

Prof. dr hab. inż. Jan Danielewicz

Wrocław 30.03.2024 r.

Politechnika Wroclawska

Wydział Inżynierii Środowiska

Katedra Klimatyzacji, Ogrzewnictwa, Gazownictwa i Ochrony Powietrza

W7/K41

Recenzja rozprawy doktorskiej Pana mgr. inż. Lawrence Drojetzkiego pt: "Wybór energoptymalnego systemu chłodzenia opartego na naturalnych czynnikach chłodniczych dla lodowisk zewnętrznych zadaszonych"

1. Podstawa formalna opracowania recenzji

Niniejsza recenzja została opracowana na podstawie pisma Dziekana Wydziału Inżynierii Środowiska i Energetyki Politechniki Wrocławskiej Prof. Zbigniewa Nadolnego Nadolnego

z dnia 29.01.2024

2. Przedmiot recenzji

Przedmiotem recenzji jest rozprawa doktorska pt: Wybór energoptymalnego systemu chłodzenia opartego na naturalnych czynnikach chłodniczych dla lodowisk zewnętrznych zadaszonych" autorstwa mgr inż. Lawrence Drojetzkiego. Promotorem rozprawy jest Pan dr hab. inż. Mieczysław Porowski, prof. uczelni. Przedstawiona do recenzji praca składa się z 9-ciu rozdziałów, bibliografii i wykazu załączników.

Praca rozpoczyna się streszczeniem w języku polskim oraz w języku angielskim oraz zawiera wykaz ważniejszych oznaczeń.

Rozdział 1-szy rozprawy zawiera wprowadzenie i genezę podjęcia badań. Doktorant zwrócił uwagę na wysoką energochłonność systemów chłodzenia oraz zainteresowanie zmianami technologicznymi skierowanymi m.in. na wykorzystaniu naturalnych czynników chłodniczych.

Rozdział 2-gi dotyczy opisu stanu badań nad systemami wytwarzania i dystrybucji chłodu dla lodowisk. Wskazał on, że w warunkach polskich najczęściej występują lodowiska hokejowe lub zbliżone do nich. Doktorant również podał wymagane temperatury lodu odpowiednio dla dyscyplin sportowych uprawianych na lodowiskach, przykładowo dla hokeja pożądana temperatura płyty lodowej to $-6,7^{\circ}\text{C}$ a $-5,6^{\circ}\text{C}$. Dla podanych warunków odnośnie temperatur lodowisk doktorant wskazał, że temperatury chłodziwa powinny być 3 do 6°C niższe. Przy dużych zyskach ciepła różnica temperatur w takich obiektach wynieść nawet 11°C .

Inną kategorią są lodowiska zewnętrzne. ich zapotrzebowanie na energię są zmienne, np. zależne od nasłonecznienia itp.

Struktura instalacji chłodniczych dla lodowisk zawiera instalację wytwarzania chłodu-oraz instalacje dystrybucji chłodu. Chłodziwem krążącym w instalacji zatopionej w betonowej płycie pod warstwą lodu stosuje się w większości instalacji solanki oraz wodne roztwory glikoli. Jako czynniki chłodnicze wykorzystuje się najczęściej R22, R404a R507 oraz R717. W krajach europejskich zakazane jest wykorzystywanie czynnika R22 ze względu na niedopuszczalny współczynnik ODP >0 ze względu na właściwości niszczące warstwę ozonową

W nowych instalacjach rekomendowane są bardziej ekologiczne czynniki chłodnicze tj, R744,R717,R290,R134a, R513 A oraz 1234yf przy czym główny naciska kładzie się na stosowaniu czynników chłodniczych naturalnych zwłaszcza R717 i R744.

W rozdziale tym autor opisał czynniki chłodnicze z grupy HFC są wciąż bardzo rozpowszechnione. W pracy zostały one zestawione w tabeli 1, str 14.

W rozdziale e tym autor wskazał czynniki, które ze względu na wpływ na środowisko nie mogą być stosowane e w krajach UE (np., R22)

Jednocześnie autor wskazał, że najbezpieczniejszą ekologiczną i opcją przyszłościową jest stawianie na czynniki naturalne tj. amoniak czy CO₂.

W rozdziale tym doktorant wykazał na podstawie przeglądu literatury, że w klimacie umiarkowanym zużycie energii był mniejszy 0 8,4-8,6 % w stosunku do pozostałych systemów natomiast w klimacie ciepłego w systemie kaskadowym (R717/R744) zużycie energii było mniejsze o 9,2-11,6 % w stosunku do pozostałych systemów. Na stronie 25 pracy autor stwierdził m.in. że jako obiektywne i powszechnie stosowane kryterium optymalizacji energetycznej systemów chłodniczych przyjęto w analizie średnioroczne COP.

