

dr hab. inż. Bartosz Zajączkowski, prof. uczelni
Politechnika Wroclawska
Wydział Mechaniczno-Energetyczny
Katedra Termodynamiki, Teorii Maszyn i Urządzeń Ciepłych

Wrocław, 13/06/2019

RECENZJA

Pracy doktorskiej mgr inż. Piotra Pyrki
nt. „Badania i optymalizacja pracy trójzłożowej chłodziarki adsorpcyjnej
w układzie trigeneracji”

Recenzja dotyczy pracy doktorskiej w formie maszynopisu opracowanego wydanego jako raport serii PRE nr 9/2019 o objętości 121 stron tekstu, podzielonego na 9 rozdziałów, zawierającego 68 rysunków, 16 tablic i 115 pozycji literaturowych, zamkniętego redakcyjnie w pierwszym kwartale 2019 roku.

Podstawą formalną opracowania niniejszej recenzji jest uchwała Rady Wydziału Mechaniczno-Energetycznego Politechniki Wrocławskiej z dnia 22 maja 2019 roku.

Wybór tematyki pracy

Wybór tematyki pracy jest, w mojej opinii, trafny, ciekawy i wpisujący się w najważniejsze współcześnie problemy naukowe, takie jak efektywność energetyczna oraz zmiany klimatyczne. Zagadnienia poruszane w dysertacji są istotne zarówno naukowo jak i aplikacyjnie, ponieważ wzrasta ogólna świadomość i potrzeba zrównoważonego rozwoju, ze szczególnym naciskiem na rozwój zintegrowanej energetyki, ciepłownictwa i chłodnictwa. Omawiana w pracy problematyka naukowa jest tak interesująca w aspekcie termodynamicznym, chłodniczym i wymiany ciepła, że praktycznie wszystkie liczące się konferencje tematyczne organizują wydzielone sesje poświęcone technologiom sorpcyjnym, a wiodący producenci energii przeznaczają na badania w tym zakresie znaczące środki.

W tym kontekście godnym uwagi jest nawiązanie przez Doktoranta współpracy z koncernem energetycznym o międzynarodowym zasięgu, czego efektem była możliwość przeprowadzenia badań eksperymentalnych i optymalizacji instalacji pilotażowej o wydajności i możliwościach przekraczających wielokrotnie budżet badawczy zwykłego projektu naukowego. Wpłynęło to znacząco na oryginalność pracy i jej walor aplikacyjny.

Zawartość pracy

Rozdziały 1 i 2 zawierają zasadnicze definicje w tym chłodnictwa adsorpcyjnego, kogeneracji, trigeneracji oraz zagadnień towarzyszących. Autor wyjaśnia swoją motywację leżącą u podstaw pracy doktorskiej, definiuje tezę oraz szczegółowo nakreśla merytoryczny zakres dysertacji.

Rozbudowany Rozdział 3 zawiera obszernie omówienie zasady działania i zjawisk fizycznych leżących u podstaw adsorpcyjnych systemów chłodniczych. Szczegółowo omówiono rodzaje i własności stosowanych par roboczych. Autor wymienia też jakie źródła ciepła niezbędne są do realizacji chłodnictwa adsorpcyjnego oraz szczegółowo omawia niektóre z nich, także pod

WS/PW/1836/2019
Wydział Mechaniczno-Energetyczny

kątem uwarunkowań klimatycznych charakterystycznych dla naszego kraju. W kompleksowym przeglądzie literatury (opisowym oraz tabelarycznym) Doktorant przeanalizował rozwiązania konstrukcyjne wielozłożowych urządzeń adsorpcyjnych, przyglądając się z bliska ich parametrom operacyjnym, osiąganym wydajnościom oraz sprawnościom, konstrukcji zastosowanych wymienników oraz modyfikacjom procesowym.

W Rozdziale 4 Doktorant zaprezentował model matematyczny będący układem równań różniczkowych na które składają się równanie kinetyczne procesu adsorpcji/desorpcji oraz bilanse masy i energii wszystkich elementów konstrukcyjnych modelowanego systemu adsorpcyjnego. W tym samym rozdziale przedstawił wyniki symulacji dla szerokiego zakresu temperatur mediów grzewczych, chłodzących i chłodzonych oraz czasów przełączania złożeń. Rozdział 5 zawiera dokładny opis pilotażowej instalacji adsorpcyjnej na której Autor przeprowadził badania eksperymentalne oraz optymalizację działania. Są tu również szczegółowo omówione przeprowadzone badania eksperymentalne. Autor przeprowadza ocenę wpływu niepewności pomiaru.

