

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

Koszalin, 23.06.2025 r.

R E C E N Z J A

rozprawy doktorskiej mgr inż. Sebastiana Śniegowskiego nt.:

**„Projekt, wykonanie oraz badania wytwornicy wody ziębniczej,
do zastosowań gospodarczych i przemysłowych pracującej
na ekologicznym czynniku chłodniczym”**

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 14.05.2025 r.

Promotorem recenzowanej pracy jest dr hab. inż. Krzysztof Bieńczak - profesor Politechniki Poznańskiej, a rolę opiekuna pełni inż. Grzegorz Wardęga.

1. Zawartość rozprawy

Recenzowana rozprawa obejmuje 119 stron i została podzielona na jedenaście rozdziałów. Dodatkowo podano: streszczenie, wykaz ważniejszych oznaczeń i skrótów oraz wykaz cytowanej literatury. W treści rozprawy zawarto:

1. **Wstęp**, gdzie podano informacje o potrzebie działań proekologicznych w zakresie projektowania, budowy i eksploatacji urządzeń energetycznych opartych na zasadach działania lewobieżnych obiegów termodynamicznych.
2. **Przegląd literatury**, w którym przedstawiono informacje o obecnie obowiązujących przepisach wprowadzających ograniczenia w sposobie postępowania z substancjami szkodliwymi dla środowiska. Usystematyzowano dokumenty legislacyjne i akty prawne w tym zakresie oraz dokonano ich analizy.
3. **Charakterystykę wytwornic wody lodowej** oraz ich elementów składowych: sprężarek, skraplaczy, parowników itp.
4. Informacje o stosowanych czynnikach chłodniczych, w tym stawiane wymagania pod względem ochrony środowiska. Podano również charakterystykę wybranych naturalnych i syntetycznych czynników chłodniczych.

5. **Cel, hipotezę i zakres pracy**, gdzie podano motywację podjęcia tematyki, cel i hipotezę rozprawy doktorskiej oraz opisano zadania planowane do realizacji.
6. **Dobór optymalnego czynnika chłodniczego** do wytwornicy wody lodowej z wykorzystaniem wspomagania wielokryterialnego. Dokonano wyboru metody wspomagającej podejmowanie decyzji, podano jej charakterystykę, przeprowadzono proces wspomagania podejmowania decyzji podczas wyboru optymalnego czynnika chłodniczego.
7. **Projekt stanowiska badawczego** wytwornicy wody ziębniczej, do zastosowań gospodarczych i przemysłowych pracującej na ekologicznym czynniku termodynamicznym oraz opisano sposób jego wykonania. Przedstawiono schemat ideowy i szczegółowy opis pracy tego stanowiska.
8. **Wyniki własnych badań eksperymentalnych** wytwornicy wody ziębniczej. Opisano metodykę badań, zamieszczono uzyskane wyniki badań chłodzenia wody i dwóch roztworów glikolowych w postaci glikolu propylenowego i glikolu etylenowego.
9. **Porównanie wyników badań własnych** z wielkościami opisującymi pracę dostępnych na rynku wytwornic wody lodowej z wykorzystaniem czynników syntetycznych i naturalnych.
10. **Wnioski**, gdzie wyeksponowano główne osiągnięcia Autora dotyczące tematu rozprawy.
11. **Kierunki dalszych badań** w zakresie doskonalenia konstrukcji wytwornic wody ziębniczej w celu osiągnięcia wyższych wskaźników efektywności ich pracy.
12. **Bibliografia**, która obejmuje 46 pozycji literaturowych krajowych i zagranicznych w postaci książek, artykułów, rozporządzeń, norm, stron katalogowych i stron internetowych.

