

prof. dr hab. inż. Janusz Zmywaczyk
Zakład Aerodynamiki i Termodynamiki
Wojskowa Akademia Techniczna
e-mail: janusz.zmywaczyk@wat.edu.pl

Warszawa, dnia 29 sierpnia 2023 r.

RECENZJA

rozprawy doktorskiej mgr. inż. Bartłomieja Rutczyka

pt. " *Experimental and mathematical investigation into the heat-transfer processes within the heat exchangers of an α type Stirling engine* "

Promotor: prof. dr hab. inż. Ireneusz Szczygieł
Politechnika Śląska
Wydział Inżynierii Środowiska i Energetyki

Praca doktorska reprezentuje dyscyplinę: *Inżynieria Środowiska, Górnictwo i Energetyka*.

Podstawą opracowania recenzji jest pismo nr RIE-BD.512.45.2023 z dnia 10 lipca 2023 r. Przewodniczącego Rady Dyscypliny Inżynieria Środowiska, Górnictwo i Energetyka prof. dr. hab. inż. Andrzeja Rusina z prośbą o ocenę rozprawy doktorskiej.

1. Sylwetka Doktoranta

Pan mgr inż. Bartłomiej Rutczyk ukończył w 2018 roku studia wyższe drugiego stopnia prowadzone na Wydziale Inżynierii Środowiska i Energetyki Politechniki Śląskiej uzyskując tytuł magistra inżyniera na podstawie obronionej pracy dyplomowej pt. " *A zero-dimensional, real gas model of an alpha Stirling engine* ", napisanej pod kierunkiem prof. dr. hab. inż. Ireneusza Szczygła. Dalszą naukę kontynuował pod kierunkiem obecnego promotora na studiach wyższych trzeciego stopnia zwanymi studiami doktoranckimi prowadzonymi w macierzystej uczelni jeszcze na starych zasadach. W trakcie studiów doktoranckich Kandydat pogłębiał swoją wiedzę dotyczącą głównie silnika Stirlinga skupiając się na takich zagadnieniach jak:

- zależności korelacyjne na liczbę Nusselta w odniesieniu do czynnika roboczego zawartego w przestrzeni cylindrycznej maszyn tłokowych;
- wpływ regeneratora na osiągi zimnego silnika Stirlinga w różnych warunkach pracy;
- termoeologiczna ocena silnika Stirlinga z regeneratorem zasilanym egzergią kriogeniczną skroplonego gazu ziemnego;
- zero-wymiarowy drugiego rzędu rzeczywisty model gazowy silnika Stirlinga typu α ;
- okresowy pomiar temperatury gazu jako odwrotny problem wymiany ciepła.

Mierzalnym efektem jakości prowadzonych badań są współautorskie publikacje Doktoranta zamieszczone w prestiżowych czasopismach naukowych posiadające wysoki współczynnik wpływu ($IF > 7$) i wymienione na liście MEiN jako czasopisma za 200 pkt. Są to: *Energy* (3)



oraz *Energy Conversion and Management* (2), a ostatnio również jedna praca z listy MEiN za 140 pkt opublikowana w *International Journal of Thermal Sciences* w 2023 r. Dodatkowo Doktorant jest współautorem 3 artykułów za 20 lub 40 pkt. oraz 4 publikacji w recenzowanych materiałach z konferencji międzynarodowych, 4 rozdziałów w monografiach naukowych, a ponadto 2 przyznanych patentów krajowych. Na dzień ukończenia redakcji tej recenzji mgr inż. Bartłomiej Rutczyk może pochwalić się następującymi wskaźnikami: w bazie SCOPUS - liczba publikacji (9), liczba cytowań z wyłączeniem autocytowań (54), wskaźnik Hirscha $h=5$, natomiast w bazie WoS Core Collections - liczba publikacji (7), liczba cytowań z wyłączeniem autocytowań (36), wskaźnik Hirscha $h=5$. Na całościowy dorobek publikacyjny Doktoranta składa się 19 prac, dla których sumaryczny IF=43,002, sumaryczny SNIP=12,617; a sumaryczna liczba punktów wg MEiN jest równa 1630.

