

Dr hab. inż. Łukasz Bartela, prof. PŚ  
Politechnika Śląska  
Wydział Inżynierii Środowiska i Energetyki  
Katedra Maszyn i Urządzeń Energetycznych  
Ul. Konarskiego 18, 44-100 Gliwice  
lukasz.bartela@polsl.pl

Gliwice, 09.12.2021

### **Recenzja pracy doktorskiej mgr inż. Piotra Lisa**

#### ***pt. A Study of a Positive Displacement Machine Application in the Supercritical Carbon Dioxide Brayton Cycle***

Recenzja wykonana została na zlecenie prof. dra hab. inż. Tomasza Wiśniewskiego, Przewodniczącego Rady Naukowej Dyscypliny Inżynieria Środowiska, Górnictwo i Energetyka w Politechnice Warszawskiej. Promotorem pracy doktorskiej jest prof. dr hab. inż. Jarosław Milewski.

#### **1. Zasadność podjęcia tematu**

Obecnie postępującym procesom dekarbonizacyjnym gospodarek towarzyszy na ogół stopniowe odchodzenie od priorytetowo dotychczas traktowanego wytwarzania energii elektrycznej w systemach scentralizowanych. Pożądane w obszarze takich transformacji jest wdrażanie systemów o dużej regulacyjności, opartych o wykorzystanie lokalnych, ekologicznych źródeł energii, a w tym źródeł ciepła odpadowego oraz paliw stanowiących produkty uboczne różnych procesów wytwórczych. Dotychczas rozproszona produkcja energii elektrycznej (w skali mocy do 1 MW), jeśli była realizowana, to z wykorzystaniem głównie silników tłokowych, które zasilane muszą być dedykowanymi paliwami gazowymi lub dedykowanymi paliwami ciekłymi. Niezależnie od źródła ciepła systemy wykorzystujące silniki cieplne, w odróżnieniu od mocno spopularyzowanych farm wiatrowych oraz elektrowni solarnych, umożliwiają produkcję energii zgodnie z charakterystykami zapotrzebowania, co jest wyjątkowo istotne z punktu widzenia wzrastającego zagrożenia pojawiania się coraz częstszych przerw w dostępie do energii. Rozwiązaniem umożliwiającymi wykorzystanie właściwie dowolnych źródeł ciepła, a w tym ciepła odpadowego z procesów przemysłowych oraz biopaliw pochodzenia odpadowego, są silniki Stirlinga, moduły wykorzystujące obieg Rankine'a z niskowrzącymi czynnikami roboczymi (ORC) lub też silniki wykorzystujące zamknięte obiegi Braytona-Joule'a. W każdym z tych przypadków ciepło do czynnika obiegowego jest doprowadzane z wykorzystaniem przeponowego wymiennika ciepła. Specyficzną odmianą silników wymienionych jako ostatnie są silniki wykorzystujące jako medium robocze nadkrytyczny dwutlenek węgla. W ostatnich latach cieszą się one coraz większą popularnością w kręgach badaczy. Zaletą tych systemów jest możliwość wykorzystania sprężarek oraz ekspanderów o stosunkowo prostych konstrukcjach, których wytwarzanie, nawet w skali mocy rzędu kilku kilowatów, może być uzasadnione z technicznego i ekonomicznego punktu widzenia. Wielką zaletą dla maszyn

projektowanych dla nadkrytycznego CO<sub>2</sub> jest ich niewielki gabaryt, na przykład w stosunku do gabarytu turbin parowych o analogicznej mocy. O ile na rynku maszyn i urządzeń znaleźć można sprężarki umożliwiające sprężenie dwutlenku węgla do ciśnień przekraczających poziom ciśnienia nadkrytycznego (7,38 MPa), to w przypadku ekspanderów rynek jest ubogi, szczególnie w zakresie maszyn o niskich mocach. Taka diagnoza rynku maszyn energetycznych oraz rosnąca popularność systemów energetycznych, wykorzystujących jako medium robocze nadkrytyczny, jak również transkrytyczny dwutlenek węgla, w pełni uzasadnia potrzebę prowadzenia analiz koncepcyjnych oraz konstrukcyjnych, a w tym optymalizacji, jakie są przedmiotem przedłożonej do recenzji pracy doktorskiej. Co istotne, o czym w rozprawie akurat nie wspomniał Doktorant, prowadzenie badań nad obiegami oraz elementami obiegów z nadkrytycznym CO<sub>2</sub> wspierać może efektami uzyskującą coraz większą popularność koncepcję magazynowania energii w sprężonym dwutlenku węgla. Rozwijane na świecie systemy tego typu mają wiele zalet w stosunku do badawczo spopularyzowanych systemów magazynowania energii w sprężonym powietrzu.

