

Częstochowa, 04.11.2021

Prof. dr hab. inż. Henryk Otwinowski  
Wydział Inżynierii Mechanicznej i Informatyki  
Politechnika Częstochowska  
ul. J.H. Dąbrowskiego 69  
42-201 Częstochowa

## RECENZJA

rozprawy doktorskiej mgr. inż. Marzeny Czapnik

pt.: „Zastosowanie chemicznej pompy ciepła do zwiększenia efektywności energetycznej skojarzonej produkcji etanolu”

Podstawą formalną opracowania recenzji jest pismo dr. hab. inż. Anny Diowkszej, prof. uczelni, Dziekana Wydziału Biotechnologii i Nauk o Żywności Politechniki Łódzkiej, z dnia 05.10.2021. Wraz z pismem została przekazana rozprawa doktorska mgr. inż. Marzeny Czapnik pt.: „Zastosowanie chemicznej pompy ciepła do zwiększenia efektywności energetycznej skojarzonej produkcji etanolu”. Praca doktorska realizowana była na Wydziale Biotechnologii i Nauk o Żywności Politechniki Łódzkiej, promotorem pracy jest dr hab. inż. Tomasz Olejnik, profesor uczelni, promotorem pomocniczym – dr hab. inż. Paweł Wawrzyniak, profesor uczelni, a opiekunem naukowym z ramienia firmy – mgr inż. Zbigniew Ułanowski.

Recenzowana praca podzielona jest na 11 rozdziałów oraz spis treści, zawiera 110 stron, w tym 32 rysunki i 19 tabel; do pracy dołączono 14 załączników w postaci schematów i rysunków wykonawczych instalacji chemicznej pompy ciepła. Wykaz cytowanej literatury obejmuje 25 pozycji.

Celem pracy jest przeprowadzenie analizy teoretyczno-eksperymentalnej zastosowania chemicznej pompy ciepła do odzysku ciepła odpadowego, powstającego w gorzelni i biogazowni. W wielu zakładach przemysłowych, realizujących procesy cieplne, powstają duże ilości energii, której nośnikiem są czynniki o niskich parametrach (temperatura, ciśnienie), energia ta traktowana jest jako energia odpadowa. Dotyczy to takich gałęzi przemysłu jak: hutnictwo, energetyka, przemysł chemiczny, materiałów budowlanych, spożywczy czy papierniczy. Wykorzystanie energii odpadowej do celów technologicznych, grzewczych czy wytwarzania energii elektrycznej związane jest z koniecznością podniesienia

parametrów nośnika tej energii. Jednym ze sposobów podwyższenia temperatury strumienia energii odpadowej jest zastosowanie pompy ciepła. W pracy przedstawiono koncepcję zastosowania chemicznej pompy ciepła do optymalizacji zużycia ciepła w dwóch współpracujących ze sobą zakładach: gorzelnii i biogazowni. Ograniczenie strat ciepła odpadowego przyczyni się do poprawy skojarzonej gospodarki energetycznej zakładów i zmniejszenia zapotrzebowania na energię elektryczną i parę grzejącą do celów technologicznych. Chemiczna pompa ciepła została wybrana ze względu na odpowiedni zakres temperatur pracy pompy i niewielkie zużycie energii elektrycznej. Czynnikiem roboczym w rozpatrywanej pompie były kwas fosforowy i woda. Zaproponowana koncepcja wykorzystania chemicznej pompy ciepła do zwiększenia efektywności energetycznej w przemyśle spożywczym stanowi nowe rozwiązanie, o czym świadczy przeprowadzone badanie czystości patentowej. O aktualności tematyki recenzowanej rozprawy doktorskiej świadczą rosnące ceny energii oraz wymagania związane z ochroną środowiska stawiane przed zakładami przemysłowymi.

Realizacja celu pracy obejmuje następujące cele szczegółowe:

- badanie czystości patentowej zaproponowanego prototypu chemicznej pompy ciepła,
- badania ciepła rozcieńczenia kwasu fosforowego,
- badania korozyjności metali i stopów pod wpływem działania kwasu fosforowego,
- projekt i wykonanie instalacji pilotażowej chemicznej pompy ciepła,
- badania eksperymentalne instalacji pilotażowej.

