

dr hab. inż. Monika Lewandowska, prof. ZUT
Zakład Nadprzewodnictwa Stosowanego
Dział Budowy Aparatury i Infrastruktury Naukowej
Instytut Fizyki Jądrowej im. Henryka Niewodniczańskiego
Polskiej Akademii Nauk
oraz
Katedra Technologii Energetycznych
Wydział Inżynierii Mechanicznej i Mechatroniki
Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny w Szczecinie

Kraków, dn. 18.04.2024

Recenzja pracy doktorskiej mgr inż. Jakuba Kielara zatytułowanej:
„Wpływ procesu wrzenia cieczy kriogenicznych na proces ich
regazyfikacji”

Recenzja została opracowana na zlecenie Rektora Politechniki Wrocławskiej w oparciu o uchwałę RDN Inżynieria Środowiska, Górnictwo i Energetyka nr 888/37/RDND08/2021-2024 z dnia 13.12.2023 r., zgodnie z prośbą Zastępcy Przewodniczącego RDN Inżynieria Środowiska, Górnictwo i Energetyka dr hab. inż. Bartosza Zajączkowskiego, prof. uczelni – pismo z dnia 14.12.2023 r.

Recenzowana rozprawa powstała pod kierunkiem dr hab. inż. Ziemowita Malechy, prof. PWr, na Wydziale Mechaniczno-Energetycznym Politechniki Wrocławskiej.

Praca doktorska mgr inż. Jakuba Kielara poświęcona jest badaniom teoretycznym i eksperymentalnym dwóch typów wymienników ciepła zaprojektowanych do regazyfikacji skroplonego gazu ziemnego (LNG) do zastosowania w systemach napędowych w transporcie. Jako pierwszy badany był przeskalowany wymiennik płaszczowo rurowy dedykowany do zastosowań w transporcie morskim, natomiast jako drugi przebadano wymiennik węzownicowy do zastosowania w transporcie samochodowym.

Tematyka recenzowanej rozprawy doktorskiej jest bardzo aktualna oraz interesująca zarówno pod względem poznawczym, jak również ze względu na duże znaczenie praktyczne. Przemiana systemów energetycznych państw Unii Europejskiej, oparta na filarach wyznaczonych przez strategię Komisji Europejskiej - Europejski Zielony Ład, ma na celu osiągnięcie neutralności klimatycznej do 2050 roku, co oznacza uniezależnienie Europy od wykorzystania zasobów naturalnych jako warunku wzrostu gospodarczego. Gaz ziemny, ze względu na swoją dojrzałość technologiczną i niską emisję zanieczyszczeń w porównaniu do innych paliw kopalnych, traktowany jest jako paliwo pomostowe w procesie globalnej transformacji energetycznej i ma odegrać kluczową rolę w zastępowaniu węgla i innych emisyjnych surowców, w trakcie przechodzenia na czystsze źródła energii. Dlatego też niezmiernie ważny jest rozwój technologii umożliwiających efektywny transport i wykorzystanie gazu ziemnego. Gaz ziemny może być przechowywany i transportowany na długich dystansach w zbiornikach kriogenicznych w postaci skroplonej, ponieważ w tej fazie

ich objętość właściwa jest ok. 600 razy mniejsza niż w fazie gazowej. Transport LNG nabrał szczególnie dużego znaczenia w Europie w wyniku wojny w Ukrainie i wstrzymania dostaw gazu ziemnego transportowanego rurociągami z Rosji. Przed użyciem LNG konieczna jest jego regazyfikacja, który to proces wymaga znaczących nakładów energii, dlatego też niezmiernie ważne jest prowadzenie go w sposób jak najbardziej efektywny, a zarazem bezpieczny. Z przedstawionego w pracy przeglądu literatury wynika, że analizy numeryczne pracy regazyfikatorów napotykają na trudności ze względu na występowanie przemian fazowych (wrzenie po stronie kriogenu i krzepnięcie po stronie wodnej), co wymaga szczegółowego opisanie oddziaływań międzyfazowych. Dlatego też, modele CFD stosowane do analizy regazyfikatorów wymagają dużej mocy obliczeniowej, co utrudnia ich szerokie zastosowanie. Istnieje potrzeba opracowania prostszych i szybszych modeli matematycznych pracy regazyfikatorów, które byłyby zwalidowane na podstawie wyników badań eksperymentalnych. Tę lukę w wiedzy i narzędziach niezbędnych do analizy pracy i bezpiecznej eksploatacji regazyfikatorów uzupełnia praca doktorska Pana mgr inż. Jakuba Kielara.

