

Gliwice, 03.04.2019

Recenzja rozprawy doktorskiej  
Mgr inż. Szymona Mocarskiego  
pt. „Analiza i ocena termodynamiczna efektywności pracy nisko i średnotemperaturowej siłowni parowej z obiegiem nadkrytycznym”  
wykonanej pod kierunkiem dr hab. inż. Aleksandry Borsukiewicz  
promotor pomocniczy dr inż. Sławomir Wiśniewski  
w Katedrze Techniki Ciepłej Wydziału Inżynierii Mechanicznej i Mechatroniki  
Zachodniopomorskiego Uniwersytetu Technologicznego w Szczecinie

## 1. Podstawa opracowania

Niniejsza recenzja została opracowana na zlecenie Pana Dziekana Wydziału Inżynierii Mechanicznej i Mechatroniki Zachodniopomorskiego Uniwersytetu Technologicznego w Szczecinie profesora Mirosława Pajor (pismo L.dz. WIMiM/153/2019 z dnia 21 marca 2019).

## 2. Wprowadzenie

Wizja wyczerpania zasobów paliw kopalnych oraz negatywne skutki dla środowiska jakie są związane z ich wykorzystywaniem w celu produkcji finalnych postaci energii, powoduje konieczność poszukiwania nowych źródeł, które mogą być dla nich alternatywą. Od pewnego czasu uważa się, że takim alternatywnym źródłem może być tzw. „energia odpadowa”, czyli energia, która jest beużytecznie odprowadzana do otoczenia, mimo tego, że nadaje się do dalszego wykorzystania w sposób ekonomicznie uzasadniony. Oprócz oczywistych zalet związanych z podniesieniem efektywności energetycznej zakładu generującego taką „odpadową” energię oraz względów ekologicznych będących skutkiem „zaoszczędzenia” wykorzystywanych paliw kopalnych, użycie zasobów odpadowych pozwala osiągnąć zyski finansowe związane z obrotem handlowym świadectwami efektywności energetycznej. Inną grupą alternatywną są odnawialne źródła energii, takie jak energia zasobów geotermalnych, energia promieniowania słonecznego czy też energia biomasy. Jednym ze sposobów wykorzystania potencjału alternatywnych źródeł energii jest obieg ORC (ang. Organic Rankine Cycle). Kluczową zaletą układu ORC w porównaniu z klasycznym obiegiem siłowni wynika z różnych właściwości cieplno-fizycznych wody oraz używanych czynników organicznych. Niestety wciąż nierozwiązanym problemem wykorzystania tego typu rozwiązań jest stosunkowo niska sprawność procesu konwersji energii. Można sprostać tej niedogodności stosując między innymi obiegi na parametry nadkrytyczne.

Z tego względu z całym przekonaniem uważam rozprawę doktorską mgr inż. Szymona Mocarskiego pt. „Analiza i ocena termodynamiczna efektywności pracy nisko i średniotemperaturowej siłowni parowej z obiegiem nadkrytycznym” za ważną zarówno z poznawczego jak i użytkowego punktu widzenia, a tematykę pracy za niezwykle aktualną.

### 3. Zakres rozprawy

Praca doktorska mgr inż. Szymona Mocarskiego zawiera łącznie 117 stron, na które składa się 10 ponumerowanych kolejno rozdziałów merytorycznych, streszczenie w języku polskim i angielskim, spis treści, spis ważniejszych oznaczeń, spis bibliografii, spis tabel i rysunków. Praca zawiera 88 rysunków, 23 tabele i 144 odnośników literaturowych. Ponadto do rozprawy dołączony jest zwarty zbiór 14-tu załączników - w sumie 141 stron tabel i rysunków, obejmujących między innymi parametry czynnika roboczego suchego i mokrego dla siłowni pod- i nadkrytycznej oraz metodykę obliczeń wielkości charakterystycznych dla obu obiegu. Załączniki te zostały również zapisane na nośniku elektronicznym i dołączone do egzemplarza rozprawy.

W rozdziale 1 zatytułowanym „Wstęp” Autor opisał podstawowe źródła energii wykorzystywane do zasilania siłowni ORC: energię wód z zasobów geotermalnych, energię odpadową, energię promieniowania słonecznego i energię biomasy. Ten 9-cio stronicowy rozdział został zakończony krótkim podsumowaniem będącym jednocześnie motywacją podjęcia tematu.