We wstępie wskazano na możliwość wykorzystania chemicznej pompy ciepła do poprawy efektywności energetycznej procesów technologicznych w przemyśle spożywczym. Analizie poddano instalacje gorzelnii i sąsiadującej biogazowni. Niektóre fragmenty wstępu, dotyczące opisu przeprowadzonych badań, można było przenieść do rozdziału III o zmienionym tytule „Cel i zakres pracy”. Rozdział II zawiera opis procesów realizowanych w rozpatrywanych instalacjach oraz krótki przegląd technologii odzysku ciepła, brakuje natomiast przeglądu chemicznych pomp ciepła na podstawie dostępnej literatury ( [https://doi.org/10.1016/S1359-4311\(01\)00022-9](https://doi.org/10.1016/S1359-4311(01)00022-9), O.3.9.2-New-industrial-chemical-heat-pump-from-Qpinch, <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2012.06.041>, <https://www.ans.org/news/article-469/can-chemical-heat-pumps-for-integrated-energy-systems-and-industrial-applications-change-the-world/>). Tytuł tego rozdziału, podobnie jak rozdziału III, również należałoby zmienić. Teza pracy podana w rozdziale III jest dość oczywista, a cel pracy przedstawiony zbyt krótko. Rozdział IV zawiera, oprócz opisu i schematów strumienia ciepła występujących

w gorzelnii i biogazowni, istotne wyniki badania czystości patentowej, przeprowadzonego przez rzeczownika patentowego oraz we własnym zakresie. W rozdziale V przedstawiono wyniki badań tych właściwości kwasu fosforowego, które są istotne ze względu na zastosowanie, jako czynnika roboczego, w chemicznej pompie ciepła. Pomiarów gęstości wykonano w zakresie temperatur 25-150 °C i stężeń 60-122%, zależność temperatury wrzenia kwasu od jego stężenia wyznaczono na podstawie pomiarów na stanowisku badawczym. Przy użyciu zaprojektowanego kalorymetru reakcyjnego przeprowadzono także pomiary ciepła rozcieńczania kwasu fosforowego. W dalszej części rozdziału zaprezentowano wyniki czasochłonnych badań korozyjności materiałów, z których wykonano elementy prototypowej instalacji. Badania te obejmowały również analizę mikroskopową powierzchni próbek metali i stopów oraz badania spektrograficzne i dyfraktograficzne wybranych próbek materiałów. Na podstawie wyników badań przeprowadzono obszerną i prawidłową analizę. Rozdziały VI i VII dotyczą instalacji pilotażowej chemicznej pompy ciepła. W rozdziale VI zawarto schemat i opis instalacji pompy, opis układów pomiarowo-sterujących oraz kompletne zestawienie założonych w projekcie wartości parametrów pracy poszczególnych elementów instalacji. Rozdział VII obejmuje projekt technologiczny instalacji chemicznej pompy ciepła z załączonymi, licznymi rysunkami i schematami, dobór urządzeń i opis montażu. W rozdziale tym przedstawiono także odpowiednią metodykę badań eksperymentalnych. W rozdziale VIII przedstawiono wyniki pomiarów wykonanych podczas prób eksperymentalnych oraz szczegółowo opisaną i popartą przykładami, metodykę obliczeń następujących, istotnych wielkości:

- sprawność układu pompy,
- ciepło rozcieńczania kwasu fosforowego,
- przyrosty temperatury podczas reakcji rozcieńczania kwasu.

Obliczone wartości ciepła rozcieńczania porównano z wartościami eksperymentalnymi. W obliczeniach uwzględniono także interesujący przypadek akumulacji energii w strumieniu stężonego kwasu fosforowego. Pracę kończą trafne i prawidłowo sformułowane wnioski. W wykazie literatury dobrze byłoby umieścić pozycje Autorki rozprawy. Cytowana literatura zawiera niezbyt dużo pozycji, ale jest to wynikiem wdrożeniowego charakteru pracy. Należy nadmienić, że w pracy brakuje streszczenia.

