

Lublin, 24.05.2023 r.

Dr hab. inż. **Katarzyna Kozłowicz**, prof. UP  
Katedra Biologicznych Podstaw Technologii Żywności i Pasz  
Wydział Inżynierii Produkcji  
Uniwersytet Przyrodniczy w Lublinie

### **Recenzja**

Rozprawy doktorskiej Pana mgr inż. Tomasza BERNATA

pt. „Badanie wybranych układów chłodniczych mebli gastronomicznych przyjaznych dla środowiska i użytkownika”,  
w dziedzinie: nauki inżyniersko-techniczne, w dyscyplinie: inżynieria lądowa, geodezja i transport

wykonanej pod kierunkiem:

**Promotor:** dr hab. inż. Krzysztof Bieńczak, prof. Politechniki Poznańskiej

**Promotor pomocniczy:** dr inż. Natalia Idaszewska

**Podstawa prawna:** Ustawa *Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce* z dn. 20 lipca 2018 r. (Dz.U. z 2018 r. poz. 1668, z późn. zm.)

**Podstawa opinii:** Uchwała Rady Dyscypliny Inżynieria Lądowa, Geodezja i Transport Politechniki Poznańskiej z dnia 28.03.2023 r. oraz pismo Przewodniczącego Rady Dyscypliny Inżynieria Lądowa, Geodezja i Transport prof. dr hab. inż. Jacka Pielecha z dnia 30.03.2023 r. (DR-63/625/2/2023)

### **Informacje ogólne - uzasadnienie podjęcia tematyki badawczej**

Obecnie powszechnie wykorzystywane w urządzeniach chłodniczych czynniki chłodnicze (R134a, R404a) zostały wprowadzone jako zamienniki chlorowcopochodnych. Jednak ze względu na regulacje prawne związane z ochroną środowiska są sukcesywnie wycofywane z użytkowania. Koncerny chemiczne zajmujące się produkcją czynników chemicznych szukają nowych zamienników, które byłyby idealnym rozwiązaniem dla małych i średnich urządzeń chłodniczych, w pełni pokrywających zapotrzebowanie wydajności chłodniczej w supermarketach, gastronomii, sklepach spożywczych, zakładach przetwórstwa żywności czy chłodniach, przy uwzględnieniu ograniczenia zapotrzebowania na energię, obniżenie związanych z tym kosztów oraz wydłużeniu okresu eksploatacji urządzeń. Komercyjne zastosowanie czynników w chłodnictwie i dystrybucji żywności różni się w zależności od rodzaju i budowy urządzenia. Instalacje zamknięte są przystosowane do wykorzystania

czynników o niskim potencjale GWP. Należy jednak zauważyć, że im niższa wartość współczynnika GWP, tym większa palność czynnika, co oznacza, że im czynnik bardziej bezpieczny dla środowiska, tym mniej bezpieczny dla człowieka. Stąd, jak zauważył Doktorant prawidłowy dobór czynnika chłodniczego uwarunkowany jest spełnieniem szeregu wymagań, które dotyczą między innymi: szkodliwego wpływu na środowisko, bezpieczeństwa użytkowania, efektywnej pracy urządzenia oraz względów ekonomicznych. Ponadto wymusza to zmiany już sprawdzonych rozwiązań urządzeń chłodniczych (opracowania nowych) na konstrukcje pracujące z alternatywnymi czynnikami chłodniczymi o wysokiej efektywności energetycznej, z uwzględnieniem możliwości odzysku ciepła poprocesowego. Stąd podjęte przez mgr inż. Tomasza Bernata badania dotyczące możliwości zastosowania przyjaznego środowiska i użytkownikom czynnika chłodniczego dla powszechnie stosowanych układów chłodniczych mebli gastronomicznych z punktu naukowego i praktycznego są uzasadnione, innowacyjne i ważne dla rozwoju tej gałęzi przemysłu.