Rozdział 2 został zatytułowany „Przegląd literatury dotyczącej zastosowania nadkrytycznego obiegu Clausius-Rankine’a”. Autor nie zdefiniował w tym rozdziale pojęcia „obieg nadkrytyczny”. Nie wpływa to jednak na odbiór treści rozdziału, w którym Autor uwzględnił - jak zaznaczył - tylko prace dotyczące dwufazowych obiegu nadkrytycznych, w których stosowano czynniki robocze inne niż woda. Mgr inż. Szymon Mocarski podkreśla, że liczba prac z tego zakresu jest bardzo duża. Jednocześnie zdiagnozował kilka grup tematycznych, będących kryterium przeglądowym: analiza źródła ciepła, rodzaj wykorzystywanego czynnika roboczego, efektywność pracy siłowni. Dodano również kryterium „inne” - między innymi wpływ ciśnienia „górnego” mającego przełożenie na problemy natury technicznej wynikające m.in. z wytrzymałości materiałów. Mając na względzie źródło ciepła, przeanalizowano nadkrytyczne siłownie ORC zasilane energią geotermalną, energią odpadową, energią słoneczną oraz nadkrytyczne siłownie ORC zasilane energią pochodzącą ze spalania biomasy. W kontekście rodzaju wykorzystywanego czynnika roboczego, Autor uwzględnił ocenę ekologiczną związków chemicznych poprzez wskazanie między innymi wskaźników ODP (ang. Ozone Depletion Potential) oraz GWP (ang. Global Warming Potential). Wskazano również na konieczność doboru odpowiedniej powierzchni wymiany ciepła w zależności od stosowanego czynnika, uwzględnienia pracy pompy obiegowej. Poddano analizie również użycie dwutlenku węgla jako czynnika roboczego oraz mieszanin zeotropowych. Analizując prace z zakresu efektywności pracy nadkrytycznych obiegu ORC, Autor nie wskazuje jednoznacznie co rozumie pod pojęciem „efektywność”. Można domniemywać, że chodzi o sprawność (jak wynika z tabeli 6), ale być może także o moc (jak wynika z tabeli 7).



W rozdziale 3 pt. „Obiegi porównawcze niskotemperaturowych siłowni parowych” Autor dokonuje podziału przemian termodynamicznych na obiegi podkrytyczne i obiegi nadkrytyczne. Szczegółowo opisuje oba typy obiegu wskazując obiegi nadkrytyczne jednofazowe, dwufazowe oraz nadkrytyczny obieg Clausiusa-Rankine’a.

Rozdział 4 zatytułowano „Źródło ciepła”. Jest to krótki, jednostronicowy rozdział, w którym zostały powtórzone treści z wcześniejszych części pracy. Uważam, że rozdział ten nie wnosi niczego nowego i mógłby z powodzeniem zostać usunięty.

W rozdziale 5 Autor zdefiniował cel i szczegółowo opisał zakres pracy. Cel pracy został sformułowany w następującej treści „przeprowadzenie analizy termodynamicznej pracy siłowni parowej realizowanej według nadkrytycznego dwufazowego obiegu Clausiusa-Rankine’a”. Można by było dodać, że celem jest również analiza porównawcza uzyskanych wyników z wynikami otrzymanymi dla obiegu podkrytycznego. Sformułowano także tezę pracy, która brzmi „Dla obiegu nadkrytycznego, realizowanego w określonych warunkach doprowadzania i wyprowadzania ciepła, istnieje ciśnienie pary świeżej, przy którym efektywność pracy siłowni jest najwyższa”.

Założenia początkowe stanowią treść rozdziału 6. Autor w tym rozdziale „przemycia” kolejny cel pracy: „opracowanie modeli obliczeniowych siłowni”. Oczywiście staje się zatem, że tytułowe „założenia początkowe” dotyczą właśnie budowy modelu termodynamicznego analizowanej siłowni. W ramach rozdziału dokonano również charakterystyki analizowanych czynników roboczych.