2. Cel, hipoteza i zakres pracy

Doktorant w rozdziale drugim podał cel, hipotezę i zaplanowane do realizacji zadania. Celem pracy było wykazanie, że istnieje możliwość zbudowania efektywnie działającej wytwornicy wody ziębniczej z naturalnym czynnikiem chłodniczym. Założono, że nowo opracowana wytwornica powinna być przyjazna dla środowiska i użytkownika, a do jej wytworzenia powinny zostać wykorzystane dostępne na rynku komponenty. Uwzględniając cel pracy, autor sformułował hipotezę w postaci: *„Występuje naturalny czynnik chłodniczy, zastosowany w przemysłowej wytwornicy wody ziębniczej zapewniający skonstruowanie urządzenia zgodnie z obowiązującymi przepisami i wymaganymi sprawnościami energetycznymi z dostępnych na rynku komponentów zapewniając: a) maksymalną wartość współczynnika efektywności energetycznej SEPR, lecz nie mniejszą niż 5,00, b) współczynnik GWP czynnika chłodniczego poniżej 5, c) obniżenie kosztów eksploatacji wynikających z obowiązkowych kontroli szczelności agregatów wody ziębniczej, d) obniżenie zużycia energii elektrycznej w porównaniu do rynkowych agregatów pracujących z użyciem syntetycznych czynników chłodniczych”*.

Mając na uwadze udowodnienie powyższej tezy Doktorant zaplanował następujące zadania do realizacji: 1 - dobór naturalnego czynnika chłodniczego do wytwornicy wody ziębniczej, 2 - projekt stanowiska badawczego wytwornicy wody ziębniczej, do zastosowań gospodarczych i przemysłowych pracującej na ekologicznym czynniku chłodniczym, 3 - budowę stanowiska, 4 - wykonanie badań sprawności energetycznej wytwornicy wody ziębniczej, 5 - porównanie wyników własnych badań z wielkościami opisującymi pracę dostępnych na rynku wytwornic wody lodowej z czynnikami syntetycznymi i naturalnymi.

Poprzez realizację wyżej wymienionego zakresu prac Doktorant zrealizował cele swojej rozprawy doktorskiej oraz uzasadnił postawioną hipotezę.

3. Rozwinięcie celu, hipotezy i zakresu pracy

Przedstawiona do oceny rozprawa doktorska dotyczy poszukiwania nowych rozwiązań technicznych w układach chłodniczych będących na wyposażeniu wytwornic wody żiębniczej. 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. W rozdziale drugim w ramach analizy literatury Autor przedstawił obowiązujące w Polsce i na świecie dokumenty wprowadzające ograniczenia w sposobie postępowania z substancjami szkodliwymi dla środowiska. Szczególną uwagę zwrócił na Protokoły i Konwencje, w tym Konwencję Wiedeńską gdzie określono zasady, które mają na celu ochronę warstwy ozonowej, Protokół Montrealski, który jest jedynym traktatem ONZ ratyfikowanym przez ogół państw na świecie członków ONZ w liczbie 197 oraz Protokół z Kioto w sprawie zmian klimatu. Omówił też liczne Rozporządzenia Parlamentu Europejskiego i Rady (UE), które stanowią istotne dopełnienia podpisanych protokołów w zakresie ochrony klimatu, obrotu substancjami kontrolowanymi, dopuszczalnych wskaźników opisujących pracę urządzeń chłodniczych i pomp ciepła. Na podstawie obowiązujących przepisów dotychczas stosowane na szeroką skalę czynniki CFC 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. Wprowadzenie do eksploatacji nowych czynników chłodniczych w wielu wypadkach wymusza opracowanie nowych konstrukcji urządzeń chłodniczych, w tym również stosowanych w wytwornicach wody żiębniczej. Również w rozdziale drugim rozprawy Doktorant dokonał przeglądu konstrukcji wytwornic wody lodowej. Podał definicję wytwornicy wody lodowej zgodnie z europejską normą PN-EN 1451. Wskazał na dwa podstawowe typy systemów chłodniczych wykorzystywanych w wytwornicach wody lodowej, to jest z bezpośrednim odparowaniem (DX) oraz parowniki zalane. Opisał szczegółowo podstawowe elementy instalacji chłodniczych stosowanych w wytwornicach wody lodowej, w tym sprężarki (tłokowe, spiralne, śrubowe i odśrodkowe), skraplacze (chłodzone wodą, powietrzem i natryskowo-wyparne) i parowniki (suche i zalane).

Doktorant przedstawił również 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 użytkowania. Zwrócił uwagę na zagadnienia ekonomiczne ważne przy podejmowaniu decyzji inwestycyjnych. 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.