### **Ocena formalnej strony rozprawy**

Rozprawa doktorska mgr inż. Tomasza Bernata ma formę monografii. Praca obejmuje 131 stron, w tym 32 tabel i 61 rysunków w formie schematów, fotografii i wykresów. Rozprawa została podzielona na 7 rozdziałów z licznymi podrozdziałami. Kolejność rozdziałów w pracy stanowi przemyślany układ, co świadczy o dobrym przygotowaniu Doktoranta do omówienia uzyskanych wyników. Pracę rozpoczyna się streszczeniem w języku polskim, po którym znajduje się wykaz oznaczeń i symboli. W rozdziale pierwszym Doktorant wprowadza w tematykę pracy omawiając wymagania stawiane przed czynnikami chłodniczymi oraz charakteryzuje gastronomiczne meble chłodnicze. W rozdziale drugim Doktorant sformułował cel i zakres pracy. W kolejnych dwóch rozdziałach dokonał opisu metody, którą wykorzystał przy optymalnym doborze czynnika chłodniczego oraz przedstawił schemat ideowy i opis autorskiego stanowiska badawczego urządzenia, na którym przeprowadził badania eksperymentalne przy różnych rodzajach skraplaczy. Natomiast w rozdziale piątym Doktorant w połączeniu z metodyką badań zaprezentował w postaci graficznej i tabelarycznej wyniki przeprowadzonych badań eksperymentalnych. Pracę zamykają rozdziały: Wnioski oraz Kierunki dalszych badań, które wskazują na potrzebę kontynuacji dalszej działalności badawczej w tym kierunku. Literatura obejmuje 91 pozycji, z czego

większość to pozycje anglojęzyczne. Praca napisana została starannie, w sposób logicznie spójny, z wykorzystaniem naukowej terminologii, staranną formą graficzną a niewielka liczba błędów stylistycznych i literowych nie wpływa na moją pozytywną ocenę formalnej strony pracy.

### **Merytoryczna ocena pracy**

Pan mgr inż. Tomasz Bernat rozprawę doktorską rozpoczyna streszczeniem, w którym w sposób rzeczowy i chronologiczny określa najważniejsze wątki pracy, w tym cele badań i uzyskane wyniki.

**Wstęp.** Jest krótkim wprowadzeniem do tematu, w którym Doktorant zwraca uwagę na aspekty związane z obowiązującymi przepisami dotyczącymi wprowadzenia ograniczeń stosowania substancji zubożających warstwę ozonową oraz wpływających na efekt cieplarniany, podkreślając przy tym konieczność zmian rozwiązań konstrukcyjnych w obecnie funkcjonujących urządzeniach chłodniczych.

**Rozdział 1,** zatytułowany „Przegląd literatury”, liczy 34 strony, co stanowi ok. 26% maszynopisu i składa się z kilku podrozdziałów, w których Doktorant omawia najważniejsze zagadnienia dotyczące wymagań jakie powinny spełniać współczesne czynniki chłodnicze od strony zmniejszania negatywnego wpływu na środowisko, zwiększania efektywności pracy instalacji, zagwarantowania bezpieczeństwa użytkownika, obowiązujących przepisów oraz zwrotu z inwestycji. Doktorant charakteryzuje także wybrane naturalne i syntetyczne czynniki chłodnicze, przedstawiając ich podstawowe właściwości fizykochemiczne w tabelach oraz wykresach  $\log(p)-h$ . W kolejnej części tego rozdziału Doktorant w sposób dość ogólny przedstawia charakterystykę wybranych urządzeń chłodniczych wykorzystywanych w branży gastronomicznej. W ostatniej części tego rozdziału Doktorant podsumowuje przegląd literatury, gdzie na podstawie analizy dostępnej literatury stwierdza, iż zastosowanie takich czynników chłodniczych jak R545c, R457a czy R455a, jako alternatywy dla czynnika R404a umożliwia redukcję współczynnika GWP o 95%, zwiększenie wartości współczynnika efektywności energetycznej COP, obniżenie zużycia energii elektrycznej przez sprężarkę oraz uzyskanie niższej wartości współczynnika TEWI. Na uwagę zasługuje wykaz źródeł bibliograficznych, z których Doktorant korzystał przygotowując tą część rozprawy. Większość z nich to rozporządzenia, normy oraz prace opublikowane po 2020 roku, co wskazuje na