Kandydat nie ubiegał się wcześniej o nadanie stopnia doktora. Obecnie jest doktorantem Katedry Techniki Ciepłej Politechniki Śląskiej w Gliwicach.

2. Omówienie treści rozprawy

(tytuł rozprawy doktorskiej, ocena układu rozprawy doktorskiej, w tym informacje o poszczególnych częściach składowych, ocena zastosowanego piśmiennictwa w ramach rozprawy doktorskiej, wskazanie oraz ocena celu pracy Kandydata)

2.1 Ogólna charakterystyka rozprawy doktorskiej

Przedłożona do recenzji w formie papierowej (A4) rozprawa doktorska mgr. inż. Bartłomieja Rutczyka pt. „*Experimental and mathematical investigation into the heat-transfer processes within the heat exchangers of an α type Stirling engine*”, co można przetłumaczyć na język polski jako:

„*Badania eksperymentalne i matematyczne procesów wymiany ciepła w wymiennikach ciepła silnika Stirlinga typu α* ”,

jest pracą teoretyczno-przeglądową z elementami symulacji numerycznych i badań eksperymentalnych silnika *Genoastirling ML3000* ukierunkowaną na modelowanie procesów cieplnych zachodzących w silnikach Stirlinga typu α .

Pomimo tego, iż osobiście uważam, że rozprawa doktorska powinna być napisana w języku ojczystym Kandydata ze względu na subtelności językowe i związane z tym wyrażanie swoich myśli na piśmie, niemniej jednak przyjmuję do wiadomości fakt, że Doktorant część swoich wyników badań zdołał już opublikować w latach (2019-2021) w języku angielskim w wiodących dla dyscypliny *Inżynieria Środowiska, Górnictwo i Energetyka* czasopismach naukowych o wysokim wskaźniku wpływu IF. Należy tu wymienić:

- [R1.1] Bartłomiej **Rutczyk**, Ireneusz Szczygieł: "Development of internal heat transfer correlations for the cylinders of reciprocating machines." *Energy* 230 (2021): 120795.
- [R2.1] Bartłomiej **Rutczyk**, Ireneusz Szczygieł, Zbigniew Buliński: "A zero-dimensional, real gas model of an α Stirling engine." *Energy Conversion and Management* 199 (2019): 111995.
- [R2.2] Bartłomiej **Rutczyk**, Ireneusz Szczygieł, Adam Kabaj: "Evaluation of an α type Stirling engine regenerator using a new differential model." *Energy* 209 (2020): 118369.
- [R2.3] Wojciech Stanek, Tomasz Simla, Bartłomiej **Rutczyk**, Adam Kabaj, Zbigniew Buliński, Ireneusz Szczygieł, Lucyna Czarnowska, Tomasz Krysiński, Paweł Gładysz: "Thermoeological assessment of Stirling engine with regenerator fed with cryogenic exergy of liquid natural gas (LNG)." *Energy* 185 (2019): 1045-1053.

[R2.4] Zbigniew Buliński, Adam Kabaj, Tomasz Krysiński, Ireneusz Szczygieł, Wojciech Stanek, Bartłomiej **Rutczyk**, Lucyna Czarnowska, Paweł Gładysz "A Computational Fluid Dynamics analysis of the influence of the regenerator on the performance of the cold Stirling engine at different working conditions." *Energy Conversion and Management*, 195 (2019): 125-138.

