

Recenzja rozprawy doktorskiej  
mgr inż. Lawrenca Drojetzkiego nt.:  
***Wybór energooszczędnych systemów chłodzenia opartego na naturalnych  
czynnikach chłodniczych dla lodowisk zewnętrznych zadaszonych***

Opinia została opracowana na zlecenie Przewodniczącego Rady Naukowej Dyscypliny Inżynierii Środowiska, Górnictwa i Energetyki Wydziału Inżynierii Środowiska i Energetyki Politechniki Poznańskiej, prof. dr hab. inż. Zbigniewa Nadolnego, pismo nr WISIE.63.07.149.2024 z dnia 29.01.2024.

Promotorem rozprawy doktorskiej jest dr hab. inż. Mieczysław Porowski, prof. Politechniki Poznańskiej.

## **1. Zawartość rozprawy oraz ocena merytoryczna**

Recenzowana rozprawa doktorska obejmuje 99 stron, w tym 34 rysunki, 17 tabel, wykaz oznaczeń oraz spis wykorzystanej literatury zawierający łącznie 59 publikacji naukowych, książek, norm i materiałów pomocniczych. Spośród wspomnianych 59 pozycji, 46 to opracowania napisane w języku angielskim. Do rozprawy dołączono streszczenie w języku polskim i angielskim oraz załącznik zawierający 7 tabel z ważniejszymi założeniami oraz wynikami obliczeń.

Na początku pracy znajduje się spis ważniejszych oznaczeń, przy czym pod wzorami, wektorami i macierzami dodatkowo załączono opisy stosowanych symboli, co ułatwia czytanie pracy. Rozdział 1 to wprowadzenie do tematyki zagadnienia uzasadniające potrzebę podjęcia badań związanych z obniżaniem energochłonności systemów zaopatrzenia w chłód obiektów lodowisk. W rozdziale 2 autor systematyzuje obiekty lodowisk wraz ze stosowanymi standardami parametrów technologicznych. Dzieli tu instalacje chłodnicze na instalacje wykorzystujące czynniki chłodnicze syntetyczne omawiając po krótko każdy ze stosowanych czynników a także omawia obszernie amoniak i dwutlenek węgla jako czynniki chłodnicze naturalne, porównując je, podając ich właściwości, wymagania technologiczne instalacji oraz wymagania bezpieczeństwa. Dodatkowo autor skupia się na przykładowych obiegach chłodniczych wykorzystujących CO<sub>2</sub> oraz NH<sub>3</sub> w obiektach komercyjnych omawiając je szczegółowo pod względem stosowanych urządzeń i ich wymaganych parametrów. Podsumowując rozdział 2 Doktorant stwierdza, że istnieje potrzeba opracowania wytycznych dla projektantów pozwalających wybrać spośród wielu możliwych rozwiązań wariant instalacji chłodniczej optymalny dla danej lokalizacji oraz dla danych potrzeb chłodniczych. Autor również podkreśla fakt, że w literaturze przedmiotu istnieje mało opracowań dedykowanych lodowiskom, które podawałyby wytyczne dla projektantów oraz sposoby minimalizacji zużycia energii, stąd potrzeba podjęcia tematu.

W krótkim rozdziale 3 podany został problem badawczy oraz cele i tezy pracy. Sformułowano dwie tezy pracy. Pierwsza dotyczy możliwości opracowania narzędzia służącego wyborowi energooszczędnych systemów chłodzenia lodowisk zewnętrznych zadaszonych za pomocą strategii wykorzystującej analizę systemową i przegląd zupełny rozwiązań dopuszczalnych opartej na funkcji użytkowej jako wejściu, analizie ograniczeń oraz funkcji celu w postaci minimum zapotrzebowania na energię. W drugiej tezie autor twierdzi, że systemami energooszczędnymi dla lodowisk zewnętrznych zadaszonych są systemy chłodzenia wykorzystujące dwutlenek węgla jako czynnik chłodniczy.