aktualność podjętego przez Doktoranta tematu. Jednak w mojej ocenie, przy tak dostępnej literaturze, pewnym niedociągnięciem Doktoranta, jest brak przeglądu danych eksperymentalnych uzyskanych przez innych badaczy w aspekcie własnych badań.

Sformułowany w **Rozdziale 2** cel i zakres pracy oraz sposoby jego realizacji zostały jasno określone i w pełni potwierdzają zarówno poznawczy jaki i praktyczny charakter pracy. Doktorant wyznaczył główny cel pracy, którym była możliwość zastosowania przyjaznego środowisku i użytkownikom czynnika chłodniczego dla powszechnie stosowanych składowych układu chłodniczego mebli gastronomicznych realizowanych na zaprojektowanym autorskim stanowisku badawczym. Proszę o wyjaśnienie, co Doktorant miał na myśli pisząc: „...pod kątem możliwości kontrolowania temperatury wsadu”.

W oparciu o założony cel pracy Doktorant podjął się udowodnienia tezy:

*„Istnieje alternatywny czynnik chłodniczy, pracujący w układzie chłodniczym mebli gastronomicznych, który umożliwia budowę układu chłodniczego w oparciu o dostępne na rynku komponenty, a także: a) zapewnia większą o co najmniej 25% efektywność energetyczną układu niż czynnik chłodniczy odniesienia R404a, b) zapewnia mniejsze o co najmniej 25% koszty energii oraz c) powoduje mniejszy ślad węglowy”.*

Doktorant przyjął, że cel badań zrealizuje poprzez:

1. dobór alternatywnego czynnika chłodniczego,
2. zaprojektowanie oraz zbudowanie autorskiego stanowiska badawczego,
3. określenie parametrów pracy stanowiska badawczego pracującego z czynnikiem chłodniczym odniesienia oraz alternatywnym czynnikiem chłodniczym podczas pracy ze skraplaczem: (powietrznym lamelowym, powietrznym bezlamelowym, wodnym-płytowym wymiennikiem ciepła),
4. ocena możliwości wykorzystania ciepła odpadowego ze skraplacza, jako energii możliwej do dalszego zagospodarowania.

Wszystkie te aspekty powodują, że podjęty przez mgr inż. Tomasza Bernata w rozprawie doktorskiej temat jest ważny nie tylko z punktu widzenia rozwiązania nowego problemu badawczego, ale staje się istotnym zagadnieniem, nadający pracy aplikacyjny charakter.

Mając na uwadze realizację założonego celu badań oraz udowodnienie przyjętej tezy przed realizacją badań eksperymentalnych na autorskim stanowisku badawczym Doktorant w **Rozdziale 3** wykorzystując wielokrotne metody wspomaganie podejmowania decyzji dokonał doboru optymalnego (alternatywnego) czynnika chłodniczego, który będzie

