

Kraków, 17.04.2023 r.

prof. dr hab. inż. Paweł Ocoń
Katedra Energetyki,
Wydział Inżynierii Środowiska i Energetyki,
Politechnika Krakowska

Recenzja pracy doktorskiej

Analiza techniczno-ekonomiczna zastosowania pomp ciepła w systemach ogrzewania i chłodzenia samochodów

autor rozprawy: mgr inż. Jan Grygierzec

promotor: prof. dr hab. inż. Sebastian Werle

promotor pomocniczy: dr inż. Tomasz Bury

1. Charakterystyka rozprawy doktorskiej

Praca liczy 151 stron, oraz 6 rozdziałów. **W rozdziale 1** przedstawiono przegląd historyczny samochodów, jego kluczowe etapy rozwoju na świecie. W celu zmniejszenia emisji spalin powstałych w wyniku spalania paliw stałych w pracach badawczo-rozwojowych zaczęto pracować nad rozwiązaniami alternatywnymi do standardowych rozwiązań, czyli pojazdami hybrydowych i elektrycznych. W dalszej części opisano bardziej szczegółowo te pojazdy i rodzaje ich układów napędowych tj. mikrohybrydy, pośrednio-hybrydy, hybrydy, plug-in hybrydy, pojazdów elektrycznych i pojazdów elektrycznych o zwiększonym zasięgu. W kolejnym podrozdziale skupiono się na opisanie układów grzewczo-chłodniczych i zwrócono uwagę na aspekt iż obecnie układy te przeznaczone są do jednego rodzaju czynnika chłodniczego i wprowadzenie innych czynników niesie za sobą wysokie koszty modyfikacyjne. **W rozdziale 2** skupiono się na szerszej analizie układu grzewczo-chłodniczego opartego o pompę ciepła. W podrozdziale 2.2 opisano czynniki chłodnicze stosowane w tych układach. W kolejnym 2.3 procesy termodynamiczne zachodzące w procesie chłodzenia.

Dzięki przeglądowi literaturowemu doktorant doszedł w **rozdziale 3** do celu pracy tj opracowanie metodyki badań systemów grzewczo-chłodniczych oraz ich poszczególnych elementów. Przedstawiony również dwie hipotezy:

- modyfikacja obecnie stosowanej metodyki badań pozwoli w uzyskać bardziej wiarygodne i wartościowe wyniki przy niższym nakładzie czasu, pracy i środków finansowych
- koncepcja stanowiska badawczego opierającego się o badania w warunkach eksperymentalnych zwiększy potencjał badawczo-rozwojowy.

Badania wybranych elementów układów grzewczo-chłodniczych wykonano w **rozdziale 4**. Najpierw przedstawiono charakterystykę materiałów z których wykonywane są te układy czyli: stale, aluminium, elastomery, tworzywa sztuczne. Następnie pokazano jak przebiega proces badania szczelności (wykonanie pomiarów nieszczelności i wykorzystanie w tym celu do materiałów urządzeń typu detektory nieszczelności). W kolejnym podrozdziale 4.3 przedstawiono dobór metody pomiaru nieszczelności oraz wyniki badania przepuszczalności materiałów na trzech różnych próbkach badawczych. W dalszym etapie – podrozdział 4.4 opisano badanie odporności chemicznej elementów do transportu czynnika roboczego – badanie odporności korozyjnej, metodologie badań oraz kompatybilność z olejami oraz czynnikami roboczymi. W podrozdziale 4.5 omówiono metodykę badania układów grzewczo-chłodniczych - odporności na ciśnienie a także jego zmiany tak by potem przejść do symulacji komputerowych tych elementów oraz badań wibracyjnych. Rozdział zakończono przedstawieniem koncepcji stanowiska badawczego.

Rozdział 5 skupia się na ekonomicznym aspekcie stanowiska koncepcyjnego oraz obecnych badań laboratoryjnych.

Ostatni **rozdział 6** to przedstawienie podsumowania pracy i jej najważniejszych osiągnięć.