Wymienione powyżej współautorskie publikacje Doktoranta dotyczą oceny istniejących oraz opracowaniu własnych modeli matematycznych wymiany ciepła, zwłaszcza w odniesieniu do regeneratora silnika Stirlinga. Warto tu wspomnieć, że choć silnik ten został opatentowany przez Roberta Stirlinga 207 lat temu stał się on ponownie, po dość długiej przerwie, obiektem intensywnych badań naukowych ukierunkowanych na opracowanie możliwie prostych modeli matematycznych rzeczywistych maszyn cieplnych pracujących zgodnie z obiegiem Stirlinga. Trudność tkwi tutaj w złożoności procesów fizycznych zachodzących w trakcie pracy takich maszyn. W dużym uproszczeniu, w przypadku silnika Stirlinga typu α , dotyczy to złożonej wymiany ciepła pomiędzy czynnikiem roboczym znajdującym się w przestrzeniach sprężania oraz rozprężania połączonych ze sobą chłodnicą, regeneratorem i nagrzewnicą, a dodatkowo występującemu nieustalonemu przepływowi wstecznemu tego czynnika. W tym miejscu pragnę podkreślić, że:

Podjęta przez Doktoranta tematyka badawcza jest jak najbardziej aktualna i inspirująca

2.2. Układ rozprawy doktorskiej

Praca została zredagowana w języku angielskim na 150 stronach. Układ pracy jest typowy dla tego typu opracowań naukowych. Obejmuje on: wstęp, 4 zasadnicze dla tej pracy rozdziały po których zamieszczono w rozdziale szóstym podsumowanie i wnioski końcowe. Całość poprzedza spis treści i wykaz oznaczeń, a w końcowej części podano bibliografię liczącą 95 pozycji, w tym 22 opracowania monograficzne, 5 raportów z badań, 2 prace doktorskie, 65 artykułów naukowych i referatów konferencyjnych oraz 1 odnośnik do strony internetowej jak również zbiorczy wykaz rysunków (89) i tabel (18), które wzbogacają stronę edycyjną pracy. Doktorant przy wyborze cytowanej literatury kierował się nie tylko najnowszymi publikacjami ale także, co zasługuje na pochwałę, powołał się na kilka fundamentalnych pozycji źródłowych do których można zaliczyć prace Nusselta z 1923 i 1928 roku, Eichelberga z 1939 r lub Pfriema z 1943 r.. Podsumowując tą część pracy stwierdzam, że:

Wybór cytowanej przez Autora literatury jest moim zdaniem aktualny, trafny i dobrze przemyślany.

W rozdziale pierwszym zatytułowanym „Wprowadzenie” liczącym 13 stron Kandydat przedstawił motywy jakimi kierował się przy wyborze tematu pracy. Krytyczna kwerenda literatury przedmiotu dokonana przez Doktoranta doprowadziła go do wniosku, że wymiana ciepła zachodząca wewnątrz silnika Stirlinga, a przede wszystkim jej opis matematyczny pozostaje nadal zagadnieniem otwartym. Podane powyżej spostrzeżenie poparte wynikami badań własnych doprowadziło Kandydata do sformułowania dwóch głównych tez naukowych w postaci:

- **Modelowanie silników Stirlinga może być pomyślnie przeprowadzone przy użyciu prostych modeli, pod warunkiem doboru odpowiednich korelacji wymiany ciepła (związanych z liczbą podobieństwa Nusselta).**
- **Gęstość mocy silnika Stirlinga w niektórych przypadkach może być znacznie poprawiona poprzez umiarkowane zwiększenie wewnętrznego transportu ciepła.**

W dalszej części tego rozdziału znajdujemy krótki rys historyczny rozwoju silników Stirlinga, a następnie podstawowe podejścia do zagadnienia modelowania matematycznego wewnętrznej