najkorzystniejszym rozwiązaniem w użytkowaniu w projektowanym stanowisku badawczym. Po analizie dostępnych metod Doktorant wytypował trzy metody: SAW, AHP i Electre III, z których na podstawie przyjętych kryteriów wybrał najbardziej korzystną – SAW, czyli metodę sumy ważonej. Założył, że najniższa wartość opisująca dane kryterium jest najlepszym wyborem, co oznacza, że najniższa suma końcowego wyniku oznacza funkcję celu. Do oceny Doktorant wybrał 5 wariantów czynnika chłodniczego (R452a, R449a, R455a, R290, R744) oraz 5 kryteriów decyzyjnych (koszt zakupu 1 kg czynnika chłodniczego [zł], grupa bezpieczeństwa wg PN-EN 378 [-], GWP [-], ciśnienie skraplania przy temperaturze 30°C [bar], ciśnienie odparowania przy temperaturze -10°C [bar]). Po przeprowadzonej analizie Doktorant wytypował czynnik R455a, który został wykorzystany w dalszym procesie badawczym. Należy podkreślić, że przeprowadzenie takiej oceny wymagało od Doktoranta dużej wiedzy i odpowiedniego przygotowania. Stwierdzam także, że taka analiza i uzyskane dane mogą być cennym źródłem wiedzy do bezpośredniego wykorzystania przez innych badaczy z możliwością adaptacji do zastosowań przemysłowych. W tym miejscu proszę o wyjaśnienie: Czym kierował się Doktorant przy określaniu stopni ważności dla przyjętych kryteriów w metodzie wspomaganie podejmowania decyzji dla doboru optymalnego czynnika chłodniczego?. Proszę wyjaśnić dlaczego pewne kryteria mają większą wartość a inne mniejszą.

W kolejny etapie realizacji celu rozprawy (**Rozdział 4**) Doktorant zaprojektował oraz zbudował autorskie, mobilne stanowisko badawcze, odzwierciedlające rzeczywiste warunki pracy układu chłodniczego w meblach gastronomicznych, co uważam jest jego oryginalnym osiągnięciem i wymagało dużego zaangażowania. Budowa stanowiska pozwoliła na przeprowadzenie badań eksperymentalnych z wybranymi czynnikami chłodniczymi oraz weryfikację wybranych komponentów układu chłodniczego. W doborze skraplaczy Doktorant uwzględnił możliwość łatwiejszej ich obsługi oraz możliwość odzysku ciepła odpadowego oraz to, że charakteryzowały się jednakowymi mocami cieplnymi. Tutaj mam pytanie: jaka moc cieplna charakteryzowała wybrane skraplacze?

W **Rozdziale 5** Doktorant przedstawił metodykę badań (podrozdział 5.1), badania i ich rezultaty z wykorzystaniem czynnika chłodniczego odniesienia – R404a (podrozdział 5.2) i alternatywnego R455a (podrozdział 5.3) oraz ocenę możliwości wykorzystania ciepła poprocesowego ze skraplacza (podrozdział 5.4). W zaproponowanym programie badań (podrozdział 5.1) w celu dokonania porównania pracy instalacji chłodniczej z wykorzystaniem

dwóch czynników chłodniczych, Doktorant założył przeprowadzenie pomiarów temperatury, ciśnienia oraz zużycia energii. Zaprojektowane przez Doktoranta stanowisko umożliwiło działanie układu chłodniczego z wykorzystaniem trzech typów skraplaczy – lamelowego, bezlamelowego oraz wymiennika ciepła (wodnego), bez konieczności rozmontowywania jakiegokolwiek elementu instalacji, co uważam za osiągnięcie Doktoranta. Sterowanie temperaturą w zbiorniku glikolu odbywało się poprzez regulator temperatury, który ustawiony został na 0°C z regulacją  $\pm 0,3^\circ\text{C}$ , natomiast w parowniku podczas pracy urządzenia załączona była grzałka elektryczna o mocy 170W, która symulowała oddziaływanie cieplne produktów spożywczych umieszczonych w komorze chłodniczej. W przeprowadzonych w podrozdziałach 5.2 i 5.3 badaniach, Doktorant zaobserwował, że w przypadku czynnika chłodniczego R404a i R455a, temperatura przed skraplaczem lamelowym była niższa niż przed skraplaczem bezlamelowym, natomiast dla skraplacza wodnego utrzymywała się na podobnym poziomie. Rozpatrując dochłodzenie za skraplaczem wykazał, że w przypadku czynnika chłodniczego R404a dochłodzenie miało prawidłowe wartości (w zakresie 1,8-3,6 K), natomiast w przypadku czynnika chłodniczego R455a wartości dochłodzenia były znacznie wyższe i mieściły się w zakresie 18,6-21,3 K. Stąd też Doktorant zasugerował, że w tym przypadku można by było zastosować skraplacz o mniejszej wydajności przy zachowaniu prawidłowych warunków pracy. W przypadku analizy przegrzania za parownikiem obydwu czynników chłodniczych dla badanych przypadków wartości przegrzania miały prawidłowe wartości. W zakresie prezentowanych badań, Doktorant otrzymane, rzeczywiste wyniki poddał uśrednianiu (wykresy w funkcji temperatura-czas, tabele – warunki pracy wyznaczone przy pomocy programu Coolselector2), w celu zidentyfikowania charakterystycznych punktów pomiarowych oraz likwidacji przypadkowych punktów pomiarowych, spowodowanych przez zewnętrzne zakłócenia. Proszę o wyjaśnienie Doktoranta na czym polegało uśrednienie wyników oraz co rozumie pod pojęciem „zewnętrzne zakłócenia”?.