W rozdziale 4 autor opisał narzędzie służące do podejmowania decyzji w sprawie wyboru optymalnego wariantu. Ta metoda została opracowana i opublikowana w roku 2019 przez Promotora pracy,

Profesora Mieczysława Porowskiego. Wykorzystuje rachunek macierzowy do tworzenia zbioru możliwych technicznie do wykonania wariantów rozwiązań systemów HVAC oraz następnie spośród tych rozwiązań pozwala wybrać wariant optymalny spełniający wymagania odpowiednio dobranych więzów - na przykład najmniejszej energochłonności systemu HVAC. Opracowana przez Profesora Mieczysława Porowskiego metoda nie dotyczyła zagadnienia projektowania i wyboru systemów chłodniczych dedykowanych lodowiskom. Podjęty przez doktoranta temat stanowi twórcze rozwinięcie idei Pana Promotora. Zaadaptowana metoda pozwala stworzyć zbiór możliwych technicznie do wykonania wariantów rozwiązań systemów chłodniczych dedykowanych zewnętrznym zadaszonym lodowiskom. Na układ wszystkich możliwych rozwiązań nakłada się więzy w postaci warunków ograniczających: technologicznych, higienicznych i środowiskowych, akustycznych, energetycznych, materiałowych, architektoniczno-konstrukcyjnych oraz bezpieczeństwa i niezawodności. Po odrzuceniu wariantów niedopuszczalnych pozostawia się zbiór wariantów dopuszczalnych, czyli takich, które są z punktu widzenia technicznego poprawne i możliwe do zrealizowania przy spełnieniu wymagań nałożonych wcześniej ograniczeń. Dla tego zbioru wybiera się jedno rozwiązanie - wariant optymalny, dla którego funkcją celu jest minimalizacja zużycia energii elektrycznej systemu. Takie podejście za pomocą rachunku macierzowego ma tę zaletę, że żadne spośród możliwych rozwiązań nie zostanie przypadkowo przeoczone w analizie.

W rozdziale 5 wybrano zbiór siedmiu dopuszczalnych, spełniających wymagania, systemów chłodniczych dla zewnętrznego zadashzonego lodowiska usytuowanego w Poznaniu poprzez eliminację pozostałych wariantów po uwzględnieniu ograniczeń. Dla tych siedmiu analizowanych wariantów systemu chłodniczego, Doktorant opracował schematy ich działania. W tym rozdziale Doktorant wykazał się biegłą znajomością i zrozumieniem sposobu działania systemów chłodniczych, ich parametrów pracy i ograniczeń oraz umiejętnościami biegłego projektanta.

Rozdział 6 podaje algorytm wyboru wariantu optymalnego spośród wspomnianych wcześniej siedmiu. Aby zoptymalizować warianty, należało wyznaczyć godzinowe zużycie energii przez każdy z systemów wykorzystując dane meteorologiczne dla typowego roku meteorologicznego w Poznaniu oraz dla każdej godziny zsumować obciążenia cieplne zyskami ciepła od konwekcji pomiędzy powietrzem zewnętrznym a powierzchnią płyty lodowiska, promieniowania pomiędzy powierzchnią zadashzenia a płytą lodowiska, przewodzenia ciepła od gruntu oraz technologii odnawiania powierzchni lodowiska poprzez okresowe zalewanie powierzchni lodu gorącą wodą. Zgodnie z opracowanym przez Doktoranta algorytmem, obliczone zostały godzinowe zapotrzebowania na chłód użytkowy dla każdego z siedmiu wariantów systemu chłodzenia. Następnie policzono godzinowe zapotrzebowania na energię elektryczną końcową do napędu urządzeń w każdym z analizowanych obiegów chłodniczych. Autor wykorzystał aproksymacyjne wzory na sprawności pomp obiegowych i sprężarek w zależności od sprężu czynnika chłodniczego, przy czym dla każdego obiegu chłodniczego dobrał sprężarki śrubowe bądź tłokowe tak, aby uzyskać największe efektywności. Obiegi chłodnicze pracowały przy różnych parametrach czy punktach pracy - konieczne więc było obliczenie przemian termodynamicznych w każdym z obiegów przy założonych parametrach parowników, skraplaczy oraz pozostałych elementów w obiegach. Autor szczegółowo opisał pracę każdego z siedmiu obiegów wykazując ponownie biegłą umiejętność projektowania układów chłodniczych. Dodatkowo zostały zdefiniowane dla dwóch systemów dwa podwarianty. Dla systemu 1 z CO<sub>2</sub>, bezpośrednim odparowaniem czynnika chłodniczego, eżektorami cieczowymi i parownikiem zasilanym pompowo przyjęto podwariant 1a ze standardowo stosowanymi nastawami ciśnienia skraplania oraz drugi podwariant 1b ze zoptymalizowanym wyznaczaniem ciśnienia skraplania stosujący dodatkowe sterowanie i większe skraplacze, ale w efekcie z obniżonym ciśnieniem końca skraplania. Podobne dwa podwarianty 2a i 2b zostały zastosowane w wariacie z systemem z CO<sub>2</sub> pośrednim z wykorzystaniem chłodziwa, z eżektorami cieczowymi i parownikiem zalany. Tak więc można przyjąć, że łącznie analizowano dziewięć systemów.

