

Zakład Ogrzewnictwa, Wentylacji, Klimatyzacji i Chłodnictwa  
Instytut Energii  
Wydział Inżynierii Mechanicznej i Okrętownictwa  
Politechnika Gdańska  
ul. Narutowicza 11/12, 80-233 Gdańsk

## **Recenzja rozprawy doktorskiej mgr. inż. Jakuba Kielara**

*„Wpływ procesu wrzenia cieczy kriogenicznych na proces ich regazyfikacji”*

### **1. Wprowadzenie**

Opiniowana rozprawa doktorska jest poświęcona problematyce regazyfikacji cieczy kriogenicznej. Taki proces jest realizowany między innymi podczas wykorzystania skroplonego gazu ziemnego (LNG) dla celów energetycznych. Jest to więc temat aktualny i ważny pod względem aplikacyjnym i teoretycznym. We wstępie pracy skupiono uwagę na roli gazu ziemnego w transformacji energetycznej krajów Unii Europejskiej i metodach regazyfikacji LNG, natomiast badania teoretyczne i eksperymentalne przeprowadzono z udziałem skroplonego azotu. Jego regazyfikację realizowano w dwóch modelowych wymiennikach ciepła zróżnicowanych konstrukcją, każdorazowo prowadząc proces w laboratoryjnych, kontrolowanych warunkach termiczno-przepływowych. Zgromadzony zbiór danych stanowił podstawę walidacji modeli matematycznych wykorzystanych w projekcie regazyfikatora. Dla procesów wrzenia i konwekcji jednofazowej w czynnikach grzewczym/ogrzewanym, dokonano oceny porównawczej wyników badań eksperymentalnych z wynikami modelowania matematycznego uzyskanymi za pomocą korelacji przywołanych z literatury.

Fundamentalne znaczenie w projektowaniu regazyfikatorów skroplonych gazów ma poprawne modelowanie matematyczne samego procesu wrzenia cieczy kriogenicznych, z rozpoznaniem warunków kryzysowego i pokryzysowego transportu ciepła. W przypadku stosowania wody lub roztworów glikolu jako źródła ciepła w procesie, złożoność zagadnień może być spotęgowana oblodzeniem zewnętrznej ściany kanału, w którym jest transportowane medium kriogeniczne. W najgorszym przypadku może to doprowadzić do całkowitego zablokowania przepływu nośnika ciepła i utraty funkcjonalności regazyfikatora. Prognozowanie granicznych wartości parametrów termiczno-przepływowych czynników grzewczego i ogrzewanego stanowi ważne zagadnienie, a rozwój/optimalizacja matematycznych modeli regazyfikatorów jest pożądana. Opiniowana rozprawa doktorska zawiera się w tym nurcie badawczym.

## **2. Zakres rozprawy doktorskiej**

Rozprawa doktorska została napisana w języku polskim i liczy 136 stron. Obejmuje ona cztery zasadnicze (numerowane) rozdziały, streszczenia w języku polskim i angielskim, spis treści, wykaz oznaczeń, bibliografię (80 pozycji), spisy rysunków i tabel oraz załącznik z wynikami modelowania regazyfikatora o konstrukcji węzownicowej (strony 133-136).

Pierwszy rozdział rozprawy doktorskiej jest wprowadzeniem, w którym Autor omawia m.in. rolę gazu ziemnego w dobie energetycznej transformacji Europy, z podkreśleniem narodowej strategii uznającej to paliwo za paliwo pomostowe w tzw. okresie przejściowym. W tym rozdziale pokrótce przedstawiono też podział regazyfikatorów z uwagi na zastosowane w nich źródło ciepła, wskazując zasadnicze cechy kilku typów urządzeń. W podrozdziale 1.3.5 wspomniano o potencjalnych zagrożeniach dla pracy regazyfikatorów, wśród których największe znaczenie ma zamarzanie czynnika grzewczego. W ostatnim akapicie uzasadniono podjęte prace, skoncentrowane na utworzeniu modelu matematycznego regazyfikatora o wybranej konstrukcji.

W drugim rozdziale przedstawiono cel i tezę pracy. Zgodnie z nią, transport ciepła po stronie czynnika wrzącego w reżimie wrzenia błonowego ma decydujący wpływ na wydajność i bezpieczeństwo pracy regazyfikatora.

Przedmiot badań eksperymentalnych i analiz teoretycznych przedstawiono w rozdziale trzecim. Do badań wytypowano wymiennik ciepła o konstrukcji płaszczowo-rurowej, określanej w pracy jako „wymiennik morski”, oraz wymiennik węzownicowy określanej mianem „wymiennika samochodowego”. Drugi rodzaj konstrukcji jest zwykle wykorzystywany w regazyfikatorach mobilnych dla systemów napędowych w transporcie. W dedykowanych podrozdziałach scharakteryzowano stanowiska badawcze, metodykę prowadzenia pomiarów, jak również korelacje opisujące transport ciepła, przywołane z literatury dla potrzeb modelowania matematycznego. Algorytm obliczeniowy regazyfikatora węzownicowego pokazano w formie schematu blokowego (rozdz. 3.3.4). Wyniki uzyskane podczas badań zaprezentowano w postaci licznych wykresów, poddając je dyskusji. Niektóre zapisy w rozdziale 3 odbiegają od formy stosowanej w naukowych pracach kwalifikacyjnych, ponieważ noszą znamiona typowego raportu projektowego.