Analizując moc pobieraną przez układ chłodniczy oraz możliwość wykorzystania ciepła poprocesowego ze skraplacza (podrozdział 5.4), zarówno z czynnikiem chłodniczym R404a jak i R455a, Doktorant wykazał, słuszność zastosowania skraplacza wodnego w układzie chłodniczym. Zastosowanie skraplacza wodnego, poza możliwością odzysku ciepła, zmniejsza zużycie energii elektrycznej pobieranej przez układ. W tej części pracy, uważam jednak, że pewnym niedociągnięciem Doktoranta jest brak dyskusji i interpretacji uzyskanych wyników badań z osiągnięciami innych badaczy, którzy również

analizowali czynnik chłodniczy R455a jako alternatywny do czynnika R404a. Ale myślę, że Doktorant w przyszłej swojej pracy naukowej to uwzględni.

**Rozdział 6** Wnioski, stanowi podsumowanie podjętych badań. Odniesiono się w nich do celu pracy oraz postawionej tezy. Uzyskane wyniki potwierdzają słuszność postawionej tezę rozprawy oraz zrealizowanego celu rozprawy doktorskiej w założonym zakresie. Jako najważniejsze spostrzeżenie można uznać, iż istnieje alternatywny czynnik chłodniczy w odniesieniu do R404A pracujący w nowych rozwiązaniach układów chłodniczych mebli gastronomicznych, który zapewnia większą o 34% efektywność energetyczną, mniejsze o 35% koszty energii oraz powoduje mniejszy ślad węglowy. Jednak nie mogę zgodzić się tutaj z formą zaprezentowanych wniosków. Rozdział „Wnioski” powinien być podsumowaniem wyników badań, być ich syntetyczną prezentacją bądź zawierać próbę oceny uzyskania takich rezultatów. Stąd, Tabela 6.1 oraz część wynikowa z punktu 6 powinny się znaleźć w rozdziale „Wyniki badań”, natomiast w części metodycznej, Doktorant powinien zawrzeć sposób postępowania mający prowadzić do osiągnięcia zamierzonego celu. Dotyczy to np. sposób wyliczenia śladu węglowego, który w mojej opinii Doktorant potraktował dość powierzchwniowo. Wyliczenia pojawiają się tak naprawdę dopiero we wniosku 6, a przecież było to jedno z trzech założeń w tezie rozprawy Doktoranta. W mojej opinii brakuje mi także podsumowującego wniosku, w którym Doktorant zaproponowałby najbardziej korzystne rozwiązanie układu chłodniczego z uwzględnieniem parametrów procesowych.

Rozprawę doktorską kończy **Rozdział 7**, który wskazuje na kierunki dalszych badań. Pomimo licznych publikacji w tym zakresie problematyka ta nie została jeszcze w pełni zbadana i opisana. Stąd istnieje dalsza potrzeba prowadzenia badań w celu optymalizacji konstrukcji urządzeń chłodniczych wraz z doбором alternatywnego czynnika chłodniczego. Doktorant podkreśla istotę i ważność kontynuowania badań w tym zakresie, szczególnie w ramach pozyskanych grantów badawczych.