Na podstawie wniosków z przeglądu dostępnej literatury Doktorant określił cel i zakres swojej pracy oraz podał jej hipotezę. Cel pracy wynikał z potrzeby zbudowania efektywnie działającej wytwornicy wody żiębniczej z naturalnym czynnikiem chłodniczym. Wytwornica

ta powinna być przyjazna dla środowiska i użytkownika, a do jej wytworzenia należy wykorzystać dostępne na rynku komponenty. Uwzględniając cel pracy autor sformułował hipotezę zakładającą, że występuje naturalny czynnik chłodniczy, zastosowany w przemysłowej wytwornicy wody ziemniczej zapewniający skonstruowanie urządzenia zgodnie z obowiązującymi przepisami i wymaganymi sprawnościami energetycznymi z dostępnych na rynku komponentów. Jego zastosowanie ma zapewnić obniżenie zużycia energii elektrycznej w porównaniu do rynkowych agregatów pracujących z użyciem syntetycznych czynników chłodniczych.

Mając na uwadze udowodnienie postawionej hipotezy Autor w rozdziale czwartym podjął się doboru optymalnego czynnika chłodniczego. Opisał szczegółowo własności wybranych naturalnych czynników, które mogą być zastosowane w instalacji chłodniczej wytwornicy wody lodowej. Są to amoniak, dwutlenek węgla i węglowodory (propan, izobutan i propylen) Przedstawił charakterystykę tych czynników, zastosowania oraz porównał ich zalety i wady.

Doboru optymalnego czynnika chłodniczego dokonał z wykorzystaniem wspomagania wielokryterialnego podejmowania decyzji, to jest kluczowego procesu, stosowanego w przypadkach, w których istnieje wiele dostępnych alternatyw, a wybór optymalnego wariantu zobowiązuje do uwzględnienia różnych, wielokrotnie sprzecznych kryteriów. Procedury tego typu są globalnie stosowane w różnych dziedzinach, takich jak ekonomia, inżynieria i zarządzanie ponieważ pozwalają na racjonalne podejmowanie decyzji w zawiłych warunkach, gdzie ważne jest rozważenie wielu różnych kryteriów. Wskazał, że wśród różnych znanych metod wspomagania podejmowania decyzji, rozróżnia 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 - wartość współczynnika GWP, 2 - koszt zakupu 1 kg czynnika chłodniczego [zł netto], 3 - ciśnienie dla temperatury parowania +5°C [bar], 4 - ciśnienie skraplania przy temperaturze 45°C [bar], 5 – bezpieczeństwo, palność i toksyczność na podstawie normy PN-EN 378. 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 R290 i to on został wykorzystany w dalszym procesie badawczym.

W rozdziale piątym rozprawy opisano autorski projekt i wykonanie stanowiska badawczego wytwornicy wody ziemniczej, do zastosowań gospodarczych i przemysłowych, pracującej na ekologicznym czynniku termodynamicznym. Projektując stanowisko zgodnie z przyjętą tezą pracy dokonano doboru ogólnie dostępnych na rynku części, elementów i podzespołów urządzenia. Wytwornice wody ziemniczej potraktowano jako urządzenie badawcze i założono, że moc chłodnicza ma wynosić około 2500 W, a możliwość budowania większych urządzeń i dalszych badań nastąpi po uzyskaniu potwierdzenia przyjętej hipotezy. Dobrano hermetyczną sprężarkę NX21TBa o nominalnej mocy chłodniczej 2268 W, skraplacz chłodzony powietrzem o mocy 5,00 kW, parownik o konstrukcji płytowej GBS 418M-20/40bar dla mocy chłodniczej 3,50 kW, elektroniczny zawór rozprężny z silnikiem krokowym oraz regulator płynnej prędkości obrotowej wentylatora skraplacza. Do budowy stanowiska wybrano jeden z najnowocześniejszych systemów sterowania układem chłodniczym, funkcjonującym na programowaniu, sterowaniu przy użyciu telefonu i aplikacji dającej możliwości weryfikowania parametrów pracy, działań serwisowych w częściowym obszarze bez ingerencji zewnętrznych narzędzi pomiarowych.