2. Uwagi edytorskie

1. W spisie symboli:

- Dlaczego strumień objętościowy posiada jednostkę m^2/s ?
- „COP- rzeczywisty współczynnik wydajności grzejej pompy ciepła”, COP to współczynnik efektywności energetycznej pompy ciepła
- „ ν - Współczynnik lepkości kinematycznej płynu” – brakuje jednostki
- ΔP - Strata wysokości podnoszenia, Pa powinno być strata ciśnienia

2. W tekście pracy:

- Tabela 7: Jednostka gęstości, nie kg/m^3 tylko kg/m^3 ;
- Tabela 7: Zamiast określenia przewodność cieplna powinno być współczynnik przewodzenia ciepła, którego jednostką jest $\text{W}/(\text{m K})$ a nie $\text{W}/\text{m}^{\wedge}\text{K}$
- Strona 87, powinno być Tabela 13 zamiast Tabela 133
- Strona 83, powinno być „Na rysunku 30” zamiast „Na rysunku 29”
- Strona 83, powinno być „Na rysunku 31 przedstawiono wykrywacz nieszczelności Inficon HLD 6000” zamiast „Na rysunku 30 przedstawiono wykrywacz nieszczelności Inficon HLD 6000”
- Strona 90, powinno być „ $1.5 \text{ kg}/\text{m}^2/\text{rok}$ ” zamiast „ $1.5 \text{ kg}/\text{m}^2/\text{rok}$ ”
- Strona 92, powinno być „Na rysunku 35” zamiast „Na rysunku 34”
- Strona 92, powinno być „Na rysunku 36” zamiast „Na rysunku 35”
- Strona 100, powinno być „Rysunek 37” zamiast „Rysunek 36”
- Strona 103, nie jest zrozumiały tekst: „37 oraz 38 przedstawiona model 3d elementu układu grzewczo-chłodniczego po procesie siatkowania z wskazaniem naprężeń.” Powinno być „Rysunki 38 oraz 39 przedstawiają model 3d elementu układu grzewczo-chłodniczego po procesie dyskretyzacji ze wskazaniem naprężeń.”
- Strona 106, powinno być „Na rysunku 40” zamiast „Na rysunku 39”
- Strona 107, powinno być „Podział ze względu na lokalizacje w układzie grzewczo-chłodniczym przedstawiono na rysunkach 41 oraz 42.” zamiast „Podział ze względu na lokalizacje w układzie grzewczo-chłodniczym ilustruje rysunku 40 oraz rysunku 41.”
- Strona 108, powinno być „ Rysunek 43 przedstawia zestawienie profili wibracyjnych”
- Strona 117, powinno być „Tabela 23 przedstawia wyniki badań dla próbki III.” zamiast „Tabela 23Tabela 23. Wyniki badań dla próbki III.”
- Zdanie „Rysunek 47 Wykres spadku ciśnienia dla próbki nr II przedstawia wykres spadku ciśnienia dla próbki nr II.” (strona 116) jest niezrozumiałe
- Zdanie „8 przedstawia wykres spadku ciśnie dla badanych próbek.” (strona 118) jest niezrozumiałe
- Strona 125 zamiast „Na rysunku 54 oraz 55 przedstawiono stanowiska badawcze wykorzystywane do symulowania ograniczonych warunków.” powinno być „Na

rysunkach 55 oraz 56 przedstawiono stanowiska badawcze wykorzystywane do symulowania ograniczonych warunków.”

- Strona 126 powinno być „Rysunek 57 przedstawia schemat blokowy układu pomiarowego przedstawionego na rysunku 56.” zamiast „Rysunek 52 przedstawia schemat blokowy układu pomiarowego przedstawionego na rysunku 56.”
- Strona 129 powinno być „Układ pomiarowy przedstawiony na rysunku 58 został zaprojektowany do zbierania danych w pojeździe Mitsubishi i-MIEV.” zamiast „Układ pomiarowy przedstawiony na rysunku 57 został zaprojektowany do zbierania danych w pojeździe Mitsubishi i-MIEV.”
- Strona 130 powinno być „Rysunek 59” zamiast „Rysunek 58”
- Strona 131 powinno być „na rysunku 60” zamiast „na rysunku 59”

