

Prof.dr hab.inż. Janusz Kotowicz
Instytut Maszyn i Urządzeń Energetycznych
Wydział Inżynierii Środowiska i Energetyki
Politechnika Śląska
Ul. Konarskiego 18, 44-100 Gliwice
e-mail: janusz.kotowicz@polsl.pl

Adres domowy:
ul. Sikorskiego 21
44-120 Pyskowice

Recenzja rozprawy doktorskiej
mgr inż. Piotra Pyrki
pt. „Badania i optymalizacja pracy trójzłożowej chłodziarki adsorpcyjnej
w układzie trigeneracji”

A. WPROWADZENIE

Postępujący rozwój cywilizacji na świecie powoduje wyraźny wzrost zapotrzebowania na energię, z której coraz większy udział przypada na zaspokojenie potrzeb w zakresie chłodu. Większość urządzeń wytwarzających go, napędzanych jest elektrycznością. Wyjątek tutaj stanowią chłodziarki adsorpcyjne i absorpcyjne napędzane ciepłem. W okresie letnim, kiedy jest duże zapotrzebowanie na chłód, jednocześnie jest olbrzymia nadwyżka ciepła w systemach ciepłowniczych, stąd uzasadnionym staje się poszukiwanie dróg jego utylizacji. Stosowanie w okresie letnim wyłącznie chłodziarek sprężarkowych przyczynić się może do black outu.

W okresach letnich temperatura wody sieciowej jest obniżana do ok. 75°C, co jest wystarczające aby zapewnić odbiorcom ciepłą wodę użytkową. Wykorzystanie strumienia ciepła o tej temperaturze do produkcji chłodu możliwe jest przy użyciu tylko chłodziarek adsorpcyjnych. Dodatkowo z uwagi na to, że czynnikiem chłodniczym w urządzeniach adsorpcyjnych jest woda, są one przyjazne środowiskowo i nieemisyjne. W ich budowie nie ma części ruchomych, co sprawia, że są łatwe w obsłudze i niemalże bezawaryjne w porównaniu do chłodziarek sprężarkowych. Liczba ich zastosowań nie jest jednak wielka i wymagają poprawy charakterystyk efektywności, także termodynamicznej. Uwzględniając powyższe, tematykę pracy doktorskiej mgr inż. P. Pyrki należy uznać za ważną z poznawczego i użytecznego charakteru prac naukowo-badawczych.

WG1PW/1241/2019

Wydział Mechaniczno-Energetyczny

Wpłynęło dnia12.07.2018r.....

B. ZAKRES ROZPRAWY

Praca doktorska mgr inż. Piotra Pyrki zawiera łącznie 108 stron, na które składa się 8 rozdziałów merytorycznych, spis treści, wykaz oznaczeń, streszczenie pracy, literatura oraz spis tabel.

W recenzowanej rozprawie zasadniczo można wyróżnić 3 części. Pierwsza to część teoretyczna, związana z budową modelu matematycznego chłodzenia adsorpcyjnego i jego weryfikacją, druga to część eksperymentalna, trzecia związana jest z analizą systemową wykorzystania chłodziarek adsorpcyjnych.

Rozdział 2-gi obejmuje tezę i zakres pracy.

Rozdział 3-ci zawiera wybrane zagadnienia chłodnictwa adsorpcyjnego. Autor wyprowadza tutaj zależności i wyznacza wartości współczynnika wydajności chłodniczej dla obiegów porównawczych chłodziarek. Główną uwagę skupia w dalszej części tego rozdziału na różnych konfiguracjach chłodziarek adsorpcyjnych, szczegółowo analizując ich cykle pracy.

W rozdziale 4-tym mgr inż. Piotr Pyrka pokazał 0-wymiarowy model matematyczny chłodziarki adsorpcyjnej. Pozwala on wyznaczyć w oparciu o bilanse masy i energii parametry wydajnościowe urządzenia tj.: generowaną moc chłodniczą i współczynnik wydajności chłodniczej. Autor wyznacza te wielkości w funkcji temperatury wody grzewczej (lub wody chłodzącej) i czasu przełączania.