wymiany ciepła. Omówiono tutaj bardzo skrótowo następujące modele: idealny model izotermiczny, prosty model adiabatyczny, model „SIMPLE” Uriela oraz model politropowy. Warto w tym miejscu zwrócić uwagę na konsekwencje fizyczne jakie niosą ze sobą niektóre z tych modeli. Przykładowo, analiza Schmidta oparta na idealnym modelu izotermicznym silnika Stirlinga prowadzi do błędnego wniosku, że wszystkie procesy wymiany ciepła zachodzą tylko przez granice izotermicznych przestrzeni sprężania i rozprężania, co w przypadku silnika Stirlinga typu α sprowadza się do stwierdzenia, że konieczne do jego pracy wymienniki ciepła, czyli chłodnica, rekuperator i nagrzewnica są zbędne. Kolejny, historycznie rzecz ujmując, najprostszy model adiabatyczny jest już wolny od tego błędu ale zakłada on, że gazy opuszczające wymienniki ciepła mają stałą temperaturę. Przytoczone powyżej modele izotermiczny i adiabatyczny, nie pozwalają jednak na analizę zjawisk cieplnych zachodzących we wnętrzu cylindrów silnika ze względu na założenie wartości temperatury w objętościach kontrolnych.

Rozdział drugi, najbardziej obszerny liczący 56 stron, poświęcony jest zero-wymiarowemu (0D) modelowaniu matematycznemu silnika Stirlinga typu α , czyli opartemu na rozwiązywaniu różnicowych bilansów masy i energii. Elementem nowości jest w tym przypadku przyjęcie modelu gazu rzeczywistego, który podlega przemianom politropowym. Autor przedstawił i omówił szereg dostępnych w literaturze wzorów korelacyjnych na liczbę Nusselta dotyczących wewnętrznej wymiany ciepła w odniesieniu do maszyn tłokowych, silników spalania wewnętrznego, głównie silników wysokoprężnych, oraz silników Stirlinga. Krytycznej analizie poddał wzory korelacyjne zaproponowane przez: Nusselta (1923, 1928), Eichelberga (1939), Elsera (1954), Woschni (1967), Annanda (1963), Adaira (1972), Le Feuvre'a (1969), Hohenberga (1979), Disconzi (2012), Aignera (1972), Lawtona (1987), Kornhausera i Smith'a, Lekica i Koka (2008-2011), Toda (1994), Liu (1984), Fagotti (1998), Kanzaka i Iwabuchi (1992), Zhao i Chenga (1994), Xiao (2014), Organa (2013). W dalszej części tego rozdziału znajdujemy model 0D regeneratora oraz wyniki analizy wpływu porowatości i ciepła właściwego materiału regeneratora oraz czasu dmuchania na jego efektywność cieplną. W zakończeniu rozdziału drugiego Autor przedstawił wyniki testów walidacyjnych opracowanego modelu 0D w oparciu o rezultaty obliczeń CFD regeneratora oraz w oparciu o wyniki pomiarów układu kogeneracyjnego ciepła i prądu „Cleanergy C9C” opartego na silniku Stirlinga, które zostały udostępnione Kandydatowi podczas jego stażu naukowego na Wydziale Mechanicznym Politechniki w Żylinie na Słowacji.

Rozdział trzeci (15 stron) dotyczy opisu stanowiska pomiarowego zawierającego podwójny silnik Stirlinga typu α Genoastirling ML3000 umożliwiający generację prądu o teoretycznie maksymalnej mocy 3 kW. Utworzone na bazie tego silnika stanowisko badawcze umożliwia wykonanie pomiarów i akwizycji podstawowych wielkości fizycznych takich jak: ciśnienie, temperatura, objętość czy prędkość obrotowa w funkcji kąta obrotu.

Zasadnicze dla tej pracy wyniki badań Autor zamieścił w rozdziałach czwartym (12 stron) i piątym (30 stron). Dotyczą one opracowania metodyki walidacji modelu 0D i badania jego wrażliwości oraz dopasowania modelu 0D w połączeniu z jedną z wybranych zależności korelacyjnych Kanzaka i Iwabuchi, Annandai Pinfeldora oraz Tody do wyników badań doświadczalnych uzyskanych za pomocą silnika Genoastirling ML3000. Na koniec znajdujemy



posumowanie całościowe pracy i wypływające z niej wnioski końcowe (3 strony), które Autor przedstawił w rozdziale szóstym.