Rozdział szósty zawiera wyniki badań eksperymentalnych dotyczących pracy układu chłodniczego w różnych warunkach eksploatacyjnych. Metodykę badawczą opracowano w oparciu o Rozporządzenie Komisji (UE) 2016/2281 z dnia 30 listopada 2016 r. dotyczące zrealizowanej dyrektywy Parlamentu Europejskiego i Rady 2009/125/WE wprowadzającej powszechne zasady określania warunków dotyczących ekoprojektu dla produktów związanych z energią w odniesieniu do wymogów dotyczących wysokotemperaturowych agregatów chłodniczych. Na podstawie tego rozporządzenia dobrano metodę badawczą wyznaczania współczynnika efektywności energetycznej badanego agregatu SEPR, którego wartość dla wytwornic wody ziębniczej chłodzonych powietrzem o mocy mniejszej niż 400 kW powinna wynosić więcej niż 5,0. Przeprowadzono badania dla czterech warunków bloków temperaturowych zgodnie z przyjętymi założeniami. Wykonano pomiary ciśnień pracy, temperatur, mocy chłodniczej oraz zużycia energii elektrycznej. Wyznaczono wartości współczynnika EER, który stanowi stosunek znamionowej wydajności chłodniczej urządzenia do znamionowego poboru mocy. Przeprowadzone badania potwierdziły, że zaprojektowana wytwornica wody ziębniczej, działająca na ekologicznym czynniku chłodniczym jakim jest propan, spełnia wszystkie podstawowe wymagania założonej hipotezy. Urządzenie pracowało stabilnie w określonym zakresie temperatur i wydajności, a współczynnik EER był wyższy od porównywanych agregatów dostępnych na rynku. Nie osiągnięto jednak zamierzonej wartości współczynnika sezonowej sprawności energetycznej SEPR o wartości powyżej 5,0. Zdaniem Doktoranta wynika to z niewielkiej mocy chłodniczej zbudowanego urządzenia, gdzie uwzględniając możliwości konstrukcyjne, optymalizacji i sterowania ze względu na małe komponenty były ograniczone. Można jednak przyjąć, że dla konstrukcji o większych mocach chłodniczych, przy zastosowaniu innych typów sprężarek i systemów sterowania optymalizacją zużycia energii założony cel wartości współczynnika SEPR jest do osiągnięcia. Dodatkowo przeprowadzono badanie na stanowisku z roztworami wodno-glikolowymi. Uzyskane wyniki sprawności EER dla zastosowania niskotemperaturowego są również obiecujące, lecz wymagają dalszych badań.

W rozdziale siódmym przedstawiono porównanie wyników badań własnych z wielkościami opisującymi pracę dostępnych na rynku wytwornic wody lodowej z wykorzystaniem czynników syntetycznych i naturalnych. Są to cztery wytwornice o nazwie: Carrier 30RB-040R, Trane RTAD 085 HE SN, EUROKLIMAT EKS BS i EUROKLIMAT HERA 035-1-1 PE. Porównanie uwzględnia najważniejsze parametry techniczne, takie jak moc chłodnicza, współczynnik SEPR, typ czynnika chłodniczego, sterowanie mocą chłodniczą oraz typ konstrukcji sprężarki. Wyniki dokonanego porównania wskazują, że w przyszłości po wycofaniu z użycia czynników syntetycznych wytwornice wody ziębniczej pracujące z wykorzystaniem propanu, po dokonaniu dalszych ulepszeń, będą miały jedno z najwyższych współczynników efektywności energetycznej.

W rozdziale ósmym podsumowano uzyskane wyniki badań oraz podano wnioski. Stwierdzono, iż możliwym jest zastosowanie naturalnego czynnika chłodniczego w przemysłowej wytwornicy wody ziębniczej oraz skonstruowanie urządzenia zgodnie z obowiązującymi przepisami i wymaganymi sprawnościami energetycznymi z dostępnych na rynku komponentów. Zgodnie z przyjętą hipotezą pracy współczynnik GWP zastosowanego czynnika chłodniczego jest mniejszy od 5. W stosunku do innych rozwiązań konstrukcyjnych osiągnięto znaczny wzrost współczynnika EER, co oznacza, że nastąpiło obniżenie kosztów eksploatacji i obniżenie zużycia energii elektrycznej w porównaniu do rynkowych agregatów pracujących z użyciem syntetycznych czynników chłodniczych.

