

prof. dr hab. inż. Tadeusz Bohdal
Politechnika Koszalińska
Wydział Mechaniczny
Katedra Energetyki
ul. Raławicka 15-17
75-620 Koszalin

Koszalin, 26.04.2023 r.

R E C E N Z J A

rozprawy doktorskiej mgr inż. Tomasza Bernata nt.:

„Analiza wybranych układów chłodniczych mebli gastronomicznych przyjaznych dla środowiska i użytkownika”

Opinia została opracowana na zlecenie Przewodniczącego Rady Dyscypliny Naukowej Inżynieria Lądowa, Geodezja i Transport Politechniki Poznańskiej prof. dr hab. inż. Jacka Pielechy – zlecenie z dnia 30.03.2023 r.

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

1. Zawartość rozprawy

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

1. **Wstęp**, gdzie podano informacje o przepisach wprowadzających ograniczenia w sposobie postępowania z substancjami szkodliwymi dla środowiska.
2. **Przegląd literatury**, w którym przedstawiono informacje o obecnie stosowanych czynnikach chłodniczych, w tym stawiane wymagania pod względem ochrony środowiska. Podano również charakterystykę wybranych naturalnych i syntetycznych czynników. Opiszano najczęściej stosowane meble gastronomiczne.
3. **Cel i zakres pracy**, gdzie podano motywację podjęcia tematyki, cel i tezę rozprawy doktorskiej oraz opisano zadania planowane do realizacji.
4. **Dobór optymalnego czynnika chłodniczego**, z wykorzystaniem wspomaganie wielokryterialnego. Dokonano wyboru metody wspomagającej podejmowanie decyzji, podano jej charakterystykę, przeprowadzono proces wspomaganie podejmowania decyzji podczas wyboru optymalnego czynnika chłodniczego.

5. **Autorskie stanowisko badawcze urządzenia chłodniczego** zasilanego przyjaznym dla środowiska i użytkownika czynnikiem chłodniczym. Przedstawiono schemat ideowy i szczegółowy opis pracy tego stanowiska.
6. **Wyniki własnych badań eksperymentalnych urządzenia chłodniczego** dedykowanego do pracy w urządzeniach gastronomicznych. Opisano metodykę badań, podano uzyskane wyniki badań dla dwóch czynników chłodniczych R404A i R455A.
7. **Wnioski**, gdzie wyeksponowano główne osiągnięcia Autora w zakresie tematu rozprawy.
8. **Kierunki dalszych badań** w zakresie wykorzystania kolejnych alternatywnych czynników chłodniczych i odzysku ciepła skraplania.
9. **Bibliografia**, która obejmuje 91 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 realizację badań na temat możliwości zastosowania przyjaznego środowiska i użytkownikom czynnika chłodniczego dla powszechnie stosowanych składowych układu chłodniczego mebli gastronomicznych realizowanych na zaprojektowanym autorskim stanowisku badawczym. Tezę swojej pracy sformułował następująco: *„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, c) powoduje mniejszy ślad węglowy”*.

Mając na uwadze udowodnienie powyższej tezy Doktorant zaplanował następujące zadania do realizacji: 1 - dobór alternatywnego czynnika chłodniczego, 2 - zaprojektowanie oraz zbudowanie autorskiego stanowiska badawczego, 3 - określenie parametrów pracy stanowiska badawczego pracującego z czynnikiem odniesienia oraz z alternatywnym czynnikiem chłodniczym podczas pracy ze skraplaczem lamelowym, powietrznym bezlamelowym i wodnym (płytkowym wymiennikiem ciepła), 3 – przeprowadzenie oceny możliwości wykorzystania ciepła odpadowego ze skraplacza, jako energii możliwej do dalszego zagospodarowania. Poprzez realizację wyżej wymienionego zakresu prac Doktorant w pełni zrealizował cele swojej rozprawy doktorskiej oraz uzasadnił postawioną tezę.