W rozdziale 7 podane zostały wyniki obliczeń rocznego zapotrzebowania na energię elektryczną do napędu pomp obiegowych, sprężarek i wentylatorów skraplaczy w wybranych wcześniej obiegach termodynamicznych z uwzględnieniem zmienności efektywności wytwarzania chłodu oraz godzinowych zmienności obciążeń chłodniczych. Obliczenia wykonano dla przyjętej temperatury lodu równej -6°C. Podano również wyniki obliczeń zależności COP systemów chłodniczych od temperatur zewnętrznych. Autor obszernie skomentował otrzymane wyniki obliczeń oraz wskazał, że energooptymalnym wariantem jest obieg chłodniczy 1b oparty na CO<sub>2</sub> - system z bezpośrednim

odparowaniem czynnika chłodniczego w płycie lodowiska, eźektorami cieczowymi i parownikiem zasilanym pompowo, z agregatem sprężarkowo-skraplającym z zewnętrzną chłodnicą gazu oraz chłodziwem w postaci ciekłego CO<sub>2</sub> w podwariancie ze zoptymalizowanym wyznaczaniem ciśnienia skraplania (przyjęty wariant o numerze 1b). W rozdziale tym autor wykonał również analizę wrażliwości sprawdzając czy wyniki optymalizacji i wybór wariantu zmieni się dla innych przyjętych temperatur lodu (-4°C oraz -8°C). Obliczenia wykazały, że wspomniany wcześniej wariant 1b jest nadal korzystny z punktu widzenia zapotrzebowania na energię oraz z punktu widzenia średniej efektywności COP. Po wykonaniu analizy wrażliwości Doktorant zauważył, że zapotrzebowanie systemu na energię przy temperaturze lodu również -8°C rośnie o około 30%, natomiast przy temperaturze lodu równej -4°C, maleje o około 27%. Wysznuo więc słuszny wniosek, że w ciągu tygodnia pracy instalacji na lodowisku, są godziny, w których z powodu małego bądź zerowego obciążenia lodowiska przez użytkowników, można sobie pozwolić na podniesienie temperatury lodu z -6°C do -4°C. Policzono więc dodatkowo dla wariantu optymalnego 1b oraz dla wariantu 2b (obu z użyciem CO<sub>2</sub>) sezonowe zużycie energii przy pracy instalacji ze zmienną temperaturą lodu uzyskując dodatkowo około 7% oszczędności energii w stosunku do wariantu ze stałą temperaturą lodu. Należy dodać, że wariant 1b w stosunku do wariantu klasycznego (chiller na R134A i obieg pośredni z glikolem bez sterowania temperaturą lodu) jest o około 60% mniej energochłonny, co stanowi istotny potencjał implementacyjny.

Po wykazaniu użyteczności opracowanego algorytmu w przedostatnim rozdziale 8 wykonano walidację algorytmu poprzez porównanie wyników obliczeń otrzymanych w pracy z wynikami otrzymanymi przy pomocy dostępnego narzędzia Pack Calculation Pro opracowanego przez duński instytut IPU. Doktorant wprowadził do programu wszystkie analizowane przez niego warianty obiegów chłodniczych i wykonał obliczenia w programie otrzymując tylko nieznaczne rozbieżności pomiędzy wynikami obliczeń w programie oraz na podstawie opracowanego algorytmu. Dodatkowo w celu walidacji swego algorytmu autor przeanalizował dane dostępne w literaturze dotyczące podobnych rozwiązań w obiektach lodowisk w Kanadzie. Autor niestety nie posiadał szczegółowych informacji o detalach systemów chłodniczych w przeanalizowanych pięciu obiektach a w związku z tym zaistniała konieczność przyjęcia pewnych założeń samodzielnie. Mimo tego, wyniki obliczeń wskazują ponownie, że system z użyciem CO<sub>2</sub> jest rozwiązaniem najbardziej efektywnym energetycznie przy układach z bezpośrednim odparowaniem, wskazują również na nieznaczne rozbieżności w wynikach otrzymanych przez autora oraz tych podanych w literaturze, które to rozbieżności w żadnym stopniu nie podważają wyników analizy.