Temat doktoratu doskonale wpisuje się w ogół zagadnień badawczo-rozwojowych, mających na celu rozwój technologii umożliwiających odzysk ciepła niezależnie od potencjału ilościowego. Wzrost efektywności wykorzystania ciepła odpadowego w przemyśle jest istotnie promowanym w UE kierunkiem mogącym wesprzeć działania na rzecz ochrony klimatu.

## **2. Charakterystyka pracy**

Rozprawa doktorska składa się z 7 rozdziałów. Uzupełniają ją ponadto zamieszczone przed zasadniczą częścią pracy streszczenie (w języku polskim oraz angielskim), wykaz rysunków, wykaz tabel oraz wykaz oznaczeń. Na końcu pracy zamieszczona jest bibliografia, która odnosi się do 114 cytowanych w pracy pozycji literaturowych, przy czym Doktorant nie przytacza tutaj publikacji będących wynikiem jego własnej pracy badawczej.

W pierwszym rozdziale rozprawy, stanowiącym wprowadzenie, Doktorant przybliży motywację podjęcia się badań w obszarze obiegów z nadkrytycznym dwutlenkiem węgla (punkt 1.1). Wskazuje tutaj głównie korzystne cechy stosowania tego typu systemów, generalnie nie wychodząc poza zbiór zalet jakie w tym zakresie powszechnie są wskazywane w literaturze przedmiotu. We wprowadzeniu Doktorant formułuje tezę pracy (punkt 1.2), która wskazuje na możliwość wykorzystywania w ramach obiegów cieplnych z nadkrytycznym CO<sub>2</sub> wirnikowych maszyn waporowych (w domyśle zarówno sprężarek, jak i ekspanderów). We wprowadzeniu ponadto zgrabnie przedstawiony jest zakres tematyczny pracy (punkt 1.3) oraz jej struktura (punkt 1.4).

Rozdział 2 jest rozdziałem o największej objętości (48 stron) i w pierwszej kolejności koncentruje się na rysie historycznym, odnoszącym się do badań nad obiegami