3. Rozwinięcie celu, tezy i zakresu pracy

Przedstawiona do oceny rozprawa doktorska dotyczy poszukiwania nowych rozwiązań technicznych w układach chłodniczych mebli gastronomicznych. Wynika to z potrzeby opracowania nowych konstrukcji instalacji chłodniczych, zastosowania nowych proekologicznych czynników roboczych oraz wzrostu efektywności pracy tych urządzeń. We współczesnych rozwiązaniach oczekuje się, aby urządzenia te oraz wszystkie współpracujące w nich elementy miały możliwie jak najmniejszy szkodliwy wpływ na środowisko oraz użytkownika przy jednocześnie największej możliwej efektywności energetycznej. Obowiązujące przepisy prawne regulują te uwarunkowania i wprowadzają znaczne ograniczenia w tym zakresie. We wstępie pracy Autor przedstawia obowiązujące w Polsce i na świecie dokumenty wprowadzające ograniczenia w sposobie postępowania z substancjami szkodliwymi dla środowiska. Na ich podstawie dotychczas stosowane na szeroką skalę czynniki HFC są sukcesywnie wycofywane z użytkowania. Alternatywą są czynniki nie mające negatywnego oddziaływania na środowisko naturalne. Są to czynniki naturalne i proekologiczne czynniki syntetyczne z grupy

HFO/HFC. Wprowadzenie do eksploatacji nowych czynników chłodniczych w wielu wypadkach wymusza opracowanie nowych konstrukcji urządzeń chłodniczych, w tym również stosowanych w meblach gastronomicznych.

W rozdziale pierwszym rozprawy Doktorant dokonał przeglądu literatury dotyczącej tematu pracy. Przedstawił informacje o obecnie stosowanych czynnikach chłodniczych, w tym stawiane wymagania pod względem ochrony środowiska. Podał charakterystykę wybranych naturalnych i syntetycznych czynników. Określił współczynniki ujmujące ich negatywny wpływ na środowisko naturalne, wskazał sposoby zwiększenia efektywności pracy instalacji oraz zagwarantowania bezpieczeństwa użytkownika. Zwrócił uwagę na zagrożenia ekonomiczne ważne przy podejmowaniu decyzji inwestycyjnych. Opisał również najczęściej stosowane meble gastronomiczne. W podsumowaniu przeglądu literatury Autor stwierdził, że zgodnie z założeniami Unii Europejskiej, należy ograniczyć użycie czynników chłodniczych mających negatywny wpływ na środowisko naturalne, należy stosować alternatywne czynniki chłodnicze o niskim współczynniku GWP i ODP oraz o względnie dużej efektywności energetycznej. Z dokonanego przeglądu literatury wynika, że w urządzeniach takich jak zamrażarki czy chłodziarki czynniki chłodnicze R454C, R455A, R457A i R465A mogą być stosowane jako alternatywne dla czynnika R404A.

Na podstawie wniosków z przeglądu dostępnej literatury Doktorant określił cel i zakres swojej pracy oraz podał jej tezę. Cel pracy wynikał z potrzeby zamiany powszechnie stosowanego czynnika chłodniczego R404A na nowy proekologiczny czynnik o niskim współczynniku GWP i ODP oraz o względnie dużej efektywności energetycznej. W postawionej tezie zakłada możliwość doboru takiego czynnika, który zapewni większą o co najmniej 25% efektywność energetyczną układu, zapewni mniejsze o co najmniej 25% koszty energii i spowoduje mniejszy ślad węglowy w stosunku do obecnie stosowanego rozwiązania technicznego.

Mając na uwadze udowodnienie postawionej tezy Autor w rozdziale trzecim podjął się doboru optymalnego czynnika chłodniczego, z wykorzystaniem wspomaganie wielokryterialnego. Wskazał, że wśród różnych znanych metod wspomaganie podejmowania decyzji, różni się dwa podstawowe podejścia – amerykańskie i francuskie. Dokonał w tym zakresie analizy i stwierdził, że najkorzystniejszym będzie wybór metody SAW (ang. *Simple Additive Weighting Method*) – metody sumy ważonej. Jest to jedna z częściej stosowanych metod optymalizacji wielokryterialnej dzięki, której możliwe jest przekształcenie problemu wielokryterialnego na jednokryterialny poprzez określenie wag poszczególnych kryteriów na podstawie preferencji użytkownika. Wybrane kryteria decyzyjne to: 1 - koszt zakupu 1 kg czynnika chłodniczego [zł], 2 - grupa bezpieczeństwa wg PN-EN 378, 3 – GWP, 4 - ciśnienie skraplania przy temperaturze 30°C [bar], 5 - ciśnienie odparowania przy temperaturze -10°C [bar]. Określono stopnie ważności dla poszczególnych kryteriów. Opracowano znormalizowaną macierz wejściową rozwiązań z przypisanymi wagami i uzyskano wyniki oceny wielowariantowej przy użyciu metody sumy ważonej. W wyniku przeprowadzonej analizy wytypowano optymalny czynnik chłodniczy, którym jest R455A i to on został wykorzystany w dalszym procesie badawczym.