Rozdział 3-ci opracowania to problem badawczy, cel i zakres pracy

W rozdziale tym autor stwierdził, iż -cyt:”Na podstawie przeprowadzonych badań i analiz identyfikuje się problem badawczy, w którym jest brak kompleksowej metody wyznaczania energooszczędnych struktur systemów chłodniczych opartej na funkcji użytkowej, w warunkach ograniczających i funkcji celu w aplikacji dla lodowisk w tym również lodowisk zewnętrznych zadanych. W konsekwencji mając na uwadze aspekt ekologiczny związany z czynnikami chłodniczymi

Biorąc wszystkie rozważane aspekty doktorant sformułował cel badawczy którym brzmi;

„Opracowanie procedury optymalizacyjnej wyznaczenia energooszczędnie systemu chłodzenia opartego na naturalnych czynnikach chłodniczych, dla lodowisk zewnętrznych zadanych z wykorzystaniem analizy systemowej i metod symulacyjnych jako narzędzi badawczych.”

Cele użytkowe pracy obejmują:-wyznaczenie energooszczędnych struktur systemów chłodniczych dla lodowisk spełniających obecne wymagania środowiskowe (GPWP,2500)wykorzystujące w konsekwencji naturalne czynniki chłodnicze.

Rozdział 4-ty Zagadnienie wyboru energooszczędnego systemu chłodniczego.

Doktorant wskazał w tym rozdziale, że w literaturze w dotychczasowych zagadnieniach optymalizacyjnych systemów chłodniczych i klimatyzacyjnych punktem wyjścia było zdefiniowanie zbioru wariantów dopuszczalnych, spełniających funkcję użytkową w sposób uznaniowy. Dla tych systemów wyznaczano funkcję celu -minimum zapotrzebowania na energię. Procedura wyznaczania zbioru wariantów dopuszczalnych nie była określana. spowodować to mogło nieświadome pominięcia wariantów, które mogły okazać się bardziej odpowiednimi dla danego zastosowania.

Rozdział 5-ty dotyczy wyboru energoptymalnego systemu chłodniczego dla lodowiska- W zaprezentowanej metodologii bilans parownika dla odbioru chłodu stanowi z jednej strony założenie technologiczne i jest funkcją temperatury powietrza zewnętrznego natomiast z drugiej strony jest elementem modelu symulacyjnego. Chwilowe wynikowe obciążenia parownika -jako element wyjściowy modelu symulacyjnego przedstawione są w wynikach obliczeń symulacji obciążeń chłodniczych (rozdział 6.1)

Założenia technologiczne implikują podział odbiorników chłodu systemu chłodniczego na strefy normowanych parametrów stałych oraz ich zakres . Przykładowy podział na strefy normowanych parametrów pokazano w tabeli 3 (str.40).W punkcie 5.3 przedstawiono analizę systemową, zawierającą zbiór wariantów dopuszczalnych. Opisano określenie zmiennych decyzyjnych oraz wyznaczenie zbioru wszystkich możliwych wariantów systemu chłodniczego co jest fragmentem ogólnego algorytmu metody wyboru energoptymalnego systemu chłodniczego przedstawionego na rys.8 i 9.

W rozdziale tym autor wyjaśnił m.in. zagadnienia i sposób podejścia do eliminacji zmiennych , Akceptowalne są te zmienne decyzyjne, które wpływają na modele symulacyjne. Parametry stałe normowane nie podlegają eliminacji.

Rozdział 6-ty poświęcony jest modelom symulacyjnym

Algorytm wyboru energoptymalnego systemu chłodniczego przedstawiony został na rysunku 17 (str. 53.)

Algorytm wyboru energoptymalnego systemu chłodniczego polega na wyznaczeniu zapotrzebowaniu na energię dla każdego z rozpatrywanych systemów chłodniczych ϵ analizowanych dla każdej godziny roku z osobna (metoda przeglądu zupełnego wariantów dopuszczalnych). Wariant o najniższym rocznym zapotrzebowaniu na energię (najwyższym średniorocznym COP) uznawany jest za wariant optymalny.

W obliczeniach symulacyjnych jako obiekt referencyjny wybrano lodowisko o standardowych wymiarach tj, 25,9 m szerokości na 61 m długości i zaokrąglonych kształtach. Powierzchnia tafli lodu wynosi 1517,88 m².