Rozdział 5-ty to pomiary na obiekcie badawczym. Eksperymentalna chłodziarka to 3-złożowe i 2-parownikowe urządzenie o mocy chłodniczej 90kWch, zlokalizowane we Wrocławskim Parku Technologicznym. Autor wyznacza tu szereg charakterystyk pracy urządzenia, w tym: moc chłodniczą, $COP = f: (\text{temperatury wody grzewczej})$, moc chłodniczą, $COP = f: (\text{czasu przełączania})$ dla różnych warunków pracy.

Rozdział 6-ty zatytułowany jest „Optymalizacja sekwencji sterowania chłodziarki adsorpcyjnej”. Działania te w głównej mierze zmierzały do poprawy regeneracji ciepła (czasu odzysku ciepła) i regeneracji masy oraz ograniczenia zużycia energii elektrycznej. W ich wyniku nastąpiła poprawa efektywności pracy urządzenia (COP) o 7%. W rozdziale 6-tym mgr inż. Piotr Pyrka badał również możliwość pracy urządzenia przy zmiennym obciążeniu.

W rozdziale 7-mym przedstawiono analizę systemową wykorzystania chłodziarek adsorpcyjnych. Autor wyznacza tutaj obszar efektywności układu

elektrociepłownia-chłodziarka adsorpcyjna – chłodziarka sprężarkowa oraz określa rezerwę mocy pojawiającą się w krajowym systemie energetycznym w wyniku zastosowania chłodziarek adsorpcyjnych. Wyznaczone jest tutaj także potencjalne podniesienie sprawności wytwarzania energii elektrycznej w EC (5-13%) związane z tymi chłodziarkami.

Rozdział 8-my to syntetyczne, dwustronicowe podsumowanie. Pracę kończy obszerny spis literatury zawierający 115 pozycji, w tym (2) pozycje z Listy Filadelfijskiej (prestżowe: Energy oraz Energy Conversion and Management), gdzie mgr inż. Piotr Pyrka jest współautorem.

C. OCENA ROZPRAWY

1. Zdaniem recenzenta tematyka pracy jest ważna i interesująca. Praca jest napisana przejrzysto i podzielona na logiczne, wynikające z układu pracy rozdziały. Wymagała od Autora dobrego opanowania zagadnień teoretycznych związanych zarówno z termodynamiką, energetyką jak i budową i eksploatacją maszyn oraz zagadnień związanych z przeprowadzeniem eksperymentu, opracowaniem i analizą wyników.
2. Autor opracował w pracy model matematyczny (0-wymiarowy) chłodziarki adsorpcyjnej. Wykorzystuje on równania bilansu masy i energii adsorbera (w czasie adsorpcji i desorpcji) parowników i skraplaczy.
3. Wykorzystując opracowany model Autor wyznaczył charakterystyki pracy chłodziarki adsorpcyjnej tj. generowanej mocy chłodniczej oraz współczynnika wydajności chłodniczej. Model pozwolił na przebadanie wpływu wybranych parametrów (tj. temperatur wody grzewczej i chłodzącej oraz czasu przełączania) na te charakterystyki.
4. Ważnym elementem pracy są badania eksperymentalne przeprowadzone na unikatowym stanowisku badawczym 3-złożowej i 2-parownikowej chłodziarki adsorpcyjnej o mocy chłodniczej 2 x 45kW, zlokalizowanej we Wrocławskim Parku Technologicznym. Autor wyznacza tu szereg charakterystyk pracy urządzenia, w tym: moc chłodniczą, $COP = f: (\text{temperatury wody grzewczej})$, moc chłodniczą, $COP = f: (\text{czasu przełączania})$ dla różnych warunków pracy.