Rozdział 6 to kompleksowa optymalizacja sekwencji sterowania chłodziarki adsorpcyjnej wraz z wynikami eksperymentalnymi potwierdzającymi skuteczność opracowanej przez Doktoranta sekwencji sterującej. Uwzględniając ograniczenia i specyfikę analizowanej instalacji pilotażowej, Autor opisał modyfikację modelu obliczeniowego w sposób umożliwiający predykcję osiągnięć kolejnych generacji urządzeń.

W Rozdziale 7 Autor przeprowadził analizę wykorzystania chłodziarek adsorpcyjnych w zbilansowanych i niezbilansowanych kogeneracyjnych systemach ciepłowniczych z uwzględnieniem efektywności przetwarzania energii pierwotnej. Analizy przeprowadzono w kontekście ekonomicznym, ale też równie istotnym bezpieczeństwem energetycznym kraju (posługując się pojęciem tzw. rezerwy mocy).

Pracę podsumowuje Rozdział 8 zawierający wyciągnięte przez Autora wnioski.

Uwagi ogólne na temat pracy

Dysertacja jest interesująca, w całościowym ujęciu ciekawa i fragmentami oryginalna. Porusza istotne problemy naukowe oraz posiada walory aplikacyjne. Postawione na wstępie pracy przez Autora zadania naukowe zostały rozwiązane z dobrą znajomością wiedzy teoretycznej i umiejętnością samodzielnego prowadzenia wnikliwych analiz i prac eksperymentalnych. Autor wykazuje się rozeznaniem literatury źródłowej, potrafi dotrzeć do sedna zagadnienia oraz wykazuje się bardzo dobrym zrozumieniem termodynamiki procesów realizowanych w adsorpcyjnych urządzeniach chłodniczych.

Na uwagę zasługuje ogromna ilość przeprowadzonych przez Autora cykli badań eksperymentalnych, z których po redukcji danych 305 serii zostało bezpośrednio wykorzystanych w dysertacji.

Zdecydowanie należy podkreślić osiągnięcia Doktoranta w temacie modyfikacji i implementacji autorskiej sekwencji kontrolnej działania trójzłożowego adsorpcyjnego systemu chłodniczego. Warto dodać, że Autor wprowadzał swoje modyfikacje nie tylko pod kątem działania urządzenia sorpcyjnego, ale przede wszystkim pod kątem efektywnej pracy i stabilności sieci ciepłowniczej zasilającej chłodziarkę. Przedstawiona w dysertacji optymalizacja wymagała od Doktoranta nie tylko fundamentalnego zrozumienia wymiany

ciepła, termodynamiki oraz systemów lewobieżnych opartych o zjawiska adsorpcji/desorpcji, ale także doświadczenia i umiejętności z obszaru automatyki i programowania. Wymiernym wskaźnikiem osiągniętego sukcesu jest implementacja zoptymalizowanego algorytmu w dwóch innych instalacjach pilotażowych podobnego typu zainstalowanych w Polsce.

Dużą wartość poznawczą i szczególnie warte podkreślenia jest jednoznaczne wykazanie użyteczności i celowości wdrożenia adsorpcyjnych systemów chłodniczych w polskich systemach ciepłowniczych do konwersji ciepła sieciowego na chłód.

W trakcie analizowania przedstawionej do recenzji dysertacji nasuwają mi się jednak pewne uwagi natury ogólnej, które wpływają na ostateczną ocenę i końcowe wrażenie z lektury pracy. W mojej opinii w prezentowanej rozprawie:

1. Autor skoncentrował swoje prace wokół pojedynczej tezy ogólnej, szeroko obejmującej badane zagadnienie. Po zapoznaniu się z wynikami przeprowadzonych badań oraz wnioskami odnosi się wrażenie, że był to wybór bardzo zachowawczy, ponieważ Autor dokonał wielu ciekawych obserwacji szczegółowych.
2. Zbyt szeroko zarysowano zakres merytoryczny Rozdziału 3. Zasada działania i opisy procesów przeplatają się tu z krytycznym przeglądem literatury, dyskusją na temat aktualnego stanu wiedzy i omówieniem własnym autora. Zmniejszyło to przejrzystość i czytelność tej części pracy.
3. W Rozdziale 3 Autor wymienia i omawia źródła ciepła chłodziarki zasilanej ciepłem niskotemperaturowym. Zostały wymienione wszystkie rodzaje źródeł (3.1.1, strona 5) oraz szczegółowo omówione źródło dolne (3.1.2, strona 6) oraz pośrednie (3.1.3, strona 6). Autor pominął charakterystykę źródła górnego i od razu przeszedł do innych zagadnień (tu do obiegów porównawczych w sekcji 3.1.4, strona 9).
4. W pracy pojawiają się grupowe odniesienia do źródeł literaturowych, jednak bez szczegółowego omówienia zawartości poszczególnych cytowanych prac. Do niektórych z tych źródeł Autor odnosi się jednokrotnie w całym dokumencie, co sprawia wrażenie, że prace te nie stanowią istotnego wkładu w kontekście problemu naukowego omawianego w dysertacji.
5. Podczas omawiania klasyfikacji chłodziarek adsorpcyjnych (sekcja 3.5, strona 25) Autor pisze, że „żaden ze znanych ośrodków badawczych nie opracował adsorpcyjnego urządzenia chłodniczego o ciągłym charakterze pracy (...)”. Jest to niezręczne sformułowanie, ponieważ w powszechnym dyskursie za ciągłość pracy rozumie się realizację celu istnienia urządzenia w sposób ciągły – tu produkcja chłodu – a nie ciągłość procesu „przemieszczania się adsorbentu”. Wszystkie urządzenia posiadające dwa lub więcej złożeń są w stanie pracować w trybie ciągłym.

Szczegółowe uwagi krytyczne

1. W opisie modelu matematycznego odczuwa się brak tabelarycznego zestawienia warunków początkowych oraz wszystkich stałych niezbędnych do rozwiązania (strumienie przepływu mediów grzewczych i chłodzących, ciepła właściwe mediów oraz materiałów, z których wykonano poszczególne elementy konstrukcyjne układu, a także masy tychże elementów. Na stronach 42 i 46 Autor definiuje jedynie temperatury źródeł (tj. temperatury wody wpływającej na dany wymiennik), jest to jednak za mało, aby w pełni móc odtworzyć proces modelowania, którego rezultatem są m.in. rysunki 4.1-4.8. Niektóre z potrzebnych do obliczeń wartości pojawiają się w Rozdziale 5,

niemniej jednak w kontekście obliczeń modelowych należałoby zgromadzić niezbędne dane w jednym miejscu.

2. W modelu matematycznym Autor zdecydował się na wykorzystanie do obliczeń zmodyfikowanego równania Freundlicha, w którym stałe empiryczne zostały zastąpione funkcjami temperatury będącymi wielomianami trzeciego stopnia. Wielomiany te korzystają łącznie z 8 współczynników dopasowujących. Zastosowanie nowej wersji równania równowagowego dla silikażelu RD (z pracy Yuri I. Aristov, Mikhail M. Tokarev, Angelo Freni, Ivan S. Glaznev, Giovanni Restuccia, Kinetics of water adsorption on silica Fuji Davison RD, Microporous and Mesoporous Materials, Volume 96, Issues 1–3, 2006, Pages 65-71) o eksperymentalnie dowiedzionej większej dokładności oraz opartego jedynie na dwóch parametrach dopasowujących korzystnie wpłynęłoby na precyzję opisanych w dysertacji symulacji.
3. W omówieniu wyników symulacji zabrakło wyjaśnienia co w wizualizuje linia przerywana na rysunkach 5.8-5.13 (czerwona) oraz 6.7 i 6.8 (żółta).
4. Przeprowadzone przez Autora porównanie wyników symulacji i badań eksperymentalnych ma charakter przede wszystkim liczbowy i opisowy. Podczas lektury pracy odczuwa się brak graficznego zestawienia rezultatów symulacji omówionych w Rozdziale 4 i eksperymentów w Rozdziale 5, np. symulowanych charakterystyk czasowych z rzeczywistymi na rysunkach 5.6 i 5.7.
5. W przeglądzie istniejącego stanu wiedzy Doktorant całkowicie pominął urządzenia adsorpcyjne wykorzystujące tzw. falę cieplną. Tymczasem analizy termodynamiczne przeprowadzone np. w pracy Lambert, M. a. M., & Jones, B. J. B. (2007). *Design of Adsorption Heat Pump for Permanent Lunar Base. Journal of Thermophysics and Heat Transfer*, 21(1), 219–233. <https://doi.org/10.2514/1.21684> wskazują na teoretyczną możliwość osiągnięcia COP przekraczającego 1.5. Czy możliwość teoretycznego osiągnięcia takich wartości wpływa na rezultaty analizy systemowej wykorzystania chłodziarek adsorpcyjnych opisanej w Rozdziale 7?
6. Wprowadzając korektę do obliczeń modelowych celem predykcji wydajności i efektywności kolejnych wersji agregatu Autor założył, że przyczyną wahań sprawności konwersji ciepła na chłód (w zakresie od 37% do 87%) były „problemy niedojrzałości technologicznej” (sekcja 6.7, strona 82). Ponieważ Autor zaproponował współczynniki korekcyjne do modelu, należałoby sprecyzować o jakie problemy chodzi.
7. Autor przedstawił cykl pracy złoza w dwuparownikowej trójzłożowej chłodziarce adsorpcyjnej za pomocą wykresu Duringa w trybie normalnej pracy pilotażowej instalacji adsorpcyjnej (rysunek 3.16). Jest bardzo interesujące i znacząco podniosłoby jakość dysertacji pokazanie na podobnym wykresie jak wygląda cykl realizowane przez urządzenie realizujące sekwencję kontrolną ze zmienioną przez Autora.