W rozdziale czwartym rozprawy opisano autorskie stanowisko badawcze. Umożliwiło ono weryfikację wybranych komponentów układu chłodniczego mebli gastronomicznych. Zostało ono zbudowane jako urządzenie mobilne. W jego dolnej części znajdowała się sprężarka, parownik zbudowany jako zbiornik z glikolem, zbiornik ciekłego czynnika chłodniczego a także filtr, wziernik, termostatyczny zawór rozprężny oraz niezbędne zawory. W górnej części stanowiska znajdowały się trzy rodzaje wykorzystywanych w trakcie badań skraplaczy: skraplacz klasyczny (lamelowy), skraplacz bezobsługowy (bezlamelowy) i skraplacz wodny czyli płytowy wymiennik ciepła. Każdy ze skraplaczy posiadał możliwość załączania i wyłączenia.

czania go za pomocą zaworów elektromagnetycznych NC o napięciu 230V. W górnej części znajdowało się także oprzyrządowanie pomiarowe do rejestracji oraz odczytu parametrów pracy. W opisie stanowiska podano również błędy zastosowanych przyrządów pomiarowych.

Rozdział piąty zawiera wyniki badań eksperymentalnych dotyczących pracy układu chłodniczego w różnych warunkach eksploatacyjnych. W celu uzyskania odniesienia dla alternatywnego czynnika chłodniczego do czynnika użytkowanego w poprzednich latach, w pierwszej kolejności przeprowadzono badania z czynnikiem R404a. Następnie dokonano zamiany czynnika roboczego bez zmiany jakiegokolwiek elementu instalacji chłodniczej na nowoczesny czynnik chłodniczy R455a. Układ chłodniczy badano pod względem osiągniętych parametrów roboczych, takich jak ciśnienie skraplania i parowania, temperatura za i przed skraplaczem, temperatura za parownikiem, a także pod względem zużycia energii napędowej. Badania prowadzono w warunkach eksploatacyjnych urządzenia chłodniczego, to jest z zastosowaniem regulacji automatycznej, poprzez sterowanie temperaturą w zbiorniku glikolu z wykorzystaniem regulatora temperatury, który został ustawiony na 0°C z regulacją załączania sprężarki $\pm 0,3^{\circ}\text{C}$. W wyniku pomiarów uzyskano przebiegi zmienności parametrów pracy obiegu w funkcji czasu. Obejmowały one okresy pracy w warunkach ustalonych i niestabilnych w czasie. W badaniach skupiono się na ustalonym fragmencie cyklu pracy urządzenia, a w wynikach pominięto czas oraz parametry w stanie niestabilnym. Uzyskane wyniki badań pozwoliły również ocenić możliwość wykorzystania ciepła odpadowego ze skraplaczy. Wykazano, że stosowanie skraplaczy wodnych, poza możliwością odzysku ciepła oraz braku jego odprowadzenia do otoczenia, zmniejsza zużycie energii elektrycznej pobieranej przez układ chłodniczy. Wpływa na to rezygnacja z konieczności instalowania wentylatorów na skraplaczach, a także utrzymanie bardziej stabilnych warunków pracy niż w przypadku instalacji ze skraplaczami powietrznymi.

