła właściwego wraz ze zmianą temperatury produktu.

5. Na rys. 4.2 ÷ 4.4 podano rozkłady temperatury na różnych poziomach płyty mrożniczej z wsadem. Z czego wynikają tak znaczne różnice temperatury dla środkowego poziomu? Czy ma to uzasadnienie fizyczne lub czy jest to wynikiem błędu pomiaru?

6. Na stronie 70 podano, ze badania podstawowego czasu mrożenia przy założeniu zmiennej grubości wsadu przeprowadzono przy użyciu jako wsadu płyty gipsowo-kartonowej. Jak należy tłumaczyć, że do celów testowania stanowiska badawczego użyto jako wsadu płyty gipsowo - kartonowej o własnościach fizycznych diametralnie innych od własności produktów pochodzenia zwierzęcego (o wartościach kilkukrotnie niższych). Ponadto płyta gipsowo-kartonowa praktycznie pozbawiona jest wody, co powoduje, że nie występuje tutaj podczas mrożenia strefa mrożenia właściwego (dla produktów z dużą zawartością wody).

7. W przestawionych wzorach na stronie 78 kilkukrotnie wzajemnie zamieniono dwa współczynniki (według wykazu oznaczeń): k – współczynnik przewodzenia ciepła i U – współczynnik przenikania ciepła. We wzorach (24) ÷ (26) powinien występować współczynnik k, który odpowiada za przewodzenie ciepła (prawo Fouriera). W proponowanym modelu nie powinno uwzględniać się przenikania ciepła, które dotyczy wymiany ciepła pomiędzy dwoma płynami przez przegrodę materialną. Również na stronach 82, 83 i 84 występuje współczynnik U, a ma być k.

8. Podobny błąd jest w podanym na stronie 78, 1 wiersz od dołu, warunku brzegowym trzeciego rodzaju, który porównuje ze sobą gęstość strumienia ciepła na brzegu płyty wyznaczonego z prawa Fouriera i prawa Newtona. We wzorze Fouriera powinien być współczynnik k a nie U.

9. Podany wzór (27) przedstawia równanie różniczkowe opisujące nieustalone przewodzenie ciepła w płycie płaskiej. Może być one wykorzystane do opisu schładzania i domrożenia produktów spożywczych, gdzie nie występuje przemiana fazowa krzepnięcia wody zawartej w tych produktach. Dlaczego Doktorant pominął w swoich rozważaniach wymianę ciepła w strefie zamrażania właściwego, gdzie następuje proces powstawania kryształków lodu? Problem ten opisano szczegółowo na stronie 4 niniejszej opinii.

10. Należy również zauważyć, że przy zamrażaniu kontaktowym wymiana ciepła pomiędzy wsadem a płytą mroźniczą odbywa się przez styk. W takim przypadku obowiązuje warunek brzegowy czwartego rodzaju. Można dokonać zamiany warunku brzegowego czwartego rodzaju na warunek brzegowy trzeciego rodzaju, jednak należy wtedy podać jak wy-

znaczono wartość zastępczego współczynnika przejmowania ciepła *h*. Jednak w rozprawie tego nie ma.

11. Na stronie 79 podano rozwiązanie zaproponowanego modelu wymiany ciepła w postaci zależności (28). Istnieje pytanie w jaki sposób ją uzyskano? Brak jest również opisu co oznaczają poszczególne wielkości we wzorze: *A*, *B* oraz μ.
12. Na stronie 84 przedstawiono walidację opracowanego modelu na podstawie testu mrożenia skwarki wieprzowej. Przyjęto stałe właściwości fizyko - chemiczne dla wsadu w postaci skóry wieprzowej. Nie podano dla jakiej temperatury przyjęto te wartości, początkowej czy końcowej procesu zamrażania. A przecież dla przyjętej dużej różnicy temperatur (30 K) wartości te są znacznie inne w temperaturach: +10 °C i -20 °C.
13. Na rys. 4.20 i 4.25 podano wykresy przedstawiające zmiany temperatury wewnątrz bloku mroźniczego i zużytej energii w funkcji czasu. Nie podano jednak jaki materiał wykorzystano jako wsad do zamrażarki płytowej.
14. Na stronach 100 i 109 użyto pojęcia „*Zużyta energia elektryczna dla wymrażania chłodziwa*". Co to oznacza?