W pracy pojawiają się też usterki redakcyjne i błędy edytorskie, takie jak:

- Strona X – indeks „teor” powtarza się dwukrotnie
- Strona 1 – Tytuł sekcji 1.1 w liczbie mnogiej „Wprowadzenia i motywacja”.
- Strona 3 – Rzadkością w dysertacjach jest podawanie w spisie bibliograficznym, a następnie powoływanie się na dane własne jako na źródło (pozycja 2 w spisie literatury, opis rysunku 1.1).
- Strona 5 – W opisie rysunku 3.1 wykres T-s został opisany jako T(S).
- Strona 18 – tytuł sekcji 2.2, „pracy” zamiast „pacy”
- Strona 19 – „Energie adsorpcji wody” zamiast „Energia adsorpcji wody”
- Strona 55 – „monecie” zamiast „momencie”

- Strona 72-74 – Części a) i b) rysunków 6.4 oraz 6.5 znajdują się osobno na dwóch sąsiednich stronach (72-73 oraz 73-74).
- Strona 100 – Bibliografia, pozycja [9] należy wskazać instytucję odpowiedzialną za depesze meteorologiczne wykorzystanych w dysertacji (IMGW?)
- Strona 104 – Bibliografia, pozycja [8] i [61] to w zasadzie te same materiały źródłowe (firma SorTech GmbH przekształciła się w Fahrenheit GmbH)
- Strona 108 – Bibliografia, pozycja [110], literówka w nazwisku Suzuki

Podsumowanie

Przytoczone uwagi krytyczne nie umniejszają w istotny sposób wartości merytorycznej dysertacji. Dorobek przedstawiony w niej przez Autora, jest w dostatecznym stopniu znaczący i oryginalny jak na rozprawę doktorską, a wyniki omówione w pracy zostały opublikowane w czasopiśmie z wysokim wskaźnikiem IF i doczekały się szeregu cytowań: Energy (19 cytowań wg Scopus), Energy Conversion and Management (18 cytowań wg Scopus) oraz International Journal of Refrigeration (4 cytowania wg Scopus).

W prezentowanej pracy zostało w sposób interesujący rozwiązane, omówione i przeanalizowane teoretycznie i eksperymentalnie zagadnienie naukowe dotyczące działania trójzłożowej chłodziarki adsorpcyjnej w konfiguracji z dwoma parownikami. Autor posługując się rozwiązaniem numerycznym modelem matematycznym oraz w połączeniu z uzyskanymi rezultatami eksperymentów formułuje wnioski i wskazuje jednocześnie, na duże możliwości aplikacyjne adsorpcyjnych do konwersji na chłód ciepła w okresie letnim.

Niniejszym można stwierdzić, że Autor wykazał się umiejętnością samodzielnego prowadzenia pracy badawczej, zademonstrował posiadaną ogólną wiedzę teoretyczną oraz rozwiązał samodzielnie zadanie naukowe dotyczące związane z procesami zachodzącymi w adsorpcyjnych urządzeniach chłodniczych. W związku z powyższym uważam, że przedstawiona rozprawa doktorska spełnia wymagania ustawy z dnia 14 marca 2003 r. o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki. Stawiam więc wniosek o dopuszczenie autora do jej publicznej obrony.