W rozdziale szóstym podsumowano uzyskane wyniki badań oraz podano wnioski. Stwierdzono, iż możliwe jest zastosowanie alternatywnego czynnika chłodniczego w istniejącym układzie chłodniczym bez dokonywania wymiany jego komponentów. Wykazano możliwość zastosowania przyjaznego środowiska i użytkownikom czynnika chłodniczego R455A dla powszechnie stosowanych składowych układu chłodniczego mebli gastronomicznych. Potwierdzono słuszność tezy, wykazując, że nowy czynnik chłodniczy zapewnia większą o 34% efektywność energetyczną układu niż czynnik chłodniczy odniesienia R404A, zapewnia mniejsze o 34% koszty energii oraz powoduje mniejszy ślad węglowy.

W rozdziale siódmym wskazano kierunki dalszych badań w zakresie wykorzystania kolejnych alternatywnych czynników chłodniczych i odzysku ciepła skraplania.

Na podkreślenie zasługuje to, że Autor zastosował w swojej pracy adekwatne do potrzeb narzędzia formalne dotyczące metod wspomagających podejmowanie decyzji i badań eksperymentalnych, opracowania i prezentacji wyników, a także doboru aparatury badawczej, w pełni odpowiadającą założonym celom badań doświadczalnych. Wykazał się bardzo dobrym opanowaniem warsztatu badawczego. Przedstawiony program badań jest prawidłowy, obfitujący dużą liczbą otrzymanych danych. Uzyskane wyniki prac badawczych charakteryzują się dużym potencjałem wdrożeniowym. Układ pracy oceniam jako właściwy, a zastosowane metody badawcze w postaci wykorzystania wspomaganie wielokryterialnego, 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 w ostatnich latach intensywnych

prac nad zastosowaniem w praktyce nowych proekologicznych czynników chłodniczych ilość uzyskanych wyników jest niewspółmiernie mała w stosunku do potrzeb związanych z rozwiązywaniem problemów z ich wprowadzaniem do powszechnego stosowania. 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. 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 energochłonnością pracy 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 czynników chłodniczych naturalnych i syntetycznych oraz urządzeń gastronomicznych. Wskazanie, że w urządzeniach takich jak zamrażarki czy chłodziarki czynniki chłodnicze R454C, R455A, R457A i R465A mogą być stosowane jako alternatywne dla czynnika R404A;
- **przeprowadzenie doboru optymalnego czynnika chłodniczego** z wykorzystaniem wspomaganie wielokryterialnego, gdzie w wyniku przeprowadzonej analizy wytypowano optymalny czynnik chłodniczy, którym jest R455A i to on został wykorzystany w dalszym procesie badawczym;
- **opracowanie koncepcji i budowa autorskiego stanowiska badawczego**, które umożliwiło weryfikację wybranych komponentów układu chłodniczego mebli gastronomicznych;
- **przeprowadzenie systematycznych badań eksperymentalnych** dotyczących pracy układu chłodniczego w różnych warunkach eksploatacyjnych z wykorzystaniem dotychczas stosowanego czynnika chłodniczego R404A i nowego proekologicznego zamiennika R455A;
- **wykazanie, że możliwe jest zastosowanie alternatywnego czynnika chłodniczego** w istniejącym układzie chłodniczym bez dokonywania wymiany jego komponentów. Ponadto, że istnieje możliwość zastosowania przyjaznego środowisku i użytkownikom czynnika chłodniczego R455A dla powszechnie stosowanych składowych układu chłodniczego mebli gastronomicznych;
- potwierdzenie założenia, że **stosowanie skraplaczy wodnych**, poza możliwością odzysku ciepła oraz braku jego zrzutu do otoczenia, **zmniejsza zużycie energii elektrycznej** pobieranej przez układ chłodniczy.

Reasumując Doktorant, zgodnie z postawioną tezą pracy wykazał, że istnieje możliwość zastosowania przyjaznego środowisku i użytkownikom czynnika chłodniczego w powszechnie stosowanych składowych układu chłodniczego mebli gastronomicznych. Ponadto, że istnieje alternatywny czynnik chłodniczy, pracujący w układzie chłodniczym mebli gastronomicznych, który zapewnia większą o co najmniej 25% efektywność energetyczną układu niż czynnik chłodniczy odniesienia R404A, zapewnia mniejsze o co najmniej 25% koszty energii oraz powoduje mniejszy ślad węglowy. 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 istotnego problemu 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.