Uwagi edytorskie

- ogólne

Należy podkreślić dobry poziom przygotowania rozprawy doktorskiej pod względem edytorskim. Zwraca uwagę dobra jakość rysunków, formatowania, styl tablic i wzorów. Jednak pomimo starannego sprawdzenia tekstu Autor nie ustrzegł się kilku błędów:

- szczegółowe

1. Na str. 6, 4 wiersz od dołu napisano „*...w którym role chłodziwa odgrywa sól potasowa.*", powinno być „*...w którym rolę chłodziwa odgrywa sól potasowa.*"
2. Na str. 8, 10 wiersz od góry jest „*....procesu mrożenia wewnątrz z celi mroźniczej.*", powinno być „*...procesu mrożenia wewnątrz celi mroźniczej.*".
3. Na str. 9, 6 wiersz od dołu napisano „*[mm2/s]*", powinno być „*[mm^2/s]*".
4. Na str. 12, 12 wiersz od dołu „*....długotrwałe przechowywanie żywności.*", powinno być „*....długotrwałemu przechowywaniu żywności.*".
5. Na str. 28, 6 wiersz od góry napisano „*...z grupy czynników naturalnych takiej jak CO2 lub NH3 czy,...*", powinno być „*..z grupy czynników naturalnych takich jak CO_2 lub NH_3 czy ..*".
6. Na str. 39, 10 wiersz od dołu jest „*...zasilane poprzez instalację amoniakalne najczęściej należą...*", powinno być „*...zasilane poprzez instalacje amoniakalne najczęściej należą...*".
7. Na str. 55, 1 wiersz od góry jest „*...pojemność całkowita nacyznia...*", powinno być „*...pojemność całkowita naczynia...*".
8. Na str. 63, 3 wiersz od góry jest „*...badanie rozkładu temperaturowego na powierzchni...*", powinno być „*...badanie rozkładu temperatury na powierzchni...*".
9. Na str. 69, 10 wiersz od dołu jest „*...różnica temperatury wary parowniku...*", powinno być „*...różnica temperatury pary w parowniku...*".

10. Na str. 114, 3 wiersz od dołu jest „...*pozwala na maksymalną ergonomie pracy obsługi*...", powinno być „...*pozwala na maksymalną ergonomię pracy obsługi*...".

7. Uwagi końcowe

Prezentowana rozprawa doktorska napisana jest zwięźle, rzeczowo i w sposób zrozumiały. Jednak w niektórych fragmentach występują pomyłki, szczególnie w opisie zaproponowanego modelu teoretycznego. Należy również dodać, że poprzez przyjęte zbyt duże uproszczenia, które traktują zamrażanie jako proces nieustalonego przewodzenia ciepła (bez uwzględnienia wewnętrznych ujemnych źródeł ciepła podczas procesu zamarzania wody) zaproponowany model ma ograniczony zakres zastosowania do wsadu z małą zawartością wody. Tylko w takich przypadkach, w miarę dokładnie, opisuje on proces zamrażania żywności, na co wskazują obliczenia teoretyczne i wyniki badań eksperymentalnych.

8. Wniosek do Rady Dyscypliny Naukowej Inżynierii Mechanicznej Politechniki Poznańskiej

Przedstawiona do oceny rozprawa doktorska jest wartościową pracą naukową. Doktorant wykazał się umiejętnością formułowania problemów badawczych i rozwiązywania ich przy użyciu właściwych metod naukowych. Wykazał także umiejętności wykorzystania istniejącej wiedzy z zakresu techniki cieplnej i chłodniczej w prowadzeniu analiz teoretycznych, obliczeń teoretycznych, badań eksperymentalnych i opracowania uzyskanych wyników. Obok znacznego poziomu naukowego rozprawy, należy podkreślić duży stopień jej aplikacyjności. **Wnioskuję o przyjęcie pracy mgr inż. Krzysztofa Gaszka, jako rozprawy doktorskiej** odpowiadającej warunkom określonym w Ustawie z dnia 20 lipca 2018 roku – Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (j.t. Dz.U. z 2022 r., poz. 574) i **o dopuszczenie jej do publicznej obrony**. Praca ta stanowi znaczące osiągnięcie Autora i jest istotnym wkładem do poszukiwania nowatorskich rozwiązań w zakresie zwiększenia efektywności energetycznej urządzeń chłodniczych. Uzyskane wyniki przeprowadzonych analiz i badań eksperymentalnych przyczynią się do wzrostu stanu wiedzy w zakresie szeroko pojętej energetyki niskotemperaturowej.