W rozdziale 9 autor podsumował zawartość pracy oraz obszernie skomentował wyniki obliczeń. Stwierdził również, że w swej pracy usystematyzował podejście do problemu wyboru dopuszczalnych rozwiązań systemów chłodniczych oraz opisał aplikację dla lodowisk zewnętrznych zadaszonych z wykorzystaniem naturalnych czynników chłodniczych. Potwierdził również tezę, że systemy chłodnicze wykorzystujące CO<sub>2</sub> jako czynnik chłodniczy są energooszczędne dla lodowisk zewnętrznych zadaszonych w lokalizacji w klimacie umiarkowanym i chłodniejszym. Co więcej, stosowanie sterowania ciśnieniem skraplania oraz zmiennej temperatury lodu prowadzi do dodatkowych oszczędności, co jest wskazówką dla istniejących oraz projektowanych obiektów.

Na końcu pracy zamieszczono 7 załączników, z których imponujące pierwsze trzy dotyczą danych wejściowych do stworzonego przez Doktoranta algorytmu, których powstanie wymagało od autora wiedzy i doświadczenia w dziedzinie chłodnictwa i procesu projektowania systemów chłodniczych w szczególności stosowanych w lodowiskach.

Uważam, że przedstawiony układ rozdziałów w pracy jest czytelny a praca ma logiczny układ. Jest napisana rzeczowo i w sposób zrozumiały. Język w pracy jest poprawny, znalazłam nieliczne błędy edytorskie. Praca zawiera wszystkie wymagane elementy rozprawy doktorskiej, ma charakter naukowo-badawczy z naciskiem na część analityczną a także aplikacyjną.

## **2. Uwagi krytyczne i dyskusyjne**

W rozprawie zaprezentowano opracowaną przez Promotora pracy, Profesora Mieczysława Porowskiego, metodę podejmowania decyzji - wyboru energooszczędnych rozwiązań systemów HVAC, którą następnie Doktorant zmodyfikował i zaakceptował tworząc algorytm wyboru możliwych do realizacji systemów chłodniczych zaaplikowany dla lodowisk zewnętrznych zadaszonych oraz spośród możliwych rozwiązań wyboru energooszczędnego systemu. Zmodyfikowanie metody

i stworzenie takiego algorytmu wymagało niewątpliwie znacznego nakładu pracy oraz zdobycia wiedzy z kilku różnych dziedzin i stanowi oryginalne i twórcze osiągnięcie Doktoranta. Poniższe uwagi, mające w dużej mierze charakter komentarzy bądź sugestii, nie umniejszają mojej pozytywnej oceny rozprawy doktorskiej i w znacznej mierze mają charakter porządkowy, formalny bądź dyskusyjny.