Stwierdzam, że układ pracy jest poprawny i składa się w logiczną całość.

3. Ocena rozprawy doktorskiej

(wskazanie oraz ocena zastosowanych metod badawczych, ocena części rozprawy doktorskiej dotyczącej omówienia wyników badań, informacje dotyczące praktycznego zastosowania uzyskanych wyników badań, ocena czy rozprawa doktorska stanowi oryginalne rozwiązanie problemu naukowego, ocena czy rozprawa doktorska prezentuje ogólną wiedzę teoretyczną Kandydata w dyscyplinie albo dyscyplinach oraz umiejętność samodzielnego prowadzenia pracy naukowej)

Recenzowana rozprawa doktorska mgr inż. Bartłomieja Rutczyka jest bardzo wartościowym opracowaniem naukowym poświęconym uproszczonemu modelowaniu matematycznemu procesów wymiany ciepła zachodzących w wymiennikach ciepła silnika Stirlinga typu α oraz badaniom doświadczalnym silnika Genoastirling ML3000 w trakcie jego pracy. Opracowany model 0D drugiego rzędu taktujący czynnik roboczy jako gaz rzeczywisty podlegający przemianom politropowym, a następnie porównany z wynikami obliczeń CFD o dużej dokładności, jak również z udostępnionymi przez Politechnikę w Żylinie wynikami testów silnika Cleanergy C9C stał się podstawą do opracowania zależności sprawności termicznej silnika Stirlinga od efektywności cieplnej regeneratora przedstawionej na rysunku 2.14. Z analizy tego wykresu wynika, że niewielki wzrost efektywności regeneratora w zakresie od 0,92 do 0,95 powoduje silny wzrost jego sprawności od 0,2 do 0,45. Wniosek ten, stanowiący pierwszą tezę tej pracy, ma charakter poznawczy i w dużym stopniu może przyczynić do zwiększenia sprawności termicznej silnika Stirlinga już na etapie jego projektowania. W tym celu, jak słusznie Autor zauważył, fundamentalne znaczenie dla poprawnego odwzorowania pracy silnika, za pomocą opracowanego modelu, ma dobór odpowiedniej korelacji na liczbę Nusselta w odniesieniu do jego wewnętrznej wymiany ciepła. Stąd, uzasadnionym działaniem podjętym przez Autora, było zbadanie przydatności dostępnych w literaturze 25 korelacji dotyczących wewnętrznej wymiany ciepła w maszynach tłokowych, poczynając od prac Nusselta z 1923 oraz 1928 roku aż do pracy Xuao z 2014 roku, w połączeniu z opracowanym modelem 0D, do odwzorowania pracy silnika Genoastirling ML3000. Drugi, fundamentalny wniosek można wyciągnąć na podstawie analizy zależności mocy indykatorowej silnika Genoastirling ML3000 w zależności od wartości wewnętrznego współczynnika przejmowania ciepła α , przedstawionej na rysunku 1.1. Wynika z niego, że istotny wzrost mocy silnika ma miejsce w zakresie zmian współczynnika α od 0 do 200 W/m²/K. Spostrzeżenie to stało się podstawą sformułowania drugiej tezy tej pracy.

Rezygnacja z zastąpienia czynnika roboczego modelem gazu doskonałego na korzyść modelu gazu rzeczywistego jest w pełni usprawiedliwiona. Wynika to z warunków pracy silnika Genoastirling ML3000 (temperatura nagrzewnicy 850-950 °C, ciśnienie azotu w przestrzeni buforowej 5-13 bar). W tych warunkach pojawiają się pewne odstępstwa azotu od właściwości fizycznych gazu doskonałego. Jednocześnie generuje to większą złożoność obliczeniową modelu 0D ze względu na dość skomplikowane zależności pomiędzy właściwościami termodynamicznymi gazu rzeczywistego. Racjonalnym wyjściem z tej sytuacji