Rozdział 7 zatytułowany został „Model matematyczny siłowni parowej pracującej wg. obiegu nadkrytycznego Clausiusa-Rankine’a”. Autor przedstawił podstawowe wielkości charakteryzujące pracę siłowni parowej pracującej wg. obiegu nadkrytycznego Clausiusa-Rankine’a opierając się na schemacie siłowni, na którym zaznaczono charakterystyczne punkty obiegu.

Najobszerniejszy (strony od 46 do 78) rozdział pracy stanowi rozdział 8 zatytułowany „Analiza termodynamiczna nadkrytycznego obiegu Clausiusa-Rankine’a”. Autor w przejrzysty sposób, z wykorzystaniem wykresów i tabel przedstawił wyniki przeprowadzonych analiz. Uwzględnił wpływ temperatury źródła ciepła oraz wartości ciśnienia „górnego” na uzyskiwaną moc, sprawność obiegu, masowe natężenie przepływu czynnika roboczego oraz moc pompy. Wielokrotnie w trakcie analizy przywołuje odpowiedni Załącznik. System ten bardzo dobrze się sprawdza w analizie uzyskanych wyników. W podpunkcie 8.4. Autor przeprowadza analizę siłowni ORC z obiegiem podkrytycznym. Celem tej analizy jest wskazanie poziomu odniesienia dla analizy układu z obiegiem nadkrytycznym. W rozdziale 8 znalazło się także miejsce na określenie pracy jednostkowej poszczególnych elementów układu oraz całego obiegu, określenie wpływu temperatury skraplania czynnika roboczego na sprawność, optymalizacja wartości ciśnienia „górnego” oraz przeanalizowanie możliwości zastosowania amoniaku jako czynnika roboczego.

Rozdział 9 zawiera Analizę egzergetyczną dla poszczególnych elementów siłowni ORC z obiegiem nadkrytycznym. W efekcie przeprowadzonej analizy stwierdzono, że najmniejsze straty egzergii występują w pompie i turbinie.

Rozdział 10 zatytułowano „Podsumowanie i wnioski końcowe”.

Podsumowując stwierdzam, że tytuł rozprawy jest adekwatny do jednoznacznie wyrażonej treści. Geneza tematu i uzasadnienie celowości jego podjęcia, jako problemu badawczego, wynika z dokładnego przeglądu istniejącego stanu wiedzy. W rozprawie postawiono cel, tezę i określono zakres badań. **Pomimo kilku przedstawionych wyżej uwag, strukturę merytoryczną i układ recenzowanej pracy uznaję za właściwe.**

#### 4. Ocena rozprawy

Zdaniem recenzenta tematyka pracy jest oryginalna, aktualna i interesująca. Na uwagę zasługuje zrealizowanie obszernego programu badań. Za główne osiągnięcia Autora pracy uważam:

- a. Opracowanie modelu matematycznego siłowni pracującej według obiegu nadkrytycznego Clausiusa-Rankine'a i przeprowadzenie wieloparametrycznych obliczeń termodynamicznych pracy nadkrytycznej siłowni ORC oraz porównanie uzyskanych wyników z obiegiem podkrytycznym.
- b. Udokumentowanie możliwości poprawy mocy oraz sprawności pracy nadkrytycznej siłowni ORC. Dodatkowo posłużono się innymi, nie stosowanymi zazwyczaj, kryteriami pozwalającymi określić „efektywność” pracy obiegu, takimi jak moc pompy oraz masowe natężenie przepływu czynnika roboczego.
- c. Udokumentowanie możliwości efektywnej realizacji obiegu nadkrytycznego Clausiusa-Rankine'a z wykorzystaniem niskowrzących czynników organicznych.
- d. Wskazanie, że najkorzystniejsze warunki pracy siłowni pracującej według obiegu nadkrytycznego Clausiusa-Rankine'a nie zawsze występują przy granicznej (maksymalnej) wartości ciśnienia „górnego”. Udowodniono, że istnieje grupa czynników obiegowych niskowrzących, których stosowanie zapewnia efektywną pracę przy pośrednich wartościach ciśnienia „górnego”. To bardzo ważne stwierdzenie pozwalające optymalizować ekonomicznie pracę takich układów. Widać w tym miejscu znaczenie aplikacyjne uzyskanych wyników.
- e. Udowodnienie, że dobór odpowiedniego czynnika roboczego stanowi kluczowy aspekt maksymalizacji parametrów pracy rozpatrywanej siłowni.
- f. Ocena egzergetyczna siłowni pracującej według obiegu nadkrytycznego Clausiusa-Rankine'a.