Temperaturę lodu przyjęto zgodnie z warunkami wymaganymi dla rozgrywek hokejowych wynoszącą -6°C, a grubość lodu równą 32 mm. Założono, iż lodowisko nie będzie posiadać ścian zewnętrznych, a jedynie będzie przykryte dachem o lekkiej konstrukcji stalowej celem zabezpieczenia tafli przed bezpośrednim promieniowaniem słonecznym oraz opadami atmosferycznymi.

Założono, iż lodowisko będzie czynne w okresie, w którym średnie dobowe temperatury zewnętrzne wynoszą mniej niż 10°C. Jako punkt rozpoczęcia przygotowania płyty przyjęto dzień 12.10, godz. 00:00. Tafla lodowa z temperaturą wymaganą -6°C powinna zostać utworzona w ciągu co najmniej 48 h. Czas trwania sezonu określono do dnia 31.03, co skutkuje 171 dniami operacji. W tym czasie, układ chłodniczy funkcjonuje nieprzerwanie dla zachowania zadanej temperatury lodu.

W rozdziale 6.2.2 przedstawiono Algorytm wyznaczania obciążeń chłodniczych Bilans parownikowy wykonano w krokach godzinowych zakładając, iż w tym czasie występuje stan quasi-ustalony. Płytę lodowiska rozpatrywano jako magazyn energii, na który oddziałują warunki zewnętrzne, a nadmierne zyski ciepła są kompensowane przez instalację chłodniczą.

Symulacja była wykonana dla klimatu kontynentalnego wilgotnego z latem reprezentowanego przez miasto Poznań.

Rozdział 7 FUNKCJA CELU – WARIANT OPTYMALNY

W rozdziale tym doktorant w ramach analiz 7-miu systemów chłodniczych przeprowadził dwie symulacje. Pierwsza symulacja dotyczyła symulacji zapotrzebowania na energię dla poszczególnych systemów w trakcie całego roku użytkowania przy uwzględnieniu zmienności sprawności wytwarzania chłodu jak również uwzględniono zmienny profil obciążeń chłodniczych.

Druga symulacja polegała na analizie zmienności sprawności systemów w funkcji zmiany temperatur zewnętrznych w zakresie -5 °C-do +20°C. Rezultaty pierwszej z analiz przedstawiono w tab. 10 oraz na rysunkach 23-25.

Na podstawie przeprowadzonej analizy zapotrzebowania na energię elektryczną w ciągu sezonu dla warunków klimatycznych miasta Poznania doktorant wysnuł następujące wnioski;

Roczne zapotrzebowanie na energię elektryczną podlega znaczącej zmienności w zależności od systemu, który zostanie zastosowany. Autor porównał analizowane systemy pod względem zapotrzebowania na energię i podał dane liczbowe.

Wyniki płynące z analizy świadczą o bardzo szerokiej rozpiętości zapotrzebowania na energię dla systemów chłodniczych realizujących tę samą funkcję użytkową. W zastosowaniach komercyjnych, uzyskane wyniki stanowią istotną wartość dla użytkowników istniejących obiektów tego typu oraz inwestorów planujących nowe realizacje, gdyż nie tylko w sposób ilościowy, ale również jakościowy zostały określone różnice pomiędzy zapotrzebowaniem na energię elektryczną dla szeregu różnych systemów zaopatrzenia w chłód dla płyty lodowiska.

2. Systemy wykorzystujące bezpośrednie odparowanie czynnika chłodniczego są zawsze korzystniejsze od swoich odpowiedników z wykorzystaniem chłodziw pośredniczących bez przemiany fazowej, toteż właśnie takie systemy zdaniem doktoranta powinny być priorytetowo rozpatrywane przy budowie nowych bądź gruntownej renowacji istniejących obiektów. W przypadku systemów z CO₂ zapotrzebowanie na energię dla systemów DX w porównaniu do IX było mniejsze o odpowiednio 22,6% i 25,6% dla klasycznego i usprawnionego systemu. Porównując w tym samym kontekście systemy z R134a (n_g=3 vs. n_g=4) oraz amoniakalne (n_g=6 vs n_g=7) dla systemów DX uzyskano zapotrzebowanie mniejsze o odpowiednio 11,1% i 11,4%. Podsumowując – każdorazowo wykorzystanie systemu z bezpośrednim odparowaniem czynnika chłodniczego powodowało podniesienie temperatury odparowania czynnika chłodniczego oraz ograniczenie mocy pomp, co prowadziło do znaczących oszczędności energii.