było wykorzystanie biblioteki CoolPROP. Warto też podkreślić, że opracowany model 0D umożliwia uwzględnienie strat ciśnienia, przepływów zwrotnych gazu roboczego oraz strat ciepła przez ścianki cylindrów, a przede wszystkim umożliwia znaczące, w stosunku do modelu CFD, obniżenie złożoności obliczeniowej, co pozwoliło skrócić czas obliczeń z kilku dni do około 200s. Porównanie wyników obliczeń CFD oraz modelu 0D, w którym dla uproszczenia przyjęto, że siatka druciana regeneratora o długości 80 mm i średnicy drutu 0,09 mm została potraktowana jako element o parametrach skupionych i znanej porowatości okazało się być w dużym stopniu zgodne. Dotyczy to mocy silnika geometrycznie przedstawionej na wykresie T-s (rysunki 2.11, 2.12), uzyskanej przy uwzględnieniu wzoru korelacyjnego Woschni oraz temperatury gazu wypływającego z rekuperatora w funkcji czasu dla porowatości $\varepsilon = (0,7; 0,8; 0,9)$ pokazanej na rysunkach 2.15-2.17 przy uwzględnieniu korelacji na liczbę Nusselta opracowanej przez Gedeona i Wooda. Również, w odniesieniu do mocy elektrycznej silnika Cleanergy C9C, model politropowy gazu rzeczywistego zaimplementowany w podejściu Autora 0D przy uwzględnieniu korelacji Tody, Woschni oraz Adaira umożliwia uzyskanie wyników bardziej zbliżonych do danych eksperymentalnych niż model adiabatyczny, a zwłaszcza w przypadku wyznaczenia sprawności termicznej silnika (rysunki 2.19 i 2.20). Przeprowadzone testy walidacyjne opracowanego modelu 0D potwierdziły wstępnie dużą jego przydatność do modelowania pracy silnika Stirlinga, a zwłaszcza wykazały krótki czas obliczeń przy zastosowaniu typowo wyposażonego komputera, co ma duże znaczenie w przypadku prowadzenia analizy parametrycznej. Przekonywujący dowód walidacyjny opracowanego modelu 0D dostarczył silnik Genoastirling ML3000. Pozwolił on dostroić model 0D przy uwzględnieniu danych eksperymentalnych. Najbardziej przydatnymi wzorami korelacyjnymi do modelowania wewnętrznej wymiany ciepła okazały się być korelacje: Kanzaki i Iwabuchi, Annandy i Pinfolda oraz Tody. Dodatkowo, Autor uzyskał poprawę dokładności odwzorowania charakterystyki mocy wyjściowej testowanego silnika poprzez wprowadzenie czynnika poprawkowego C_f uwzględniającego zmianę ciśnienia gazu. Wyniki badań walidacyjnych zostały udostępnione na rysunkach 5.1- 5.36 i stanowią dowód na to, że autorski model 0D podparty dobrze dobranymi korelacjami wewnętrznej wymiany ciepła może być z powodzeniem wykorzystany do modelowania silnika Stirlinga typu α . **W tym miejscu chciałbym podkreślić wysoki poziom prowadzonych przez Autora badań oraz ich duże znaczenie poznawcze oraz uytylitarne**

Czytając tekst rozprawy trudno jest znaleźć miejsce, w którym Doktorant przedstawił swoje osiągnięcia naukowe. Po zapoznaniu się jednak z przedstawionymi wynikami badań uważam, że do osiągnięć Autora można zaliczyć:

- opracowanie modelu zero-wymiarowego drugiego rzędu silnika Stirlinga typu α , w którym czynnik roboczy jest traktowany jako gaz rzeczywisty podlegający przemianom politropowym uzupełniony odpowiednimi wzorami korelacyjnymi wiążącymi liczbę Nusselta z parametrami czynnika roboczego i elementami silnika, których odpowiedni wybór dostarcza test walidacyjny;
- sformułowanie hipotezy o istnieniu zależności korelacyjnej wiążącej liczbę podobieństwa Westa z wielkością ciśnienia czynnika. Oznacza to, że rozbieżności

pomiędzy liczą Westa obliczoną z modelu a wyznaczoną na podstawie pomiarów są funkcją ciśnienia;

- zebranie i przeanalizowanie dostępnych w literaturze zależności korelacyjnych dotyczących wewnętrznej wymiany ciepła w maszynach tłokowych pod kątem ich przydatności do modelowania pracy silnika Stirlinga typu α ;
- opracowanie metodyki kilkustopniowej walidacji opracowanego modelu 0D.

Na podstawie powyższego mogę stwierdzić, że rozprawa doktorska mgr. inż. Bartłomieja Rutczyka jest wartościowym, tak z teoretycznego jak i z praktycznego punktu widzenia opracowaniem naukowym, prezentującym ogólną wiedzę teoretyczną Kandydata w dyscyplinie Inżynieria Środowiska, Górnictwo i Energetyka. Problem badawczy został wyodrębniony i przedstawiono jego oryginalne rozwiązanie, a tezy pracy zostały potwierdzone wynikami badań.

4. Uwagi dyskusyjne oraz szczegółowe

1. Autor powołując się na tom 3 monografii prof. Ochęduszko [54] przedstawia pierwszą zasadę termodynamiki dla układu cylinder-tłok przy wykorzystaniu ekstensywnych wielkości dotyczących energii wewnętrznej U , entalpii H , ciepła Q oraz pracy L w postaci: $dU = dH+dQ+dL$, gdzie $H=hm=U+pV$. Równanie to, jak i jego źródło zostało już wcześniej podane w pracy [R2.1, Eq. (9)]. Nie chcę tutaj występować w roli superrecenzenta, ale muszę zaznaczyć, że zarówno źródło jak i sama formuła są niepoprawne, bowiem pierwsza zasada termodynamiki jest przedstawiona w tomie pierwszym opracowania [54] w innej postaci. W termodynamice technicznej (patrz S. Wiśniewski, *Termodynamika techniczna*, WNT Warszawa 1980) zasada ta wyraża się wzorem: $dU = hdm+\delta Q-\delta dL$, gdzie zapis δQ , δL oznacza, że wielkości te nie jest różniczkami zupełnymi.
2. Wzór (2.2), który Autor przytacza z pracy [2] jest niepoprawny i nie występuje on w takiej postaci w pracy [2]. Łatwo jest zauważyć, że pierwszy człon po prawej stronie wzoru (2.2) ma wymiar $[m]$, a drugi człon jest bezwymiarowy $[-]$, gdyż zawiera on czynnik bezwymiarowy $(r/l)/4$, w którym r oznacza promień korby, a l – długość korbowodu. Również prawa strona wzoru (2.3) posiada niepoprawnie postawiony znak „minus”, gdyż pochodna po kącie φ , zależnym od czasu t funkcji $(-\cos\varphi)$ wynosi $(+\sin\varphi \cdot (d\varphi/dt)) = \omega \sin\varphi$. Wzory (2.2), (2.3) zostały dokładnie przepisane z pracy [R2.1] jako Eqs. (2),(3).
3. Kierunek przepływu pracy zaznaczony strzałką w lewej części rysunku 2.1 nie jest zgodny z opisem podanym na końcu strony 23. Znaki przy ciepłe i pracy po prawej stronie równania (2.10) nie są zgodne z kierunkiem przepływu ciepła i pracy zaznaczonymi w części lewej rysunku 2.1.
4. Jaki jest wkład Autora w pracach [R2.3, R2.4], w których liczba współautorów wynosi co najmniej 8 osób?