z nadkrytycznym CO<sub>2</sub>. W rozdziale Doktorant prezentuje zestawienie (rys. 2.3) liczby patentów oraz publikacji mające wskazywać na wzrost popularności systemów, jaki miał miejsce w dwóch ostatnich dekadach. W rozdziale znaleźć można wymaganą dla doktoratu o przedmiotowej tematyce charakterystykę dwutlenku węgla, jako gazu mającego być stosowanym jako czynnik roboczy w obiegach cieplnych. Opis własności dwutlenku węgla, szczególnie dla okolic punktu krytycznego, jest bardzo szczegółowy. Doktorant prezentuje m.in. interesujące charakterystyki podstawowych wielkości opisujących własności dwutlenku węgla w funkcji temperatury oraz ciśnienia, niestety nie podając przy tym źródeł dla zaczerpniętych informacji. W tej części pracy pojawia się również argumentacja dla stosowania dwutlenku węgla z punktu widzenia bezpieczeństwa eksploatacji, podatności na degradację maszyn i urządzeń, ekologii oraz ekonomii. Bardzo cennym fragmentem rozdziału jest część poświęcona opisowi i na podstawie tego opisu wyborowi najwłaściwszego modelu gazu dla prowadzenia analiz ukierunkowanych na weryfikację postawionej w pracy tezy. Doktorant dobrze argumentuje wybór modelu Span-Wagner, zresztą powszechnie wykorzystywanego w analizach systemów na nadkrytyczny CO<sub>2</sub>. W pracy zestawiono również wyniki oceny stosowalności innych modeli gazów (tabela 2.3) dla zagadnień badawczych właściwych dla problematyki poruszanej przez Doktoranta. Doktorant traktuje rezultaty uzyskiwane z wykorzystaniem modelu Span-Wagner jako punkt odniesienia przy ocenie innych modeli gazów. Niestety w doktoracie metodologia jaka towarzyszyła prowadzeniu tych analiz nie jest dobrze wyjaśniona. W rozdziale 2 Doktorant zamieścił również klasyfikację obiegów cieplnych z dwutlenkiem węgla (nadkrytycznym, transkrytycznym oraz podkrytycznym) jako medium roboczym. Towarzyszy temu opis parametrów oraz opis podstawowych sposobów zwiększania sprawności obiegów termodynamicznych. Doktorant odwołuje się przy tym sprawnie do przypadków analizowanych w literaturze przedmiotu. Ta część pracy dobrze komponuje się ze sformułowanym w rozdziale schematem jaki powinien towarzyszyć optymalizacji obiegów cieplnych siłowni z nadkrytycznym CO<sub>2</sub>. W dalszej części rozdziału Doktorant opisuje podstawowe komponenty obiegów cieplnych systemów z nadkrytycznym CO<sub>2</sub>, wskazując przy tym na ich cechy charakterystyczne. Zdawkowo pojawiają się tutaj również równania, jakie opisują podstawowe wielkości charakterystyczne maszyn i urządzeń. Niestety Doktorant nie stosuje opisów wielkości stosowanych we wzorach, co utrudnia ich identyfikację. Rozdział drugi kończą dwa punkty, odpowiednio prezentujące obszary stosowalności obiegów z nadkrytycznym CO<sub>2</sub> oraz instalacje badawcze, jakie Doktorant zidentyfikował na świecie. Ta część pracy jest dobrze skomponowana i oparta o szerokie studium literatury przedmiotu. W opinii recenzenta rozdział 2 jest rozdziałem mocno rozproszonym tematycznie i mógł z powodzeniem zostać lepiej skonstruowany. Zawarto w nim informacje bardzo ważne z punktu widzenia metodologii prowadzenia wymaganych dla potrzeb doktoratu analiz. Fragmenty bardzo ważne przeplatają się jednak z treścią marginalnie istotną.

Rozdział 3 jest poświęcony głównie klasyfikacji tytułowych dla pracy wyporowych maszyn wirnikowych. W rozdziale przedstawiono ponadto podstawowy opis dla procesów termodynamicznych, jakie towarzyszą pełnemu cyklowi pracy tych maszyn.

Rozdział 4 w opinii recenzenta mógł korzystniej zostać zintegrowany z rozdziałem 3. Rozdział podejmuje się w miarę szczegółowego opisu konstrukcji wirnikowej maszyny wyporowej, koncentrując się tutaj głównie na elementach roboczych. W pierwszej części rozdziału Doktorant podjął się opisu podstawowych cech geometrycznych stojana oraz wirnika maszyny wyporowej. Wielkości opisujące cechy geometryczne zostały sprawnie wykorzystane w dalszej części rozdziału, gdzie Doktorant przybliżył zależności matematyczne, jakie wykorzystywane są dla kinematycznego oraz dynamicznego modelowania pracy maszyn. W podsumowaniu rozdziału (punkt 4.6 oraz 4.7) Doktorant zwraca uwagę na dwa podstawowe czynniki wpływające na degradację wskaźników efektywnościowych wyporowych maszyn wirnikowych. Są nimi tarcie oraz przecieki. Opis tych czynników jest właściwy, ale w opinii Recenzenta brakuje wskazania kierunków działań dla minimalizowania niekorzystnych efektów.