Krótki opis pracy i jej struktura

Temat rozprawy jest jasno sformułowany i prawidłowo wskazuje jej zawartość. Bezpośrednim celem przeprowadzonych badań było: (i) opracowanie modeli matematycznych badanych wymienników ciepła dla systemów napędowych w transporcie morskim i drogowym oraz walidacja tych modeli przez porównanie z danymi eksperymentalnymi, (ii) określenie jakie czynniki mają decydujący wpływ na efektywność procesu regazyfikacji i bezpieczeństwo pracy regazyfikatora, (iii) określenie zdolności węzownicowego wymiennika samochodowego do powrotu do pracy po krótkotrwałej awarii oraz samoczynnego rozmrożenia.

Tekst rozprawy liczy 136 stron podzielonych na 4 rozdziały. Zawiera: wstęp, rozdział prezentujący cel i tezę pracy, rozdział opisujący przeprowadzone badania oraz podsumowanie i wnioski. Tekst rozprawy ilustrowany jest licznymi rysunkami (wykresy, schematy i fotografie) oraz tabelami, których spisy zamieszczono na końcu pracy. Na początku rozprawy umieszczono streszczenia w języku polskim i angielskim oraz listę symboli i skrótów. Opis bibliografii na końcu pracy obejmuje 80 pozycji literatury krajowej i zagranicznej. Rozprawę uzupełnia 4-stronicowy załącznik, w którym umieszczono dodatkowe wyniki modelowe dla regazyfikatora węzownicowego przedstawione w postaci graficznej.

W rozdziale pierwszym „**Wstęp**” omówiono, w zwięzły i przystępny sposób, w oparciu o 43 pozycje literatury, podstawowe zagadnienia dotyczące tematyki pracy, takie jak: rolę gazu ziemnego w transformacji energetycznej, technologie transportu gazu ziemnego, wykorzystanie LNG w transporcie, metody regazyfikacji LNG, problemy związane z procesem regazyfikacji. Omówiono również krótko aktualny stan wiedzy dotyczącej analiz pracy regazyfikatorów oraz narzędzi numerycznych stosowanych w tych analizach. W rozdziale drugim określono cel, tezę i zakres pracy. Teza pracy sformułowana została następująco: *„W procesie regazyfikacji cieczy kriogenicznych, szczególnie w systemach zasilających napędy pracujące w transporcie, wymiana ciepła po stronie czynnika wrzącego w reżimie wrzenia błonowego odgrywa decydującą rolę dla całkowitej wydajności i bezpieczeństwa pracy regazyfikatora.”*

Obszerny rozdział trzeci „**Analiza eksperymentalna procesu regazyfikacji**” zawiera opis przeprowadzonych badań. W części 3.1 przedstawiono ogólny opis założeń projektu nr POIR.01.01.01-00-0842/16-00 pt. „Optymalizacja systemów zasilających napędy pracujące w transporcie morskim, drogowym i kolejowym, które wykorzystują gaz naturalny w postaci skroplonej”, zrealizowanego w latach 2016–2022, stanowiącego punkt wyjścia dla badań przedstawionych w rozprawie. W ramach projektu zaprojektowano i wykonano dwa regazyfikatory, będące przedmiotem badań prowadzonych przez Doktoranta. Szczegóły geometrii oraz badania regazyfikatora do zastosowań w transporcie morskim (wymiennik morski) zostały opisane w części 3.2, zaś część 3.3 rozprawy poświęcona jest opisowi budowy oraz przeprowadzonych badań regazyfikatora do zastosowań w transporcie samochodowym (wymiennik samochodowy). Oba wymienniki zostały zaprojektowane do regazyfikacji LNG, jednak w prowadzonych badaniach eksperymentalnych jako kriogeniczny czynnik roboczy został użyty ciekły azot, charakteryzujący się szeregiem korzystnych właściwości, takich jak m.in. łatwa dostępność, stosunkowo niska cena, niepalność, etc. Badania każdego z wymienników obejmowały następujące etapy:

1. Projekt i wyposażenie stanowiska testowego (części 3.2.2 i 3.3.2)
2. Przeprowadzenie wstępnych testów mających na celu określenie odpowiednich zakresów przepływu wody i azotu w kampaniach pomiarowych oraz identyfikację potencjalnych problemów w modelowaniu.
3. Przeprowadzenie trzech kampanii eksperymentalnych:
 - a. Wymiennik pracujący jako przegrzewacz par (badanie przepływu jednofazowego) (rozdz. 3.2.3.1 i 3.3.3.1),
 - b. Wymiennik pracujący przy stałym przepływie azotu i zmiennym przepływie wody (rozdz. 3.2.3.2 i 3.3.3.2),
 - c. Wymiennik pracujący przy stałym przepływie wody i zmiennym przepływie azotu (rozdz. 3.2.3.3 i 3.3.3.3).
 - d. Symulacja awarii cyrkulacji wody grzewczej (wzmianki w rozdz. 3.2.3 i 3.3.3).
4. Opracowanie i walidacja modelu matematycznego wymiany ciepła w regazyfikatorze, dla różnych rozpatrywanych korelacji opisujących wymianę ciepła po stronie azotu.

W częściach dotyczących modelowania matematycznego (części 3.2.1 i 3.3.1) Autor szczegółowo opisał sposób modelowania wymiany ciepła po stronie wody, przewodzenia ciepła przez ściankę rury procesowej oraz wymiany ciepła po stronie azotu (dla przypadków wrzenia i przegrzewania pary). W rozważanych przypadkach najbardziej problematyczne było dobranie odpowiedniego modelu wymiany ciepła po stronie azotu, a w szczególności modelu wrzenia. Dlatego też, rozważono kilka modeli wnikania ciepła zaczerpniętych z literatury, a mianowicie dla przepływu jednofazowego były to modele Kutateladze, Gnielinski i Volker, zaś dla przepływu, któremu towarzyszy wrzenie błonowe zastosowano modele Giarratano-Smitha, Miropolskiego oraz Groenevelda (dla wymiennika morskiego), zaś dla wymiennika samochodowego zastosowano dodatkowo zmodyfikowany model Miropolskiego (uwzględniający temperaturę ścianki w obliczeniach charakterystyk termodynamicznych gazu) oraz model Shaha. W przypadku wężownicowego wymiennika samochodowego, przy stosowaniu modeli oryginalnie opracowanych dla rurek prostych wprowadzono odpowiedni współczynnik korekcyjny. Autor pojął również starania, aby w opracowanych modelach

uwzględniać dodatkowe efekty, które mogą wystąpić podczas pracy wymienników, a mianowicie: nierównomierne obciążenie rurek w wymienniku morskim, czy tworzenie się warstwy lodu w wymienniku samochodowym. Porównanie wyników obliczeń modelowych z danymi eksperymentalnymi (takimi jak: moc cieplna wymiennika, temperatura wylotowa azotu, różnica temperatur azotu) pozwoliło określić, które z rozważanych modeli wnikania ciepła pozwalają na uzyskanie najlepszej zgodności. Ponadto, dla węzowniczego wymiennika samochodowego potwierdzono efektywność zastosowania zaworu zwrotnego w celu zapewnienia możliwości przywrócenia cyrkulacji wody grzewczej i rozmrożenia wymiennika w przypadku wystąpienia całkowitej blokady przepływu w przestrzeni płaszczowej.

Rozdział czwarty rozprawy zawiera podsumowanie pracy oraz wnioski i uwagi końcowe. Wyniki badań przeprowadzonych przez Autora pozwalają na stwierdzenie, że teza pracy została potwierdzona.