5. Wykorzystując doświadczenia z przeprowadzonych eksperymentów mgr inż. Piotr Pyrka proponuje oryginalne oprogramowanie sterujące pracą badanej chłodziarki adsorpcyjnej. Prowadzi ono (co wykazały badania eksperymentalne) do zwiększenia efektywności energetycznej (COP) chłodziarki o 7,1% i zmniejszenia zużycia energii elektrycznej potrzeb własnych. Jest to wynikiem optymalizacji regeneracji ciepła i masy.
6. Ważnym i unikatowym elementem pracy są badania pod zmiennym obciążeniem i zdobyte w tym zakresie doświadczenia (w szczególności dotyczy to wpływu temperatury wody lodowej na charakterystyki pracy).
7. Elementem oryginalnym pracy jest analiza systemowa wykorzystania chłodziarek adsorpcyjnych. Autor określa tu warunki stosowania chłodziarek adsorpcyjnych i wyznacza rezerwę mocy jaką dają krajowemu systemowi energetycznemu jak i wzrost sprawności wytwarzania energii elektrycznej w EC.
8. Na szczególne podkreślenie zasługuje umiejętne połączenie przez Autora modelowania matematycznego z badaniami eksperymentalnymi i algorytmami sterującymi pracą chłodziarki.

D. UWAGI KRYTYCZNE I Dyskusyjne

- Rozdział trzeci należałoby uzupełnić o klasyfikację i definicje sprawności ziębiarek (chłodziarek).
- Proponuję zamiast COP używać do obliczeń sprawność termiczną ziębiarki [J. Szargut: *Teoria procesów cieplnych*, PWN, 1973], zdefiniowaną: $\frac{CC}{HH+Np}$, gdzie: CC-moc chłodnicza, HH-moc cieplna doprowadzona, Np. – moc napędowa urządzeń pomocniczych, lub tak j.w. zdefiniować COP (zwracam uwagę, że w rozdziale 5.3 pokazano, że moc Np jest istotna).
- W całości pracy (szczególnie w rozdziale 4.2. – Model matematyczny) znaczenie symboli używanych w równaniach należałoby pisać pod nimi – gdyż jest ich za dużo, aby ciągle zaglądać do spisu oznaczeń (gdzie brakuje niektórych oznaczeń) – znakomicie by to uprościło czytanie rozprawy.
- Do analizy pomiarów i obliczeń na ich podstawie należało stosować tzw. rachunek wyrównawczy (np. Szargut. J. i in. *Rachunek wyrównawczy*

w technice cieplnej, Ossolineum, Wrocław, 1984; Szega M.: *Zaawansowana walidacja i uwiarygodnienie danych pomiarowych w procesach cieplnych*, Wydawnictwo Oddziału PAN w Katowicach, Gliwice-Katowice, 2016; Rusinowski H., Plis M., Milejski A.: *Diagnostyka wymienników ciepła w uwiarygodnieniu wyników pomiarów eksploatacyjnych*, Rynek Energii nr 5 (108)/2013, s. 57-62).

- Założenia:

Proszę o sporządzenie rysunku do obliczeń z rozdziału 4.1 z zaznaczeniem występujących tam oznaczeń oraz przedstawienie algorytmu obliczeń.

- Dyskusja wyników pokazanych na rys. 4.1 – 4.4 będzie szersza i pełna gdy wyniki uzupełniająco przedstawić w postaci: $y = f(x)$ dla $z = \text{const}$. [np. $\text{COP} = f(T \text{ wody grzewczej})$ dla $\tau_{\text{przełączanie}} = \text{const}$]. W zasadzie to samo dotyczy rys. 4.5 – 4.8.
- Str. 59, tab. 5.6 i 5.7 – jak wyznaczano COP, co to jest P_{wg} (brak w opisie oznaczeń). Po co Autor wprowadził rozdział 5.3.
- W pracy powinno być więcej dowodów, aby stwierdzić „optymalna wartość czasu przełączania wynosi około 900 s - str. 64 (potwierdza to rys. 5.8, a nie potwierdza rys. 5.11).
- Zbyt trywialnie wyjaśniono sposób liczenia COP_c i η w tabelach 6.2 i 6.3 na str. 71 (raczej nie wyjaśniono). Proszę to uzupełnić.
- Str. 82, 20 wd Autor napisał: Z tego powodu należy rozszerzyć niepewność tak sporządzonych charakterystyk do $\pm 15\%$. Pytanie skąd ta liczba?
- Str. 95 na rys. 7.6 zaznaczono „obszary opłacalności układu” jest to błędne określenie- powinno być „obszary efektywności (termodynamicznej) układu”.