Merytorycznie najważniejszymi rozdziałami dysertacji są rozdziały 5 i 6. W rozdziale 5 Doktorant prezentuje założenia, jakie towarzyszyły analizom systemu z nadkrytycznym CO<sub>2</sub>. Doktorant prezentuje tutaj schemat obiegu, jaki został przyjęty dla analizowanego systemu, nie argumentując jednak dokonanego wyboru. Ponownie można mieć zastrzeżenia do oznaczeń wielkości fizycznych, które Doktorant stosuje w zależnościach definiujących przyjęte wskaźniki oceny, tj. sprawność termalną obiegu, sprawność całkowitą oraz efektywność odzysku ciepła (stopień odzysku ciepła). Znacznie korzystniejsze byłoby stosowanie w indeksach dolnych oznaczeń odnoszących się do zaznaczonych na schemacie (rys. 5.1) charakterystycznych punktów obiegu. W tabeli 5.4 przedstawiono zakresy wartości dla wielkości charakterystycznych, które były uzmienniane podczas prowadzonych analiz wrażliwości. Doktorant nie podaje argumentacji przemawiającej za przyjęciem skrajnych wartości dla tych zakresów. W rozdziale 5 Doktorant zestawia podstawowe wyniki analiz. Sposób prezentowania rezultatów jest zrozumiały dla czytelnika. Doktorant nie komentuje niestety uzyskanych rezultatów obliczeń. Zastrzeżenia budzić może rys. 5.3, gdzie dla zestawień dwóch wartości sprężu (2 oraz 4) oraz dwóch wartości temperatury CO<sub>2</sub> na wlocie do ekspandera (300 °C oraz 800 °C) w funkcji uzmiennianego ciśnienia oraz uzmiennianej temperatury CO<sub>2</sub> na wejściu do sprężarki prezentowane są izolinie wartości sprawności obiegu. Doktorant nie omawia w pracy braku ciągłości trendów charakterystyk, jakie występują w obszarach wykresów właściwym dla temperatury poniżej 34 °C oraz ciśnienia poniżej 78 bar. W odczuciu recenzenta dla lepszego zrozumienia uzyskanych przez Doktoranta rezultatów pomocne byłoby zestawienie dodatkowo w pracy wykresów prezentujących wpływ zmiany wartości badanych zmiennych na temperatury dwutlenku węgla w charakterystycznych punktach obiegu (takie charakterystyki mogłyby być

zestawione w załączniku do pracy). W rozdziale brakuje również dyskusji dotyczącej wpływu zmian wybranych zmiennych decyzyjnych na wielkości istotnie opisujące wykorzystywane w obiegu wymienniki ciepła. Wymienniki ciepła, a szczególnie wymiennik regeneracyjny, pracujący przy wysokich ciśnieniach dwóch czynników wymieniających ciepło, stanowi element układu istotny z punktu widzenia wyzwań konstrukcyjnych oraz wielkości nakładu inwestycyjnego. Badanie wpływu uzmiennianych wielkości na przykładowo przewodność cieplną ( $kA$ ) miałyby interesujący wymiar poznawczy. Doktorant nie komentuje braków na rys. 5.6, które objawiają się brakiem wyznaczenia charakterystyk określanych wielkości w zakresie wysokich wartości sprężu oraz niskich wartości strumienia masowego  $\text{CO}_2$ , jak również w zakresie niskich wartości sprężu oraz wysokich wartości strumienia masowego. Trudno odgadnąć, czy jest to wynik błędnej redakcji rysunku, czy też rezultat wynikający z ujawnionego podczas obliczeń dla przedmiotowych obszarów braku fizykalności zjawisk.

W rozdziale 6 Doktorant zestawia rezultaty obliczeń termodynamicznych ukierunkowane na określenie wpływu zmian kinematycznych parametrów pracy wirników sprężarek oraz ekspanderów na podstawowe charakterystyki efektywnościowe. Analizy prowadzone były również dla różnych założeń dotyczących cech geometrycznych wirników. Prezentowane rezultaty są interesujące i z punktu widzenia matematycznych opisów zastosowanych modeli nie budzą zastrzeżeń. Dla uwiarygodnienia uzyskanych rezultatów właściwe byłoby przeprowadzenie walidacji stosowanych modeli, najkorzystniej w oparciu o rezultaty eksperymentalnych badań stanowiskowych. Doktorant podobny wniosek formułuje w podsumowaniu pracy, wskazując jako celową potrzebę budowy odpowiedniego prototypu.