Uwagi do pracy o charakterze merytorycznym

Dużą zaletą pracy jest kompleksowe podejście do zagadnienia obejmujące oszacowania analityczne, modelowanie numeryczne, jak i badania eksperymentalne. Metodyka przeprowadzonych badań jest generalnie poprawna zarówno w części teoretycznej, jak i eksperymentalnej. W recenzowanej rozprawie zauważyłam jednak nieco braków, lub kwestii dyskusyjnych wymagających szerszego wyjaśnienia, a mianowicie:

- Wskazane byłoby umieszczenie w pracy wykresów prezentujących zależność temperaturową parametrów termofizycznych azotu i wody istotnych dla prowadzonej analizy. Byłoby również interesujące porównanie parametrów termofizycznych azotu i gazu ziemnego oraz określenie jaki zakresowi przepływu gazu ziemnego odpowiada przebadany zakres przepływu azotu.
- Wskazane byłoby ilustrowanie na wykresach przewidywań poszczególnych korelacji zaczerpniętych z literatury oraz podawanie dla każdej korelacji zakresu liczb kryterialnych, dla których można ją stosować.
- Str. 34: W Tabeli 3.3 powinny być również podane niepewności pomiarowe dla poszczególnych czujników. Brakuje również informacji czy zastosowano system automatycznego zbierania danych, a jeśli tak, to jaka jest związana z nim niepewność pomiarowa?
- Str. 37: „*Wybrane modele zostały opracowane dla przepływu w którym występuje wrzenie błonowe*”. Czy założenie, że wrzenie ma charakter błonowy jest w pełni uzasadnione dla całej długości wymiennika, biorąc pod uwagę, że stopień suchości azotu na wlocie do regazyfikatora może być stosunkowo niski, dotyczy to zwłaszcza wymiennika samochodowego (rys. 3.55 i 3.58)?
- Str. 49 i 85: W pracy powinno być skomentowane jak należy rozumieć stopień suchości większy od 1 na rys. 3.17 i 3.51 ab.
- Str. 50-51, rys. 3.18 i 3.19: Wartości liczby Nusselta przewidywane przez modele ‘Gnielinski’ (równania 3.22) i ‘Volker’ (równania 3.23) w zakresie laminarnym i turbulentnym są identyczne, a w zakresie przejściowym są dość zbliżone. Jaka może być przyczyna znacznych rozbieżności widocznych na rys. 3.18 i 3.19 pomiędzy wynikami otrzymanymi za pomocą tych dwóch korelacji?

- Str. 52. „W dalszej części pracy wykorzystano model 'Gnielinski' do modelowania wymiany ciepła w gazowym azocie, o ile nie wskazano inaczej.” Dlaczego wybrano model 'Gnielinski', skoro najlepszą zgodność z danymi eksperymentalnymi uzyskano przy użyciu modelu 'Kutateladze' (rys. 3.18 i 3.19)?
- Str. 69, Rys. 3.39: Uwzględnienie maldystrybucji pozwoliło na uzyskanie bardzo dobrej zgodności obliczonej mocy cieplnej wymiennika z wartościami zmierzonymi. Byłoby również interesujące obliczenie średniej temperatury wylotowej azotu za pomocą modelu uwzględniającego maldystrybucję. Czy podjęto taką próbę, a jeśli tak, to czy wyniki obliczeń były zgodne z wartościami zmierzonymi?
- Czy rozważano możliwość uwzględnienia obecności zaworu zwrotnego w modelu matematycznym wymiennika samochodowego i symulacji numerycznej awarii cyrkulacji wody grzewczej?

W rozprawie nie zostało jasno określone jaki był osobisty udział Doktoranta w eksperymentalnej części badań, jednak z dodatkowych informacji uzyskanych u Promotora wynika, że wkład Doktoranta był wysoki, szczególnie w przypadku wymiennika samochodowego. Było to mianowicie:

1. w przypadku wymiennika morskiego:
 - a. dobór i montaż opomiarowania stanowiska pomiarowego,
 - b. wykonanie pomiarów i analiza wyników,
2. w przypadku wymiennika samochodowego:
 - a. zaprojektowanie i złożenie stanowiska pomiarowego,
 - b. wstępne obliczenia teoretyczne i dobór typu wymiennika,
 - c. projekt wymiennika na podstawie obliczonej geometrii, obliczenia mechaniczne, koncepcja zaworu zwrotnego w rdzeniu,
 - d. wykonanie pomiarów i analiza wyników.