W rozdziale dziewiątym podano kierunki dalszych badań w zakresie doskonalenia konstrukcji wytwornic wody ziębniczej w celu osiągnięcia wyższych wskaźników efektywności.

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 odpowiadające 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 obowiązujących przepisów wprowadzających ograniczenia w sposobie postępowania z substancjami szkodliwymi dla środowiska. Usystematyzowano dokumenty legislacyjne i akty prawne w tym zakresie oraz dokonano ich analizy;
- **ocena przydatności obecnie stosowanych czynników chłodniczych** pod względem obowiązujących przepisów prawnych i ochrony środowiska. W oparciu o współczynniki ujmujące ich negatywny wpływ na środowisko naturalne wskazanie sposobów zwiększenia efektywności pracy instalacji oraz zagwarantowania bezpieczeństwa użytkowania;
- **przeprowadzenie doboru optymalnego czynnika chłodniczego** z wykorzystaniem wspomaganie wielokryterialnego, gdzie w wyniku przeprowadzonej analizy wytypowano optymalny czynnik chłodniczy, którym jest R290 i to on został wykorzystany w dalszym procesie badawczym;
- **opracowanie koncepcji i budowa autorskiego stanowiska badawczego**, które umożliwiło weryfikację wybranych komponentów układu chłodniczego wytwornicy wody lodowej;
- **przeprowadzenie systematycznych badań eksperymentalnych** dotyczących pracy układu chłodniczego w różnych warunkach eksploatacyjnych z wykorzystaniem czynnika chłodniczego R290 i dwóch roztworów wodno-glikolowych;
- **wykazanie, że zaprojektowana wytwornica wody ziemniczej**, działająca na ekologicznym czynniku chłodniczym jakim jest propan, spełnia wszystkie podstawowe wymagania założonej hipotezy;

- **porównanie wyników badań własnych z wielkościami opisującymi pracę dostępnych na rynku wytwornic wody lodowej** z wykorzystaniem czynników syntetycznych i naturalnych. Stwierdzono, że w stosunku do innych rozwiązań konstrukcyjnych osiągnięto znaczny wzrost współczynnika EER, co oznacza, że nastąpiło zmniejszenie kosztów eksploatacji i obniżenie zużycia energii elektrycznej w porównaniu do rynkowych agregatów;
- **potwierdzenie, iż możliwym jest zastosowanie naturalnego czynnika chłodniczego R290** w przemysłowej wytwornicy wody ziębniczej oraz skonstruowanie urządzenia zgodnie z obowiązującymi przepisami i wymaganymi sprawnościami energetycznymi z dostępnych na rynku komponentów.

Reasumując Doktorant, zgodnie z postawioną hipotezą pracy wykazał, że istnieje możliwość zastosowania przyjaznego środowisku i użytkownikom czynnika chłodniczego R290 w powszechnie stosowanych składowych układu chłodniczego wytwornic wody lodowej. Ponadto, w przypadku zaprojektowanego i wykonanego nowego urządzenia nastąpiło zmniejszenie kosztów eksploatacji i obniżenie zużycia energii elektrycznej w stosunku do obecnie produkowanych agregatów. Należy jednak zaznaczyć, że należy prowadzić dalsze prace badawcze, aby uzyskać maksymalną wartość współczynnika efektywności energetycznej SEPR powyżej 5,00 (obecnie jej wartość wynosi 4,51). 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, między innymi, powrotu do stosowania w praktyce przemysłowej naturalnych czynników chłodniczych, które posiadają niskie współczynniki potencjału globalnego ocieplenia (GWP).

Doktorant z dobrym skutkiem podjął próbę wykazania, że istnieje taka możliwość poprzez zastosowania naturalnego czynnika chłodniczego R290 (propanu). Takie działanie poprawia znacznie nie tylko wskaźniki ekologiczne, ale i równocześnie eksploatacyjne wskaźniki ekonomiczne. Opracowana koncepcja wytwornicy wody ziębniczej, oparta na ekologicznym czynniku termodynamicznym, stanowi istotny krok w kierunku zrównoważonego rozwoju technologii chłodniczych. Dzięki zastosowaniu ekologicznych czynników, system zmniejsza negatywny wpływ na środowisko naturalne w porównaniu do tradycyjnych urządzeń opartych na czynnikach chemicznych szkodliwych dla atmosfery.