1. Wzór (4.6) - jest:  $g_{Tk, Ak, Ek, Mk, Akk, Bnk}(X_j)$ , natomiast zgodnie z wymienionymi powyżej ograniczeniami brakuje ograniczeń higienicznych i środowiskowych, które zostały oznaczone przez  $H_k$ , powinno być więc:  $g_{Tk, Hk, Ak, Ek, Mk, Akk, Bnk}(X_j)$ . Z kolei pod wzorem (4.6) te ograniczenia zostały oznaczone jako  $K$ , nie  $H$
2. Rysunek 18 - powinno być: zyski ciepła od gruntu, nie: zyski ciepła do gruntu.
3. We wzorze (6.1) prawdopodobnie nie zgadzają się jednostki - pierwszy składnik sumy jest wyrażony w  $W/m^2$ , natomiast jednostka drugiego składnika jest dość enigmatyczna, ponieważ do wzoru podstawiono od razu wartości bez podania wcześniej wzoru na symbolach z dokładnym opisem wielkości i jednostek.
4. Wzór (6.2) - nie podano źródła literaturowego dla tego wzoru. W normie PN-EN ISO 6946 - jest podany podobny wzór na konwekcyjny współczynnik przejmowania ciepła przy powierzchniach zewnętrznych:  $h = 4 + 4 v$ , więc wzór wydaje się prawidłowy. Pozostaje więc pytanie dlaczego przyjęto prędkość powietrza nad lodem równą  $1 \text{ m/s}$  i czy nie jest to zbyt mała prędkość?
5. Wzór (6.5) - brakuje zakończenia nawiasu kwadratowego. Ponownie jak w (6.1), wzór ten dla bardziej uporządkowanego opisu matematycznego powinien być najpierw podany na symbolach i objaśnieniach z jednostkami, a później na podstawionych wartościach, byłby wtedy bardziej czytelny nawet, jeżeli dotyczy podstawowych procesów. Wynikową jednostką w tym wzorze jest kilodżul.
6. Wzór (6.3) jest z kolei wyrażony w watach, natomiast Doktorant przy liczeniu zysków mocy cieplnej dodaje do siebie zyski od konwekcji, od promieniowania, od gruntu oraz od odnawiania powierzchni lodu. Tak więc należałoby uporządkować podane wzory tak, aby wynikowe jednostki z każdego były takie same.
7. Dlaczego w algorytmie na rysunku 18 jest podana wartość 8760, czyli ilość godzin w roku, skoro przyjęto do analizy, że sezon pracy lodowiska w ciągu roku wynosi 171 dni, czyli 4104 godziny?
8. Rysunki 28 i 29 są mało czytelne, przydałoby się wprowadzenie linii kolorowych.

Pragnę podkreślić, że powyżej zawarte uwagi nie wpływają na moją pozytywną ocenę pracy i mają w dużej mierze charakter sugestii, które pozwoliłam sobie wypunktować mając na uwadze potencjalne wykorzystanie materiału zawartego w rozprawie w przyszłych publikacjach Doktoranta.

### **3. Uwagi końcowe**

Praca jest starannie zredagowana, stosowana jest poprawna nomenklatura naukowa. Zwraca uwagę wyczerpujący opis przygotowanych przez Doktoranta założeń do algorytmu pozwalający na szczegółowe przeanalizowanie materiału będącego głównym przedmiotem pracy. Podane uwagi krytyczne mają charakter dyskusyjny bądź porządkowy i mam nadzieję, że będą traktowane raczej jako pomoc w zakresie dalszego wykorzystania prac badawczych. Uwagi te nie pomniejszają wartości merytorycznej opiniowanej rozprawy.

### **4. Wniosek do Rady Naukowej dyscypliny Inżynieria Środowiska, Górnictwo i Energetyka na Wydziale Inżynierii Środowiska i Energetyki Politechniki Poznańskiej**

Przedstawiona do oceny rozprawa doktorska jest oryginalnym osiągnięciem naukowym Doktoranta, wnosi wkład poznawczy oraz metodyczny i jest wartościową pracą naukową. Doktorant wykazał się umiejętnością formułowania problemów badawczych i rozwiązywania ich przy użyciu właściwych metod. W moim przekonaniu przedstawiona do recenzji rozprawa jednoznacznie spełnia zwyczajowe ramy stawiane pracom doktorskim. Co więcej, posiada walory aplikacyjne, gdyż opracowany przez Autora algorytm obliczeniowy może służyć do wykonywania symulacji przy procesach decyzyjnych związanych zarówno z budową nowych jak i modernizacją istniejących obiektów lodowisk. Doktorant

opanował warsztat pracy badawczej w dziedzinie nauk inżynieryjno-technicznych. Zaprezentowana w rozprawie analiza stanowi rozwiązanie zadania naukowego i w moim przekonaniu spełnia wymagania stawiane rozprawom doktorskim.

Biorąc powyższe pod uwagę stwierdzam, że:

1. Rozprawa doktorska mgr inż. Lawrenca Drojetzkiego nt.: *Wybór energooszczędnego systemu chłodzenia opartego na naturalnych czynnikach chłodniczych dla lodowisk zewnętrznych zadaszonych* spełnia wymagania Ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz. U. 2018, poz. 1668 z późn. zmianami i aktami powiązanymi) i wnoszę o dopuszczenie jej do publicznej obrony.
2. Zakres rozważań rozprawy kwalifikuje ją do dyscypliny naukowej: inżynieria środowiska, górnictwo i energetyka.