Dorobek naukowy Doktoranta oraz jego dane bibliometryczne

Pan mgr inż. Jakub Kielar jest współautorem trzech artykułów opublikowanych w czasopiśmie indeksowanym w bazie Journal Citation Reports:

1. A. Brenk, J. Kielar, Z. Malecha, Z. Rogala: *The effect of geometrical modifications to a shell and tube heat exchanger on performance and freezing risk during LNG regasification*. International Journal of Heat Mass Transfer **161** (2020) 120247. (IF₂₀₂₀ = 5,584, 200 pkt. MNiSW).
2. T. Banaszekiewicz, M. Chorowski, W. Gizicki, A. Jedrusyna, J. Kielar, Z. Malecha, A. Piotrowska, J. Polinski, Z. Rogala, K. Sierpowski, J. Skrzypacz, M. Stanclik, K. Tomczuk, P. Dowzenko: *Liquefied Natural Gas in Mobile Applications—Opportunities and Challenges*. Energies **13** (2020) 5673. (IF₂₀₂₀ = 3,004, 140 pkt. MNiSW)
3. M. Morawska-Kochman, Z. Malecha, K. Zub, J. Kielar, K. Dudek, K. Nelke, T. Zatonski: *Physical conditions prevailing in the nasal and maxillary sinus cavities based on numerical simulation*. Medicina-Lithuania **59** (2023) 1094. (IF₂₀₂₂ = 2,600, 40 pkt. MNiSW)

oraz dwóch publikacji w materiałach pokonferencyjnych:

4. L. Orzechowski, D. Conte, D. Budzyń, A. Gorgolewski, A. Jurga, J. Kuźma, J. Kielar, M. Lipinska, A. Mintus, A. Tuzik, J. Popowski, T. Wasilewski: *Phobos Base: Concept of Operations and Architecture for a Permanent Human Presence on the Martian Moon Phobos*. Proceedings of the 68th International Astronautical Congress (IAC), Adelaide, Australia, 25-29.09.2017.
5. M. Chorowski, M. Stanlik, J. Kielar, A. Brenk, Z. Rogala, Z. Malecha: *Analysis of the freezing mechanism in LNG regasification heat exchangers used in mobile applications*. Proceedings of the Cryogenics 2021 - IIR International Conference, 5-7.10.2021, paper ID: 0053, DOI: 10.18462/iir.cryo.2021.0053

Są to wszystkie publikacje wieloautorskie, jednak należy podkreślić, że dwie pierwsze prace, dotyczące tematyki doktoratu, zostały opublikowane w czasopismach o bardzo wysokiej renomie. Ponadto, zgodnie z informacjami podanymi przez Promotora, Doktorant jest pierwszym autorem kolejnego artykułu, prezentującego wyniki otrzymane w ramach pracy doktorskiej, złożonego do redakcji czasopisma International Journal of Heat Mass Transfer. Artykuł ten jest aktualnie po drugiej recenzji.

Według bazy Web of Science liczba cytowań wynosi 23 (22 bez autocytowań), zaś indeks Hirscha 2.

Ocena pracy od strony edytorskiej

Rozprawa napisana jest w sposób poprawny i zrozumiały, tekst pracy przygotowany został dość starannie pod względem redakcyjnym. Mimo to jednak Autor nie ustrzegł się drobnych pomyłek, literówek lub uchybień stylistycznych, np.:

- Str. 1: Cała lista symboli powinna być uporządkowana w kolejności alfabetycznej,
- Str. 2: „*Współczynnik przewodzenia cieplna*” powinno być „*Współczynnik przewodzenia ciepła*”,
- Str. 9-17: Opisy na rysunkach 1.1-1.9 są w języku angielskim, podczas gdy w pracy napisanej w języku polskim również opis rysunków powinien być w tym samym języku,
- Str. 9: Podpis rysunku 1.1 „*Porównanie kosztu transportu LNG uwzględniając koszty regazyfikacji [17]*” wydaje się niekompletny - należało dodać, z czym jest porównywany koszt transportu LNG (na rysunku zaprezentowano również koszty różnego typu transportu CNG),
- Str. 20: „*w ramach badania zbadano...*” powinno być np. „*w ramach pracy zbadano...*”,
- Str. 82: Podpis rys. 3.49 brzmi: „*Porównanie mocy cieplnej obliczonej dla obiegu azotowego i wodnego przy stałym przepływie wody grzewczej i zmiennym przepływie zimnych par azotu*”, podczas gdy na rysunkach 3.49 zaprezentowano wyniki otrzymane przy stałym przepływie azotu i zmiennym przepływie wody,
- pomyłki w równaniach 3.35, 3.50a i 3.50b.