E. UWAGI SZCZEGÓŁOWE

Str. 21 podpis pod jest „... zeolicie 3A oraz zeolitu typu” powinno być „...
rysunkiem 3.7 zeolicie 3A oraz dla zeolitu typu”

Str. 21, 8 wg Jest „Ng opisał”, brakuje pozycji literaturowej

Str. 54 nad tabelą 5.3	Jest „przedstawione w tabeli 5.3 wraz z przedstawioną dokładnością” powinno być „przedstawione w tabeli 5.3 wraz z dokładnością”
Str. 55, 3wg	Jest „takie momenty miały miejsce np. w momencie” powinno być „Takie momenty miały miejsce np. w czasie”
Str. 60, rys. 5.7	Na osi pionowej błędnie oznaczono „temperatura wody lodowej” powinno być „temperatura wody grzewczej”
Str. 61	W treści pracy brakuje informacji, co oznaczają przerywane linie czerwone na rys. 5.8 – 5.13
Str. 69, 22wd	Jest „takie samo opóźnione w przełączeniu” powinno być „takie same opóźnienie w przełączaniu”.
Str. 82, 14wg	Jest „sprawność konwersji ciepła na chłód” – chodzi zapewne o współczynnik wydajności chłodniczej
Str. 85, 4wg	Autor używa określenia „przy wysokich sprawnościach” zamiast „przy wysokich współczynnikach wydajności chłodniczej”

F. WNIOSEK KOŃCOWY

Rozprawa doktorska Pana *mgr inż. Piotra Pyrki* pt. „*Badania i optymalizacja trójzłozowej chłodziarki adsorpcyjnej w układzie trigeneracji*” zawiera sformułowanie ważnych w energetyce zadań badawczych, ich rozwiązanie i dyskusję wyników.

W pracy przedstawiono złożony model termodynamiczny zweryfikowany pozytywnie eksperymentem badawczym na stanowisku we Wrocławskim Parku Technologicznym. Ponadto Autor przeprowadził unikalne badania wpływu szeregu parametrów na charakterystyki energetyczne chłodziarki adsorpcyjnej. Badania tutaj miały także charakter użytkowy, doprowadziły do stworzenia oryginalnego oprogramowania sterującego.

W opinii końcowej chcę także podkreślić złożoność badanych zjawisk i związaną z tym konieczność przeprowadzenia żmudnych oraz pracochłonnych badań eksperymentalnych. Autor w ich przeprowadzeniu wykazał się bardzo dobrą wiedzą i szeroką skalą umiejętności posługiwania się złożonymi technikami pomiarowymi, jak i umiejętnościami opracowania i interpretacji wyników oraz szerokiej ich dyskusji.

Pragnę również podkreślić umiejętne połączenie części pracy związanych z modelowaniem matematycznym, badaniem eksperymentalnym i aplikacyjnym oraz analizą systemową.

Poziom merytoryczna rozprawy tworzy logicznie przemyślaną i spójną całość, potwierdzającą dojrzałość Autora do prowadzenia badań naukowych, w tym także w zakresie samodzielności i pracowitości.

Uważam, że opiniowana praca mgr inż. Piotra Pyrki w pełni spełnia ustawowe wymogi stawiane rozprawom doktorskim w odpowiednich przepisach i zasługuje na pozytywną opinię. Wobec powyższego stawiam wniosek o dopuszczenie jej do publicznej obrony.

Uwzględniając powyższe oraz szczególnie wymienione w ocenie rozprawy punkty 2-7, a także fakt, że mgr inż. Piotr Pyrka jest współautorem artykułów na Liście Filadelfijskiej, proponuję wyróżnienie pracy, o ile jej obrona przebiegnie w sposób odpowiednio satysfakcjonujący.

Gliwice, 6.07.2019r.

Janusz Kotowicz