Przedstawione wyniki badań wykazały dużą efektywność energetyczną z zachowaniem wymagań ekologicznych na najbliższe lata. Doktorant przeanalizował również potencjalne kierunki rozwoju oraz możliwość komercjalizacji opracowanego urządzenia w przemyśle chłodniczym, klimatyzacyjnym oraz w innych dziedzinach wymagających wytwarzania wody ziębniczej. Opracowana wytwornica wykazuje znaczący potencjał w zastosowaniach gospodarczych i przemysłowych, szczególnie w branżach, gdzie istotne jest podejście proekologiczne. Może znaleźć zastosowanie, między innymi, w chłodnictwie przemysłowym, gospodarczym, komercyjnym, klimatyzacji budynków użyteczności publicznej i w procesach technologicznych, które wymagają precyzyjnej kontroli temperatury.

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 prezentowana rozprawa doktorska w pełni spełnia wymagania stawiane aplikacyjności prowadzonych badań naukowych.

6. Uwagi krytyczne i dyskusyjne

Uwagi o charakterze merytorycznym

1. Na stronach 4 i 19 podano, że „... *znamionowy wskaźnik efektywności energetycznej (EER) oznacza wyrażony w kW ...*”. Należy wskazać, że wskaźnik EER jest bezwymiarowy, bo jako iloraz porównuje ze sobą wydajność chłodniczą z poborem mocy, a wielkości te są wyrażane w tych samych jednostkach miary.
2. W rozdziale 2.2 Doktorant bardzo szczegółowo na jedenastu stronach opisuje elementy instalacji chłodniczej wytwornic wody lodowej, w tym sprężarki i skraplacze. Niezrozumiałym jest dlaczego parownikom poświęcił tylko siedem linijek tekstu. Istnieje pytanie z czego to wynika, bo to przecież parowniki bezpośrednio chłodzą wodę w omawianym urządzeniu.
3. Na stronie 46 i 47 zmieniono zasadę oznaczania czynników chłodniczych. Prawidłowy sposób oznaczeń podano w Tabeli 9 na str. 38. Należy wskazać, że w oznaczeniach czynników chłodniczych 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. Na stronie 46 dwukrotnie zapisano oznaczenie czynnika R410a zamiast prawidłowego R410A. Ponadto na str. 47 jest tylko zapis R410. Dotyczy to również zapisu nazw czynników R404A R407C na stronach 51, 57, 67, 69 i 71. Należy zwracać uwagę na prawidłowe oznaczenia.
4. Na stronach 15 i 47 zamieszczono takie same tabele (Tabela 2 i Tabela 11). Drugą z nich należy usunąć powołując się na tę podaną wcześniej.
5. Autor zastosował w celu wyboru optymalnego czynnika chłodniczego dla projektowanego stanowiska badawczego wytwornicy wody żelaznej metodę wielokryterialnego wspomagania decyzji (SAW). W Tabeli 24 na str. 69 przedstawił wektory wag dla poszczególnych kryteriów. Uwydatnił ważność współczynnika GWP, a za mniej ważne uznał wartość stopnia palności i toksyczności. Brak jest uzasadnienia dla takiego postępowania. Istnieje też obawa, że przyjmując inne wartości wektora wag można uzyskać inny wynik końcowy prowadzonej analizy, niekiedy zgodny z oczekiwaniami badacza. To trzeba wyjaśnić i uzasadnić.
6. Na stronie 75 Doktorant wprowadził pojęcie „*temperatura punktu rosy parowania*”. Pojęcie to zazwyczaj używane jest przy opisie przemian powietrza wilgotnego. Trzeba wyjaśnić co to pojęcia oznacza w przypadku wrzenia czynnika chłodniczego. Czy jest to po prostu temperatura wrzenia czynnika?
7. Doktorant stosuje skróty myślowe, np. na stronie 99 podano określenie „*skraplanie chłodzone powietrzem*”, a na stronie 101 „*temperatura linii ssącej*”.
8. W wyniku przeprowadzonych prac projektowych i badawczych uzyskano współczynnik sezonowej sprawności energetycznej SEPR wysokotemperaturowych przemysłowych