Pewne zastrzeżenia budzi również sposób graficznej prezentacji wyników w przypadkach gdy krzywe modelowe pokrywają się (np. rys. 3.21, 3.30-3.32). W takich wypadkach, w legendzie rysunku występują trzy krzywe, natomiast na wykresie widoczne są tylko dwie, co jest nieco mylące. Wskazane byłoby uwidocznienie obu pokrywających się

krzywych, np. można jedną z nich przedstawić za pomocą linii przerywanej i użyć kontrastujących kolorów.

Sposób prezentacji bibliografii jest nieco nieporządkny, ponieważ w wielu przypadkach podane dane bibliograficzne są niekompletne lub zawierają błędy, np.: w przypadku materiałów zaczerpniętych z Internetu każdorazowo wskazane byłoby podanie adresu odpowiedniej strony i daty dostępu, brak nazwy wydawnictwa w [6], [52], [80], brak numeru tomu i/lub numerów stron/numeru artykułu w [29], [30], [38]-[42], [63], [72], [73], [75]-[79], błędne dane bibliograficzne w [57], brak drugiego autora w [68], niejasny opis, m.in. brak informacji czy chodzi o prezentację na konferencji czy o artykuł opublikowany w materiałach pokonferencyjnych w [69], w przypadku materiałów pokonferencyjnych wskazane byłoby podawanie numeru DOI, itp.

Wnioski końcowe

Wymienione powyżej uwagi krytyczne nie wpływają istotnie na ogólną dość wysoką ocenę przedstawionej rozprawy doktorskiej. Praca dotyczy problemu poszukiwania rozwiązań technicznych umożliwiających zwiększenie bezpieczeństwa pracy i efektywności urządzeń służących do regazyfikacji, ma zatem duże znaczenie praktyczne. Jest interesująca i stanowi oryginalne osiągnięcie Autora w dziedzinie modelowania matematycznego oraz badań eksperymentalnych wymienników ciepła służących do regazyfikacji gazów skroplonych. Pan mgr inż. Jakub Kielar opracował i zaimplementował autorskie modele matematyczne oraz przeprowadził badania eksperymentalne służące do ich walidacji, co pozwoliło na osiągnięcie celów pracy zdefiniowanych na początku rozprawy. Wykazał się przy tym umiejętnością korzystania z literatury naukowej oraz znajomością zarówno teorii wymiany ciepła i metod numerycznych, jak również aspektów technicznych dotyczących analizowanych układów.

Podsumowując, stwierdzam, że praca mgr inż. Jakuba Kielara pod tytułem „**Wpływ procesu wrzenia cieczy kriogenicznych na proces ich regazyfikacji**” spełnia wymagania stawiane rozprawom doktorskim w świetle aktualnie obowiązujących przepisów (*art. 187 ust. 1 i 2 ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. – Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (t.j. Dz. U. z 2022 r., poz. 574 z późn. zm.)*). Rozprawa prezentuje w zadowalającym stopniu ogólną wiedzę teoretyczną kandydata w dziedzinie nauki: nauki inżynieryjno-techniczne, w dyscyplinie naukowej: inżynieria środowiska, górnictwo i energetyka oraz umiejętność prowadzenia przez Niego pracy naukowej. Przedmiotem rozprawy doktorskiej jest oryginalne rozwiązanie problemu naukowego polegające na opracowaniu i walidacji zaawansowanego modelu matematycznego dla wymienników ciepła, ze szczególnym uwzględnieniem wymiennika wężownicowego do zastosowań w transporcie samochodowym. Dlatego też, **wnioskuję przyjęcie rozprawy jako pracy doktorskiej i dopuszczenie Pana mgr inż. Jakuba Kielara do jej publicznej obrony.**

Małgorzata Lewandowska