Ostatni rozdział dysertacji stanowi podsumowanie wszystkich zrealizowanych przez Doktoranta prac. Końcowe wnioski odnoszą się głównie do zaobserwowanych zależności jakie łączą parametry kinematyczne pracy oraz geometrię wirnika maszyn waporowych ze wskaźnikami efektywnościowymi. Doktorant formułuje w podsumowaniu zdanie wskazujące na słuszność tezy jaka została sformułowana we wprowadzeniu do pracy. Na ostatniej stronie pracy Doktorant formułuje dalsze wyzwania badawcze.

Podsumowując stwierdzam, iż przedłożona mi do recenzji praca ma w mojej ocenie niekorzystną proporcję jeśli chodzi o udział części teoretycznej oraz udział części merytorycznej. Część teoretyczna pracy w pełni przybliży przedmiot badań oraz tło dla prowadzonych podczas doktoratu prac badawczych. W części merytorycznej (rozdziały 5 i 6) Doktorant formułuje przedmiot analizy, prezentuje założenia, rezultaty oraz wnioski z przeprowadzonych prac badawczych. Jeśli chodzi o część merytoryczną to należy zaznaczyć, iż wyzwania badawcze, jakie Doktorant postawił przed sobą, było wymagające. Stosunkowo niewielka objętość części merytorycznej (40 stron) wynika raczej z ubogiej treści, jaką Doktorant sformułował dla przeprowadzenia dyskusji nad uzyskanymi

rezultatami. W mojej opinii w pracy znajdują się również luki w zakresie opisów metodologii prowadzenia badań oraz w zakresie argumentacji względem stosowanych założeń.

### 3. Uwagi o charakterze redakcyjnym


Forma książkowa w formacie B5 jest wygodna dla czytelnika. Praca jest napisana językiem technicznym. Błędy natury merytorycznej, stanowiące podstawę do dyskusji podczas obrony doktoratu, wskazano w punkcie 2. Praca zawiera niewielką liczbę błędów natury redakcyjnej. Dotyczy to głównie stosowania złych oznaczeń oraz błędnych odniesień. Przykładowe błędy znalezione na etapie czytania pracy to:

- złe odwołanie do rysunku na stronie 26 (zamiast Fig. 2.13 powinno być Fig. 2.6),
- często pojawiające się w tekście odwołanie do Rozdziału 0, którego w pracy nie ma (np. strony: 116, 131, 132).

### 4. Podsumowanie

Podsumowując, stwierdzam, iż przedstawiona mi do recenzji praca doktorska mgra inż. Piotra Lisa w istotny sposób rozwija tematykę dotyczącą obiegów cieplnych z nadkrytycznym dwutlenkiem węgla, a szczególnie w tym obszarze metodologię badań wirnikowych maszyn waporowych. Z treści rozprawy wnioskuję, iż Doktorant posiada wiedzę teoretyczną w obszarze termodynamiki oraz mechaniki technicznej, co też umożliwiło mu udowodnienie tezy sformułowanej we wprowadzeniu do rozprawy. Przytoczona wiedza oraz umiejętności umożliwiły opracowanie wielu narzędzi symulacyjnych, zarówno umożliwiających prowadzenie analiz systemowych, jak również bardziej szczegółowych analiz, ukierunkowanych na badanie najistotniejszych elementów systemów na nadkrytyczny dwutlenek węgla, tj. sprężarek oraz ekspanderów. Za nowość należy uznać przeprowadzenie analiz dla wirnikowych maszyn waporowych wykorzystujących nadkrytyczny dwutlenek węgla, stanowiących w energetyce stosunkowo wąską grupę maszyn roboczych.

Pragnę podkreślić, iż sformułowane przeze mnie uwagi krytyczne odnoszące się do dysertacji nie mają wpływu na pozytywną jej ocenę. Będąca przedmiotem oceny rozprawa doktorska mgra inż. Piotra Lisa pt. *A Study of a Displacement Machine Application in the Supercritical Carbon Dioxide Brayton cycle* spełnia wymogi określone w Ustawie o Stopniach Naukowych i Tytule Naukowym oraz Stopniach i Tytule w Zakresie Sztuki. W związku z powyższym stawiam wniosek o skierowanie rozprawy doktorskiej do publicznej obrony.

  
Dr hab. inż. Łukasz Bartela, Prof. PŚ  
Katedra Maszyn i Urządzeń Energetycznych  
Politechnika Śląska