3. Uwagi szczegółowe

1. Nie jest dla mnie zrozumiała jedna z tez pracy:
„koncepcja stanowiska badawczego opierającego się o badania w warunkach eksperymentalnych zwiększy potencjał badawczo-rozwojowy.”
Czy koncepcja stanowiska badawczego zwiększy potencjał badawczo-rozwojowy przedsiębiorcy ?
2. Co oznacza w Tabeli 13 zapis: ‘Wynik+10%’?
3. W rozdziale 4.6.1 przedstawiono wyniki symulacji komputerowych. Proszę o opisanie ich założeń, jakie były warunki brzegowe, jakie były obciążenia przyjęte do obliczeń.
4. Rozdziały pierwszy i drugi (rozdziały wprowadzające) są zdecydowanie zbyt długie w porównaniu z rozdziałami związanymi z wynikami badań
5. Proszę o przedstawienie najważniejszych wniosków z przeprowadzonego w pracy rozeznania literaturowego ?
6. Wzór (2) jest zapisany nieprawidłowo:

$$Re \text{ warunki rzeczywiste} = \frac{V * D}{v} = \frac{qv * D}{S * \frac{v}{p}} = \frac{qv * D}{\frac{\pi D^2 * \mu}{4} * p} = \frac{4 * q * v * p}{\pi * D * \mu} \quad (2)$$

7. Proszę o wyjaśnienie dlaczego autor twierdzi, że: „Ważnym aspektem związanym z symulacjami komputerowymi są odpowiednio dobrane metody pomiarowe oparte na badaniach w warunkach rzeczywistych.” ? (strona 105)
8. Na czym polega największa innowacja w pracy doktorskiej ?
9. Jakie są główne wnioski wynikające z przedstawionej analizy ekonomicznej, gdzie zostały wykorzystane wartości ceny aluminium, ceny stali nierdzewnej, ceny energii elektrycznej itd.
10. W rozdziale przedstawiającym analizę ekonomiczną obliczenia zostały przeprowadzone zgodnie z wzorem na NPV:

$$NPV = C_0 + \sum_{i=1}^t \frac{C_i}{(1+r)^i}$$

Brak wyników tych obliczeń analizy NPV – jest tylko przeprowadzana analiza ekonomiczna od czego zależą koszty inwestycyjne.

11. Proszę omówić błędy pomiarowe, jaka była dokładność przeprowadzonych pomiarów ciśnienia w badanych próbkach ?

4. Ocena rozprawy doktorskiej

Wkład doktoranta w rozwój dyscypliny naukowej inżynieria środowiska, górnictwo i energetyka to:

- Doktorant przedstawił koncepcję uniwersalnego stanowiska badawczego pracującego na czynnikach R134a, R1234yf oraz R744. Wykazał błędy w obecnych testach systemów grzewczo-chłodniczych. Zaproponował układ, który posiada innowacyjny charakter a wprowadzenie koncepcji do realnego procesu produkcyjnego wpłynie pośrednio na zużycie energii elektrycznej w wielu procesach.
- Standardowe badania wskazują ograniczenia obecnych metod testów układów grzewczo-chłodniczych wykorzystujących pompy ciepła. Doktorant zauważył, że wraz z pojawieniem się dodatkowych funkcjonalności układów grzewczo-chłodniczych wady metodologii wpływają na efektywność energetyczną systemu. Przeprowadzone badania w trakcie realizacji doktoratu uwiaryściły ograniczenia związane z niskim poziomem odwzorowania warunków

eksploatacyjnych. Co bardzo istotne, aktualne testy laboratoryjne nie wskazują obszarów podatnych na rozszczelnienie oraz innych wad produktu pojawiających się dopiero na etapie eksploatacyjnym. Modernizacje elementów układu w fazie rzeczywistej eksploatacji przez użytkownika wpływają na dodatkowe koszty, których zaproponowana w pracy metodyka badawcza pozwala uniknąć.

5. Wnioski końcowe

Najważniejsze osiągnięcia doktoranta w ramach przedstawionej rozprawy doktorskiej to:

- Opracowanie koncepcji uniwersalnego stanowiska badawczego pracującego na czynnikach R134a, R1234yf oraz R744
- Wykazanie iż standardowe badania wskazują ograniczenia obecnej metodologii

Uważam, że praca doktorska spełnia wymagania stawiane w Ustawie z dnia 20 lipca 2018 r. – Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz.U. z 2018 r. poz. 1668, późn. zm.) dlatego też rekomenduję ją do publicznej obrony w dyscyplinie inżynieria środowiska, górnictwo i energetyka.