Rozdział 8 WALIDACJA WYNIKÓW SYMULACYJNYCH

Temat pracy doktorskiej dotyczy wyboru optymalnego pod względem energetycznym systemu chłodzenia lodowisk zewnętrznych zadaszonych z wykorzystaniem naturalnych czynników chłodniczych. Jest to zatem opracowanie o charakterze analizy całościowych systemów, nie zaś wyłącznie fragmentów instalacji przeanalizowano działanie szeregu różnych rodzajów instalacji chłodniczych wielkoskalowych. Jak stwierdził autor opracowania, z przyczyn oczywistych, w związku z tak kompleksowym charakterem opracowania nie jest możliwe wykonanie klasycznej walidacji modelu symulacyjnego poprzez wykonanie pomiarów eksperymentalnych na istniejących obiektach odpowiadających modelowi. Wykonalne natomiast jest odniesienie uzyskanych na drodze modelowania rezultatów do danych dostępnych w branżowej literaturze naukowej oraz technicznej, a w szczególności do danych dotyczących zapotrzebowania na energię zbliżonych obiektów lub ich składowych do tych poddanych analizie. Aby wykonać takowe porównanie należy dokonać porównawczych obliczeń z wykorzystaniem stworzonego modelu dla innego zestawu danych wejściowych i przyrównać uzyskane wyniki do wyników opisanych w literaturze.

Możliwe również jest porównanie działania stworzonego modelu symulacyjnego z innymi, powszechnie dostępnymi narzędziami symulacyjnymi. Do tego celu, wykorzystano narzędzie symulacyjne Pack Calculation Pro.

Jest to narzędzie symulacyjne stworzone przez duński instytut IPU. Został zaprojektowany do porównywania różnych projektów systemów, strategii sterowania i czynników chłodniczych dla danego projektu, poprzez obliczanie rocznego zużycia energii, a także kosztów cyklu życia (LCC) i całkowitego równoważnego wpływu na ocieplenie (TEWI).

Program dysponuje profilami obciążeń chłodniczych i danymi pogodowymi. Jest zaopatrzony w sprawdzone wartości domyślne dla większości współczynników i parametrów, ale umożliwia również własną konfigurację, jak również wprowadzanie własnych profili obciążeń. Główną zaletą oprogramowania jest kompleksowa baza danych rzeczywistych sprężarek, utrzymywana we współpracy z producentami OEM, umożliwiająca porównanie wydajności różnych produktów przy użyciu jednej definicji warunków pracy.

Celem porównania wyników obliczeń opisanych w punkcie 7.1 z rezultatami analizy uzyskiwanymi z programu Pack Calculation Pro (PCP) zaimplementowano do programu profil obciążeń chłodniczych zbieżnym z profilem przedstawionym w punkcie 6.3. Symulację przeprowadzono dla tych samych typów sprężarek oraz założeń odnośnie przemian termodynamicznych czynnika chłodniczego, które zostały wybrane do analizy przez autora. Obliczenia wykonano w wersji programu 5.3.7. dla danych klimatycznych miasta Poznania, które znajdują się w bazie IW2 i są zbliżone do danych, z których korzystał autor we własnej analizie.

Wyniki symulacji w programie zestawiono z wynikami uzyskanymi przez autora.

Na rys.32 autor pokazał względne różnice w wynikach uzyskanych między wariantem bazowym a pozostałymi wariantami z wykorzystaniem programu PCP oraz w analizie własnej autora. Z zestawienia tego wynika iż z jest bardzo dobra zbieżność wyników.

ROZDZIAŁ 9-ty podsumowanie pracy

Praca dotyczy sformułowanego problemu badawczego, którym jest brak kompleksowej metody wyznaczenia energooszczędnych struktur systemów chłodniczych opartej na funkcji użytkowej przy uwzględnieniu funkcji celu (minimum zapotrzebowania na energię) w szczególności ukierunkowanych na lodowiska zewnętrzne zadaszone.

W konsekwencji celem badawczym rozprawy doktorskiej było opracowanie procedury optymalizacyjnej wyznaczenia energooszczędnego naturalnych czynników chłodniczych optymalnego systemu chłodzenia opartego na naturalnych czynnikach chłodniczych, Autor rozprawy doktorskiej przyjął do swoich analiz zadaną funkcję użytkową systemu chłodniczego dla lodowiska zadaszonego jak jest normowanie temperatury lodu z góry określonym przedziale temperatur od $-2,5^{\circ}\text{C}$ do -8°C . Następnie autor korzystał z zestawu zmiennych decyzyjnych wyłaniano wszystkie możliwe warianty systemów chłodniczych do normowania stałych. Autor wyodrębnił 7 dopuszczalnych struktur, które zostały zaimplementowane do modeli symulacyjnych i na podstawie

analiz wskazywał energoptymalny system (funkcja celu to minimum zapotrzebowania na energię przy wykorzystaniu naturalnych czynników chłodniczych.