agregatów chłodniczych pierwszego stopnia chłodzonych powietrzem do 400kW w wysokości 4.51. Wartość ta odpowiada wymaganiom stawianym do końca 2020 roku. Jest to niewątpliwie osiągnięcie Doktoranta, który sam zaprojektował i wykonał praktycznie prototyp nowego urządzenia. Dalsze prace modernizacyjne zapewne pozwolą osiągnąć wartość współczynnika SEPR na obecnie wymaganym poziomie 5.0. Jakie możliwości widzi Doktorant w tym zakresie?

Uwagi edytorskie

- ogólne

Należy podkreślić bardzo dobry poziom przygotowania rozprawy doktorskiej pod względem edytorskim. Zwraca uwagę wysoka jakość rysunków, formatowania, styl tablic i wzorów. Jednak w wielu miejscach tekstu brakuje przecinków. Dotyczy to w szczególności w wielu miejscach braku przecinka przed słowem „który”. Autor nie ustrzegł się również kilku innych błędów edytorskich i stylistycznych.

- szczegółowe

1. Na str. 9, 13 wiersz od góry jest: „Zasadniczej znaczenie dla łagodzenia zmian klimatycznych...”, powinno być „Zasadnicze znaczenie dla łagodzenia zmian klimatycznych....”.
2. Na str. 11, 4 wiersz od góry jest zapis: „...certyfikowaniem techników i firma mających kontakt”, powinno być „...certyfikowaniem techników i firm mających kontakt...”.
3. Na str. 21, 15 wiersz od dołu, jest zapis: „Stawiane wymogi współczynników wysokotemperaturowych...”. Powinno być: „Stawiane wymogi współczynnikom wysokotemperaturowych...”.
4. Na str. 25, 5 wiersz od dołu, jest zapis: „...czyli odwrócenie obiegu termodynamicznego ...”. Powinno być: „...czyli odwrócenie obiegu termodynamicznego ...”.
5. Na str. 35, 11 wiersz od góry, jest zapis: „Czynniki chłodnicze to substancje biorące udział w procesie wymiany ciepła w urządzeniu chłodniczym które pobiera ciepło przez odparowanie ...”. Powinno być: Czynniki chłodnicze to substancje biorące udział w procesie wymiany ciepła w urządzeniu chłodniczym, które pobierają ciepło przez odparowanie...”.
6. Na str. 37, 9 wiersz od góry jest zapis: „...trwające na wielkim obszarze nawet do aż dwóch miesięcy.”, powinno być „...trwające na wielkim obszarze nawet aż do dwóch miesięcy ...”.
7. Str. 51, 4 wiersz od góry jest zapis: „...Czynnik ten utrzymuje się w atmosferze przez kilka dni.”, powinno być: „Czynnik ten utrzymuje się w atmosferze przez kilka dni.”
8. Str. 67, 7 wiersz od góry jest zapis: „...zastosowana w celu wybory optymalnego czynnika chłodniczego...”, powinno być: „...zastosowana w celu wyboru optymalnego czynnika chłodniczego...”
9. Na str. 111, 13 wiersz od góry jest zapis „...cel wartości współczynnika SEPR jest do osiągnięcia.”, powinno być „...cel wartości współczynnika SEPR jest do osiągnięcia.”.
10. Na str. 111, 16 wiersz od góry jest zapis „...zaprezentowano w tabeli 37, ...”, powinno być „...zaprezentowano w tabeli 38,...”.

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 projektowych, badań eksperymentalnych i opracowania uzyskanych wyników. Obok wysokiego poziomu naukowego rozprawy, należy podkreślić duży stopień jej aplikacyjności. Oznacza to, że zaprezentowana rozprawa w pełni spełnia wymagania stawiane doktoratom wdrożeniowym. **Wnioskuje o przyjęcie pracy mgr inż. Sebastiana Śniegowskiego, 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.

Teemu Behelny