#### 5. Uwagi krytyczne i dyskusyjne

Po zapoznaniu się z pracą **nie wnoszę uwag krytycznych**. W dalszej części recenzji przedstawię natomiast kilka **uwag dyskusyjnych**, jakie nasunęły się podczas lektury pracy. Moim zdaniem są one istotne dla dalszej dyskusji podczas publicznej obrony:

- a. Czy sformułowanie „sealed” w odniesieniu do tzw. zamkniętych źródeł ciepła dla obiegu ORC jest powszechne w literaturze przedmiotu? Doktorant w tym względzie powołuje się na pozycję [15] autorstwa Borsukiewicz – Gozdur i [73] Mikielwicz D., Mikielwicz J. W tej drugiej pozycji takiego terminu nie odnajdziemy. Czy źródła te nie powinny być nazywane na przykład „closed” – jako przeciwieństwo do źródeł otwartych (open)?



- b. W sposób niekonsekwentny Autor przywołuje nazwy czynników roboczych wykorzystywanych w praktyce. W tabeli 1 w przypadku propanu napisano: Propan (R290), ale już w przypadku czynnika R134a nie wpisano jego pełnej nazwy. W tabeli 2 napisano CO<sub>2</sub> nie podając jego skrótu R744 (ani pełnej nazwy). Należałoby się zastanowić, czy najlepszym rozwiązaniem nie byłoby sporządzenie kompletnej listy symboli, nazw oraz formuł chemicznych wykorzystywanych czynników roboczych, np. w części „Ważniejsze oznaczenia”?
- c. Autor w sposób pobieżny potraktował szkodliwość ekologiczną wykorzystywanych czynników roboczych. Wymienił skróty ODP i GWP, nie wyjaśniając ich znaczenia. Przedstawiając je dla wybranych czynników roboczych w tabeli 2 nie przedyskutował ich wartości. Które z rozpatrywanych w pracy czynników charakteryzują się największą szkodliwością ekologiczną?
- d. Autor niewystarczająco przedyskutował wpływu stanu czynnika na uzyskane wyniki. W literaturze przedmiotu uważa się, że do pracy w organicznym obiegu Rankine’a zalecane są zwłaszcza substancje suche lub izentropowe, dla których proces rozprężania nie przebiega przez obszar dwufazowy [Chen H., Goswami Y., Stefanakos E. K., A review of thermodynamic cycles and working fluids for the conversion of low-grade heat, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 14/2010, 3059–3067]. Przegrzew par dla wymienionych czynników nie jest więc potrzebny. Co więcej, wzrost temperatury pary suchej w przypadku związków suchych będzie prowadził do spadku sprawności obiegu, zaś dla substancji izentropowych nie wpłynie istotnie na sprawność obiegu [Lecompte S., Huisseune H., van den Broek M., Vanslambrouck B., De Paepe M., Review of organic Rankine cycle (ORC) architectures for waste heat recovery, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 47/2015, 448–461]. Jedynie przegrzew par czynników mokrych zwiększa sprawność obiegu ORC, lecz zastosowanie tego zabiegu może z kolei wiązać się z wyższymi kosztami inwestycyjnymi [Bao J., Zhao L., A review of working fluid and expander selections for organic Rankine cycle, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 24/2013, 325–342.]. Czy Autor widzi tu szansę znalezienia optymalnych rozwiązań?
- e. W podrozdziale 2.2. „Analiza termodynamiczna obiegu nadkrytycznego w zależności od rodzaju czynnika roboczego” autor napisał „istotne, jest aby czynnik roboczy miał niewielki wpływ na środowisko”. Czy to jest istotne tylko w przypadku obiegów nadkrytycznych?
- f. Tabela 6 – proszę wyjaśnić pojęcie relatywny wzrost sprawności. Jak uzyskano wartość relatywnego wzrostu sprawności o 9,2% i o 12,8%?
- g. Tabela 7 – ostatnia kolumna zatytułowana jest „wzrost mocy względem izopentanu”. Jak zinterpretować wynik -4,82% w kontekście tytułowego „wzrostu”? Dlaczego wyniki są odnoszone do izopentanu? Jak zrozumieć jednostkę mocy właściwej netto – kW<sub>s</sub>/kg?
- h. Wyniki przedstawione w tabelach 9 i 10 są nieporównywalne z uwagi na inną skalę siłowni (natężenie przepływu 1,496 i 1050 kg/s; moc netto i moc elektryczna (różne nazewnictwo) od ok. 15 kW do ok. 28 MW).
- i. Czy rysunek 7 przedstawia schemat prawdziwy jedynie dla siłowni z nadkrytycznym obiegiem?
- j. Autor napisał, że przykładem obiegu nadkrytycznego jednofazowego może być obieg Fahera lub Braytona (Joule’a). Opisał natomiast tylko pierwszy z nich. Dlaczego?
- k. Autor zamiennie używa sformułowań „doprowadzenie ciepła” i „doprowadzenie energii”. Jakie przesłanki na to pozwalają?