### **Uwagi redakcyjne**

Praca przygotowana jest starannie, mimo to Doktorant nie ustrzegła się pewnych niedociągnięć głównie o charakterze redakcyjnym:

- w pracach naukowych przyjęto pisać się w czasie przeszłym dokonanym, nie teraźniejszym;

- co oznaczają wyrażenia: średnie chłodnictwo komercyjne, duże chłodnictwo przemysłowe (str.29), objętość chemiczna (str.33), lokalna temperatura panująca w meblu (str. 42), dość trudne w zorientowaniu się progi (tab. 3.1);
- Doktorant nie uniknął błędów w wykazie literatury - są niepełne dane bibliograficzne

#### **Szczegóły:**

- na str. 23 jest: *to*, powinno być: *do*; na str. 24 jest: *stopnie* powinno być: *stopniu*; str. 27 jest: *skrapiacz* powinno być: *skraplacz*, „...rodzaj obiegu powietrza w ochładzanym mleku „- chyba ochładzanego mleka, „uzyskał wariant 5” – powinno by „wariant 3” (str. 57)
- przy Tabeli 3.1 i Rysunku 3.1 brak jest cytowania,

Wszystkie moje uwagi zawarte w recenzji podaje jako wskazówki. Uwagi te nie obniżają wartości merytorycznej rozprawy, mają jedynie pomóc w doskonaleniu umiejętności oraz naukowego warsztatu Doktoranta.

#### **Nowości naukowe stanowiące oryginalny dorobek Doktoranta**

Jako oryginalne osiągnięcie Doktoranta należy uznać projekt i budowę autorskiego, mobilnego stanowiska badawczego z możliwością wykorzystania ciepła odpadowego ze skraplacza, jako energii możliwej do dalszego zagospodarowania. Dotyczy to poszukiwania nowych rozwiązań mających zastosowanie w urządzeniach chłodniczych przeznaczonych dla gastronomii. Czynnik chłodniczy R455a o niskim GWP, przy doborze odpowiednich komponentów układu chłodniczego może poprawić wydajność energetyczną tego układu w stosunku do czynnika chłodniczego R-404A.

#### **Ocena końcowa rozprawy doktorskiej**

Rozprawa doktorska mgr inż. Tomasza Bernata dotyczy naukowego zagadnienia, właściwego dla obszaru nauk inżynieryjno-technicznych i dyscypliny inżynieria lądowa, geodezja i transport. Doktorant wykazała się znajomością literatury przedmiotu i umiejętnościami samodzielnego prowadzenia badań naukowych, a uzyskane efekty 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.

Po zapoznaniu się z przedstawioną do oceny pracą doktorską mgr inż. Tomasza Bernata pt. „Badanie wybranych układów chłodniczych mebli gastronomicznych przyjaznych dla środowiska i użytkownika” stwierdzam, że rozprawa spełnia wymagania określone w art. 187. Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce z dnia 20 lipca 2018 r. (Dz.U. z 2018 r. poz. 1668, z późn. zm.) i może być podstawą do nadania stopnia naukowego doktora w dziedzinie nauk inżynieryjno-technicznych, dyscyplinie inżynieria lądowa, geodezja i transport w postępowaniu prowadzonym na podstawie Ustawy Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce z dnia 20 lipca 2018 r.

**W związku z tym przedkładam wniosek do Rady Dyscypliny Inżynieria Lądowa, Geodezja i Transport Politechniki Poznańskiej w Poznaniu o przyjęcie oraz dopuszczenie mag inż. Tomasza Bernata do dalszych etapów przewodu doktorskiego.**



Lublin, 24.05.2023 r.

Dr hab. inż. Katarzyna Kozłowicz, prof. UP