Ciągły postęp technologiczny nakierowany jest na poprawę efektywności pracy nowych rozwiązań systemów energetycznych, w tym urządzeń chłodniczych oraz na zmniejszenie ich niekorzystnego oddziaływania na otaczające nas środowisko. Dotyczy to opracowania nowych receptur produkowanych czynników chłodniczych, co wymaga prowadzenia badań eksperymentalnych w warunkach eksploatacyjnych. Badania te mają wykazać ich przydatność w praktycznych zastosowaniach przy jednoczesnym spełnieniu oczekiwanych wymagań. Doktorant z dobrym skutkiem podjął próbę wykazania, że istnieje taka możliwość zastępując dotychczas stosowany czynnik chłodniczy R404A nowym czynnikiem R455A. Takie działania poprawiają znacznie nie tylko wskaźniki ekologiczne, ale i równocześnie eksploatacyjne wskaźniki ekonomiczne. Co prawda czynnik chłodniczy R455A jest droższy od czynnika R404A, ale wzrost jednostkowej ceny zakupu jest pomijalnie mały względem ponoszonych kosztów eksploatacyjnych. Rezultaty prac Doktoranta znajdują 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 13 zamieszczono tablicę z wykazem czynników chłodniczych i ich własności. Występują tam oznaczenia czynników, gdzie w wielu przypadkach na końcu oznaczenia znajduje się litera alfabetu mała lub duża. Należy wskazać, że w oznaczeniach przyjmuje się zasadę, że roztworom o różnym udziale masowym czynników odpowiada duża litera umieszczana na końcu oznaczenia. Ponadto zgodnie z normami ISO dla roztworów z grupy 400 i 500 odmiany składu oznaczane są tylko dużymi literami. W pracy doktoranta nie zawsze tak jest.
2. W pracy szczególnie dużą uwagę poświęcono czynnikom chłodniczym R454C, R455A, R457A i R465A (str. 33 ÷ 38). Jednak podany opis ich własności jest mało precyzyjny. Nie podano składu procentowego tych mieszanin i wartości poślizgu temperaturowego.
3. Na stronie 34, 10 wiersz od dołu, podano niezrozumiałe zdanie: *„Kluczową cechą czynnika R452a jest dopasowanie temperatury tłoczenia sprężarki pracującej z czynnikami R404a i R507 zarówno w warunkach niskiej, jak i średniej temperatury”*. Należy to zadanie zapisać tak, aby było zrozumiałe dla czytelnika.
4. W tablicy 3.5 na str. 54 przedstawiono stopnie ważności dla poszczególnych kryteriów przyjętych w metodzie doboru optymalnego czynnika chłodniczego. Uwydatniono ważność współczynnika GWP oraz istotność stopnia palności, a także kryterium określające czynnik ekonomiczny. Brak jest jednak uzasadnienia dla takiego postępowania.
5. Na stronie 54 podano nieprecyzyjny zapis: *„Im ciśnienia robocze (skraplania) są bardziej zbliżone do ciśnienia atmosferycznego, tym mniejsze opory musi pokonać sprężarka*

i mogą zostać zastosowane mniej wymagające elementy konstrukcyjne". Należy zaznaczyć, że o wartości oporów przepływu decyduje stosunek ciśnień tłoczenia i ssania sprężarki. Dla hermetycznej sprężarki chłodniczej ciśnienia otoczenia nie ma żadnego znaczenia.