- l. Na jakiej podstawie przyjęto założenie, że strumień ciepła przekazywany w wymienniku na drodze woda – czynnik roboczy wynosi 2514 kW?
- m. Autor zamiennie stosuje określenie „ciśnienie graniczne” i „ciśnienie krytyczne” w odniesieniu do tej samej wartości. Ponadto używa różnych symboli odnośnie tej samej wielkości:  $p_{gr}$  i  $p_{kr}$ . Zdaniem recenzenta ciśnienie krytyczne jest właśnie graniczną wartością, poniżej której nie możliwe jest przeprowadzenie gazu w stan ciekły (w temperaturze krytycznej) i należałoby pozostać przy jednoznacznym nazewnictwie, jak na rysunku 12 – ciśnienie graniczne.
- n. Autor zamiennie używa sformułowania „moc pompy”, „praca przetłaczania”, „moc przetłaczania” i „moc pompowania”. Która z tych nazw jest prawidłowa biorąc pod uwagę termodynamiczne znaczenie zjawiska jakie ma miejsce w pompie czynnika obiegowego?
- o. Czy nie należałoby się zastanowić nad celowością wykorzystania czynników obiegowych, które w założonym przedziale temperatury pary na dolocie do turbiny pozwalają uzyskać na wykresie tylko 1 punkt – butan i izobutan? W kontekście tych dwóch czynników trudno mówić o wpływie temperatury pary dolotowej do turbiny na uzyskiwaną moc.
- p. Autor zaprezentował graficznie zależności mocy obiegu ( $N_{c-R}$ ) oraz mocy pompy ( $N_p$ ), pominał natomiast moc turbiny  $N_t$ . Dlaczego?
- q. Jakie właściwości czynników roboczych determinują tak zróżnicowane wartości mocy pompy obiegowej?
- r. Autor na stronie 57 używa sformułowanie „nieprawidłowo prowadzony obieg nadkrytyczny” oraz „obieg realizowany prawidłowo”. Proszę o wyjaśnienie tych sformułowań.
- s. Amoniak, jak powszechnie wiadomo, ma szereg wad, które ograniczają jego szersze wykorzystanie. Wymaga też stosowania kosztownych i nowatorskich rozwiązań technicznych. W przypadku recenzowanej rozprawy jego użycie wymaga też zmiany założeń wstępnych przyjętych do modelu. Dlaczego zatem amoniak został uwzględniony w analizie? Jakie cechy tego czynnika o tym zdecydowały?
- t. W tabeli 18 Autor przedstawił obliczeniowe wartości ciśnień uwzględniając 4 (bądź 5) miejsc znaczących. Jaki przyrząd pomiarowy pozwoliłby na taką dokładność?

Podkreślić należy, że powyższe uwagi nie umniejszają wartości naukowej pracy i jak zaznaczyłem wcześniej mają tylko charakter dyskusyjny.

#### Uwagi edycyjne/językowe

- a. Wielokrotnie w pracy stwierdziłem brak tzw. spacji między wyrazami; praca zawiera też błędy interpunkcyjne.
- b. Brak konsekwencji w zapisie jednostek, np. [ $^{\circ}\text{C}$ ] i  $^{\circ}\text{C}$ .
- c. Symbol „t” wg spisu oznaczeń ma oznaczać temperaturę wyrażoną w stopniach Celsjusza. Autor używa również symbolu „T” by wyrazić tę samą temperaturę stopniach Celsjusza.
- d. Sformułowanie „emisja energii odpadowej” budzi wątpliwości.
- e. Użyto wielu sformułowań potocznych i slangowych: np. na str. 12 „**jak choćby** 1,5 MW układ”.
- f. Skrót, które pojawiają się po raz pierwszy w pracy winny być wyjaśnione, np. ORC na stronie 7.