Uwagi szczegółowe

Lp.	Strona	Zapisano	Powinno być
1	5	H, h, enthalpy, specific enthalpy, kg	H, h, enthalpy, specific enthalpy, J, J/kg

2	5	κ , specific heat ration, -	κ , specific heat ratio, -
3	14	ϵ_{com} is the compression ration	ϵ_{com} is the compression ratio
4	23	Figure 2.1, dW , dQ	δL , δQ
5	23	energy... enters as the heat flux	energy... leaves as the heat

Wymienione powyżej uwagi nie mają wpływu na wartość merytoryczną tej pracy i nie umniejszają jej znaczenia.

5. Podsumowanie i wniosek końcowy

Przedłożona do recenzji rozprawa doktorska mgr. inż. Bartłomieja Rutczyka dotyczy ważnego problemu naukowego jakim jest modelowanie wewnętrznej wymiany ciepła silnika Stirlinga typu α możliwie dokładnie i przy niskim nakładzie obliczeniowym. Autor dostrzegł i rozwiązał problem naukowy proponując model zero-wymiarowy drugiego rzędu, traktując czynnik roboczy jako gaz rzeczywisty podlegający przemianom politropowym, natomiast trudny do wyznaczenia wewnętrzny współczynnik przejmowania ciepła określił na podstawie dobrania odpowiednich korelacji na liczbę Nusselta. Po dokonaniu walidacji zaproponowanego modelu w oparciu o dokładne obliczenia CFD, dane pomiarowe silnika Cleanergy C9C oraz wyniki pomiarów przeprowadzone na dostępnym silniku Genoastirling ML3000 wytypował najbardziej odpowiednie zależności korelacyjne na liczbę Nusselta. Wyniki tej pracy podkreślają rolę i znaczenie regeneratora w odniesieniu do sprawności termicznej silnika Stirlinga. Nowatorskie jest sformułowanie hipotezy o istnieniu korelacji pomiędzy liczbą podobieństwa Westa a ciśnieniem czynnika roboczego.

Udowodnienie postawionych na wstępie dwóch ważnych, tak z naukowego jak i z aplikacyjnego punktu widzenia, tez pracy wymagało od Doktoranta umiejętności zaplanowania i prowadzenia badań naukowych oraz symulacji numerycznych, które świadczą o jego zdolności do samodzielnego prowadzenia badań naukowych. Mgr inż. Bartłomiej Rutczyk poszerzył w znacznym stopniu swoją wiedzę w zakresie wymiany ciepła, modelowania zagadnień wymiany ciepła i masy, metrologii pomiarów cieplnych i elektrycznych. Uważam, że niezależnie od napotkanych błędów językowych, krytycznych komentarzy i uwag wyniki badań przedstawione w tej pracy są bardzo wartościowe i zostały już poddane ocenie międzynarodowego środowiska naukowego, czego wynikiem są opublikowane prace współautorskie w prestiżowych czasopismach naukowych, które na liście MEiN mają przyznane co najmniej 140 pkt.

W moim przekonaniu rozprawa doktorska mgr. inż. Bartłomieja Rutczyka pt. „Experimental and mathematical investigation into the heat-transfer processes within the heat exchangers of an α type Stirling engine” w pełni spełnia wymagania określone w art. 186, ust.1 i art. 187, ust. 1-4 Ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz.U z 2021 r., poz. 478) i wnioskuję o jej dopuszczenie do dalszych etapów postępowania o nadanie stopnia doktora przed Radą Dyscypliny Naukowej Inżynieria Środowiska, Górnictwo i Energetyka.

Jednocześnie wnioskuję o wyróżnienie rozprawy doktorskiej mgr. inż. Bartłomieja Rutczyka ze względu na jej wartość poznawczą i aplikacyjną oraz szerokie rozpowszechnienie wyników badań w postaci pięciu współautorskich prac opublikowanych w tak prestiżowych czasopismach jak *Energy* (3) oraz *Energy Conversion and Management* (2).

Janusz Zmyweykt