6. Na stronie 58, 5 wiersz od dołu, zapisano, że zastosowano: „*skraplacz klasyczny (lamelowy), skraplacz bezobsługowy (bezlamelowy) i skraplacz wodny czyli płytowy wymiennik ciepła*”. Nie wyjaśniono jednak na czym polegała bezobsługowość skraplacza bezlamelowego oraz na czym polegała obsługowość pozostałych skraplaczy.
7. Na stronie 67, 2 wiersz od dołu, znajduje się nieprecyzyjny zapis: „*W badaniach skupiono się na ustalonym cyklu pracy urządzenia, dlatego w wynikach pominięto czas oraz parametry przed stanem ustalonym*”. Należy wskazać, że urządzenie chłodnicze pracowało w ruchu automatycznym, gdzie termostat odpowiednio włączał i wyłączał sprężarkę. Powodowało to ciągłą zmianę parametrów pracy układu. W ramach całego cyklu pracy Doktorant jedynie poszukiwał przedziału czasowego, gdzie wybrane parametry miały stałą wartość w czasie (choć nie wszystkie).
8. Na stronie 68 i dalszych Doktorant pisze o uśrednianiu wyników pomiarów. Nie podano informacji na czym to uśrednianie polegało. Z przedstawionych na rysunkach wykresów nie wynika, aby stosowano jakieś uśrednianie wyników. Są to tylko zapisane wyniki pomiarów bieżących pracy urządzenia.
9. W pracy podano, że w każdym wariancie badań temperatura glikolu wokół parownika wynosiła 0 °C. Stała też była moc grzałki elektrycznej, a wybrane skraplacze charakteryzowały się jednakowymi mocami cieplnymi (str. 58). Nie jest więc zrozumiałym, dlaczego w poszczególnych wariantach pracy urządzenia uzyskiwano różne parametry jego pracy. Należy to wyjaśnić i uzasadnić.
10. Na kilku wykresach (począwszy od rys. 5.9) Doktorant podał przebieg w czasie skumulowanego przepływu wody. Brak jest jednak oznaczenia na wykresach jednostek pozwalających go wyznaczyć. Należało również podać do jakich celów wykorzystywano wyniki dla skumulowanego przepływu wody.
11. Na str. 116, 2 wiersz od góry, podano, że „*temperatura przed skraplaczem lamelowym była o 12,4°C niższa niż dla skraplacza bezlamelowego*”. Nie wyjaśniono jednak, co było tego przyczyną.

Uwagi edytorskie

- ogólne

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

- szczegółowe

1. Na str. 7 w wykazie oznaczeń pomyłkowo zapisano: „*CO₂ – dwutlenek siarki*”, powinno być „*SO₂ – dwutlenek siarki*”.

2. Na str. 9, 4 wiersz od góry jest zapis: „...sporządzono międzynarodowe porozumienie tzw. *Protokół Montrealski*...”, powinno być „...sporządzono międzynarodowe porozumienie, tzw. *Protokół Montrealski*...”.
3. Na str. 58, 5 wiersz od dołu, jest zapis: „*W górnej części stanowiska znajdują się trzy rodzaje wykorzystywanych w trakcie badań skraplaczy. Skraplacz klasyczny (lamelowy), skraplacz bezobsługowy (bezlamelowy) i skraplacz wodny czyli płytowy wymiennik ciepła*”. Powinno być: „*W górnej części stanowiska znajdują się trzy rodzaje wykorzystywanych w trakcie badań skraplaczy: skraplacz klasyczny (lamelowy), skraplacz bezobsługowy (bezlamelowy) i skraplacz wodny czyli płytowy wymiennik ciepła*”.
4. Na str. 61, 2 wiersz od góry – błędne formatowanie.
5. Na str. 62, 5 wiersz od góry jest zapis „...*poprowadzono instalacje elektryczną*...”, powinno być „...*poprowadzono instalację elektryczną*...”.

7. Uwagi końcowe

Prezentowana rozprawa doktorska napisana jest zwięźle, rzeczowo i w sposób zrozumiały. Podane uwagi krytyczne mają charakter dyskusyjny i powinny być inspiracją dla Doktoranta do dalszych analiz, dotyczących nowatorskich rozwiązań w zakresie instalacji chłodniczych. Uwagi te nie pomniejszają wartości opiniowanej pracy, którą oceniam wysoko.

8. Wniosek do Rady Dyscypliny Naukowej Inżynieria Lądowa, Geodezja i Transport 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 wysokiego poziomu naukowego rozprawy, należy podkreślić duży stopień jej aplikacyjności. **Wnioskuje o przyjęcie pracy mgr inż. Tomasza Bernata, 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 znacznie do wzrostu stanu wiedzy w zakresie szeroko pojętej energetyki niskotemperaturowej.