Praca napisana jest zwięzłym i poprawnym językiem, część graficzna nie budzi zastrzeżeń, rysunki i wykresy są czytelne i dobrze opisane. W pracy można znaleźć błędy stylistyczne (s.5, 10, 13, 16, 33, 34, 46, 57), literowe (s.5, 10, 11, 56, 57, 69, 70, 86, 105, 108) oraz interpunkcyjne (s.7, 10, 16, 38, 79, 107).

Poniższe uwagi, które nasunęły się podczas czytania pracy, przedstawione są w kolejności występowania w tekście:

- s.2 – rozdziały 5.1 i 5.2 mają taki sam tytuł,
- s.7 – brak definicji jednostki ciśnienia „barg”, zalecane jest stosowanie jednostek określonych w układzie SI, np. różnica temperatur w K a nie w °C (s.32),
- s.8 – brakuje wyjaśnienia, dlaczego czas trwania fermentacji nie powinien przekraczać 70 godzin,
- s.23-24 – w tab.1 brakuje wyjaśnienia, co oznaczają liczby w pierwszym wierszu oraz, dla których wartości gęstości sporządzono wykres na rys.4; w jaki sposób wyznaczono gęstość kwasu fosforowego,
- s.28 – brak odwołania w tekście do tabeli 3 i wyjaśnienia, co oznacza  $R^2$ ,
- s.30 – w jaki sposób wyznaczono ciepło właściwe kwasu  $C_{pi}$ ,
- s.31 – w równaniu (3)  $q$  oznacza ciepło, nie energię,
- s.39 – w równaniach (11)-(13) po prawej stronie powinna występować różnica temperatur, podobnie jak w równaniu (8),
- s.48 – brakuje komentarza do zaobserwowanego, nieoczekiwanego wzrostu stężenia kwasu fosforowego do wartości 95,2% po 4-tygodniowej inkubacji próbek metali w kwasie,
- s.84 – tytuł podrozdziału 7.4 „Plan eksperymentów” jest nieadekwatny do zawartości, treść tego podrozdziału jest odpowiednia do podrozdziału 7.5 „Metodyka przeprowadzonych prób układu i realizacja eksperymentów”,
- roz.8.2, 8.3 – brak dyskusji, dotyczącej otrzymanych wyników badań i obliczeń,
- s.106 – czy przy oszacowaniu efektywności pompy ciepła, wynoszącej powyżej 50%, uwzględniono zużycie energii przez pompę próżniową, która zapewnia osiągnięcie ciśnienia bezwzględnego w wyparce poniżej 5000 Pa?

Powyższe uwagi nie umniejszają w znaczący sposób wartości pracy. Do osiągnięć Autorki należy zaliczyć:

- opracowanie koncepcji chemicznej pompy ciepła, w której czynnikiem roboczym jest kwas fosforowy,
- wyznaczenie podstawowych parametrów fizykochemicznych i termodynamicznych kwasu fosforowego przy wykorzystaniu specjalistycznej i nowoczesnej aparatury pomiarowej,
- projekt technologiczny instalacji pilotażowej, dobór urządzeń i montaż instalacji,

- przeprowadzenie obszernych badań eksperymentalnych oraz obliczenie sprawności układu i przyrostów temperatury kwasu fosforowego.

Mgr inż. Marzena Czapnik wykazała się ogólną wiedzą związaną z zagospodarowaniem ciepła odpadowego przy wykorzystaniu pompy ciepła oraz umiejętnościami do samodzielnego prowadzenia badań eksperymentalnych. Rozprawa doktorska Autorki stanowi oryginalne rozwiązanie problemu badawczego, które zakończyło się wdrożeniem w zakładzie przemysłowym. Recenzowana praca przyczyniła się do rozwoju technologii żywności i żywienia jako dyscypliny naukowej.

W podsumowaniu stwierdzam, że przedstawiona do recenzji praca spełnia wszystkie wymagania określone w art. 13.1 Ustawy z dnia 14 marca 2003 r. o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki (Dz.U. 2003 nr 65 poz. 595 z późn. zm.) i stawiam wniosek o dopuszczenie jej do publicznej obrony.

Henryk Otwinowski