- g. W pracy spotkać można liczne zaprzeczenia, np. na stronie 10: „**Teoretycznie**, odzysk energii odpadowej możliwy jest **praktycznie**”.
- h. Wielokrotnie powtarzane są wyrazy w zdaniach; np. drugie zdanie w punkcie 2.3: „**Różni** autorzy przyjmują **różne** założenia w obliczeniach, analizują **różne** warianty konfiguracji siłowni, przyjmują **różne** parametry źródła ciepła oraz **różne** czynniki robocze.”.
- i. Autor wyrażając sprawność używa równoznacznie wartości całkowitych (np. 7,83%) albo ułamkowych 0,0783% (np. tabela 5).
- j. Rysunek 8 – opis osi t- s. Komentarz autora: „na wykresie w układzie współrzędnych T-s”. Jest to niekonsekwencja Autora wskazana już w punkcie c.
- k. Brak indeksów dolnych w formułach chemicznych, np. jest CF3F, a winno być CF<sub>3</sub>F itd.
- l. Równanie (7.6) jest tożsame z równaniem (7.28).
- m. Na wykresach autor uwzględnia jedno lub dwa miejsca znaczące, np. 100,0 lub 100,00 – wystarczyłoby 100.
- n. Wielkości wypisane pod równaniem (9.1) nie mają jednostek.
- o. Poniżej zestawienie wybranych (innych) błędów:

Strona	Jest	Powinno być
5; 4 wiersz od góry	gzergii	egzergii
12; podpis pod rys. 12	w suszarnictwie przemysle drzewnym	w suszarnictwie drewna lub w suszarnictwie (przemysł drzewny)
15; przedostatni i ostatni wiersz	energii unoszonej ze spalinami	entalpii spalin
16; 3 wiersz	Bibliografa	Bibliografia
16; 3 wiersz	Bibliografa publikacji na temat	Bibliografia w zakresie zastosowania
21; drugi wiersz w pkt. 2.2.4.	Ilość publikacji	Liczba publikacji
23; tabela 6	Sprawność ciepłna	Sprawność cieplna
23; tabela 6	Wzrosts	wzrost
23; drugi akapit	Analizę siłowni	Analizę pracy siłowni
31; 3 i 2 wiersz od dołu	Na rysunku 6a; na rysunku 6b	Na rysunku 11a; na rysunku 11 b
Wielokrotnie	Wykres mocy	Zależność mocy w funkcji...
52; 1 wiersz	Natężenia przepływu	Masowego natężenia przepływu
74; 7 wiersz od góry	$\Delta t=5$	$\Delta t=5K$

## 6. Wnioski końcowe

W podsumowaniu chciałbym podkreślić, że bardzo dobrze oceniam przedstawioną do recenzji pracę. Przedstawione uwagi mają charakter dyskusyjny i nie umniejszają walorów naukowych rozprawy. Mając to na względzie stwierdzam, że przedstawiona przez Pana mgr inż. Szymona Mocarskiego rozprawa pt. „Analiza i ocena termodynamiczna efektywności pracy nisko i średniotemperaturowej siłowni parowej z obiegiem nadkrytycznym” spełnia w całości wymogi Ustawy z dnia 14.03.2003r. o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach

i tytule w zakresie sztuki (Dz.U. z dnia 21.06.2016r. poz. 882). Doktorant przedstawił w niej oryginalne rozwiązanie problemu naukowego, wykazał się ogólną wiedzą teoretyczną, a także umiejętnością samodzielnego prowadzenia pracy naukowej.

**Wobec powyższych faktów stawiam przed Radą Wydziału Inżynierii Mechanicznej i Mechatroniki Zachodniopomorskiego Uniwersytetu Technologicznego w Szczecinie wniosek o dopuszczenie przedmiotowej rozprawy do publicznej obrony.**

*Robert M. M. M.*