Rozdział 10-ty Bibliografia

Rozdział Bibliografii autor powołuje się na 74 pozycje literaturowe

Rozdział 11-ty -Załączniki

Autor zamieścił 7 załączników w formie zestawień tabel „

Uwagi i zapytania

Recenzowana rozprawa doktorska Pana mgr. inż. Lawrenca Drojetzkiego pt: Wybór energoptymalnego systemu chłodzenia opartego na naturalnych czynnikach chłodniczych dla lodowisk zewnętrznych zadaszonych jest opracowana kompleksowo i dobrze uporządkowana. Na podkreślenie zasługuje jasno sprecyzowana funkcja celu w obliczeniach symulacyjnych. Usytuowane podejście do problemu pozwala to uniknąć często eliminacji rozpatrywanych wariantów rozwiązań systemów chłodzenia dla lodowisk, które mogą się okazać szczególnie wartościowymi. Również należy podkreślić analizę czynników chłodniczych naturalnych CO₂, Amoniak, które okazały się godnymi zastosowań a szczególnie z korzyścią dla środowiska.

Uwagi i zapytania do autora

Analizując wyniki analiz autora, mam następujące zapytania:

1. W równaniach bilansowych dla lodowisk występują zyski ciepła od promieniowania słonecznego, Analizowane lodowisko jest to lodowisko zewnętrzne zadaszone bez ścian zewnętrznych, Moje zapytanie brzmi:
Jak wpływało promieniowanie słoneczne na bilans lodowiska? Promieniowanie słoneczne pochodziło tutaj od promieni słonecznych wpadających przez boczne powierzchnie (prześlady pomiędzy barierą boczną lodowiska a dachem,) Czy autor analizował wpływ promieniowania padającego takie dane były analizowane przez autora? Jeżeli tak to jaki strumień energii padał na płytę i jaki to miało wpływ na bilans? Jeżeli tak to proszę spróbować szacunkowo określić te wartości i czy można stwierdzić, jaki wpływ i w jakim zakresie miało to wpływ na bilans energii dla płyty lodowiska.?
- 2, W równaniach bilansowych dla lodowiska występuje współczynnik wnikania ciepła h.
równanie (6.1)

Poszczególne składowe bilansu zostały wyznaczone z następujących zależności.

$$Q_{cv} = h(t_a - t_i) + \left[K(X_a - X_i) \left(2582 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \right) \left(18 \frac{\text{g}}{\text{mol}} \right) \right] \quad (6.1)$$

gdzie:

h – konwekcyjny współczynnik wymiany ciepła, $\text{W}/(\text{m}^2\text{K})$

K – współczynnik wymiany ciepła (masowy), założono $0,23 \text{ g}/(\text{s}\cdot\text{m}^2)$ (ASHRAE, 2017)

t_a – temperatura powietrza, $^{\circ}\text{C}$

t_i – temperatura lodu, $^{\circ}\text{C}$

X_a – molowy udział pary wodnej w powietrzu ($\text{kg mol} / \text{kg mol}$)

X_i – molowy udział wody w nasyconym lodzie

$$h = 3,41 + 3,55V \quad (6.2)$$

gdzie:

Mam zapytanie, założone była prędkość powietrza nad taflą na poziomie 1 m/s. Czy analizował Pan wpływ zmiany wartości założonej prędkości przepływu powietrza nad taflą na bilans energii dla lodowiska? Jeżeli tak czy możliwe jest oszacowanie wpływu prędkości na wynik bilansu?

Drobne niedociągnięcia redakcyjne w pracy dotyczą np. pominięcia litery w słowach itp.. Te uwagi wskażę doktorantowi

Wniosek końcowy

Recenzowana rozprawa Pana mgr inż. Lawrence Drojetzki jest rozprawą bardzo dobrze opracowaną, usystematyzowaną, z jasno sprecyzowanymi funkcjami celu w zagadnieniach optymalizacyjnych. Jest to szczególnie cenne w aspekcie rozwoju naukowej dyscypliny inżynieria środowiska, górnictwo i energetyka.

Podsumowując, recenzowana rozprawa doktorska Pana mgr inż. Lawrence Drojetzki stanowi oryginalne rozwiązanie problemu naukowego mieszczące się w zakresie dyscypliny inżynieria środowiska, górnictwo i energetyka. Osiągnięcie naukowe spełnia wymogi stawiane pracom doktorskim określone w Prawie o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz.U. z dnia 20 lipca 2018r z późniejszymi zmianami).

Na tej podstawie wnoszę o dopuszczenie rozprawy Pana Lawrence Drojetzki do publicznej obrony.