Główną część rozprawy doktorskiej kończy rozdział czwarty. Zamieszczono w nim wnioski, akcentując udowodnienie tezy na drodze badań eksperymentalnych i matematycznego modelowania transportu ciepła przy pomocy zwalidowanych korelacji literaturowych.

## **3. Ocena rozprawy**

1) Stacje regazyfikacji skroplonych gazów (tlenu, azotu, LNG itp.) są od dawna eksploatowane w procesach przemysłowych lub energetycznych. Podjęta tematyka jest natomiast ważna szczególnie w kontekście mobilnych stacji regazyfikacji LNG, rozwijanych w podmiotach sektora energetyki. Parownik o konstrukcji płaszczowo-rurowej lub węzownicowej może tam przejąć funkcję parownika powietrznego (branzowo

zwanego atmosferycznym), jeśli tylko tzw. „odzysk chłodu” z procesu regazyfikacji może wspomóc pokrycie lokalnego zapotrzebowania na chłód w procesie/obiekcie obsługiwany przez mobilną stację. Poligeneracyjny tryb pracy jest niewątpliwie zaletą takiej stacji. Projektowanie dedykowanego regazyfikatora jest zadaniem odpowiedzialnym, wymagającym w pierwszej kolejności walidacji korelacji opisujących proces wrzenia cieczy kriogenicznej i jednofazową konwekcję w jej parze przegrzanej. Podejście Doktoranta do opracowania sformułowanego problemu badawczego jest zatem właściwe, a uzyskane wyniki istotne w kontekście rozwiązywanego problemu projektowego, pomimo kilku potknięć wyszczególnionych w uwagach krytycznych do pracy.

- 2) Przedłożona do recenzji rozprawa doktorska jest spójna tematycznie, ma wartość poznawczą i użyteczną.
- 3) Opracowano model matematyczny węzownicowego wymiennika ciepła, z implementacją korelacji walidowanych własnymi badaniami eksperymentalnymi Doktoranta.
- 4) Zbudowany wymiennik ciepła poddano badaniom eksperymentalnym, weryfikując założenia projektowe i skuteczność zastosowanego modelu matematycznego.
- 5) Zidentyfikowano warunki termiczno-przepływowe czynników grzewczego i ogrzewanego, przy których uaktywnia się proces krystalizacji czynnika grzewczego (w tym przypadku wody) podczas regazyfikacji czynnika ogrzewanego (w tym przypadku azotu). W przypadku węzownicowego wymiennika ciepła, zweryfikowano w tych warunkach funkcjonalność zaworu zwrotnego udrażniającego przepływ wody w rdzeniu wymiennika w celu usunięcia awarii oblodzeniowej.

#### **4. Uwagi krytyczne i dyskusyjne**

- 1) s. 95: W modelu matematycznym wymiennika ciepła o konstrukcji węzownicowej błędnie zdefiniowano opory cieplne dla przejmowania ciepła po stronie wody (r-nie (3.50a)) i azotu (r-nie (3.50b)). Powierzchnią wymiany ciepła powinna być w obydwu wzorach pobocznic walca o elementarnej długości.
- 2) s. 22: Jako rezultat prac wskazano zaprojektowanie i wykonanie dwóch regazyfikatorów testowych, przy czym jeden z nich (wymyennik płaszczowo-rurowy) jest przeskalowaną wersją wymiennika ciepła opracowanego bez udziału Doktoranta dla systemów napędowych pracujących w transporcie morskim (wskazuje na to skład autorów raportu przywołanego pod poz. [44] w spisie literatury). Brakuje informacji, jakimi kryteriami Doktorant kierował się w trakcie skalowania.
- 3) W rozdz. 3.2 brakuje informacji, z czego wynika liczba 37 rur w pęku wymiennika „morskiego”, (co, zgodnie z r-niem (3.20), wykorzystano wyznaczając długość pojedynczej rury w sekcji parownikowej), jak również informacji o przesłance do przyjęcia rur procesowych o długości 1 m (co, zgodnie z r-niem (3.27), wykorzystano przy wyznaczaniu długości rur w sekcji przegrzewacza pary azotu).
- 4) W rozdz. 3.2 brakuje informacji, w jaki sposób w modelu węzownicowego wymiennika ciepła uwzględniono krzyżowy przepływ mediów grzewczego i ogrzewanego.

- 5) s. 34: Brakuje informacji o dokładnościach pomiarowych przyrządów zastosowanych w stanowiskach eksperymentalnych, a w przypadku pomiaru temperatury – dokładności określonej dla torów pomiarowych z czujnikami rezystancyjnymi.
- 6) s. 41: Sformułowanie „*moc cieplna wymiennika wyznaczona ze strony wodnej zgadza się z mocą cieplną wyznaczoną ze strony azotowej*” wydaje się zbyt odważne bez analizy błędów bilansu cieplnego, nawet jeśli wymiennik pracuje tylko w roli przegrzewacza pary azotu. Na wykresach z Rys. 3.5 dostrzega się punkty mocy cieplnych określonych dla azotu przewyższające wartości mocy dla strony wodnej (może być to efektem dopływu niekontrolowanego strumienia ciepła z otoczenia). Podczas pracy wymiennika ciepła w reżimie wrzenia, błędy bilansowe są jeszcze większe, co można wnioskować na podstawie wysokości słupków błędów pokazanych na wykresach mocy cieplnej.
- 7) s. 49: Zgodnie z definicją, stopień suchości pary może przyjąć co najwyżej wartość 1 dla pary suchej nasyconej. Błędem merytorycznym jest prezentowanie na Rys. 3.17 stopnia suchości pary azotu o wartościach  $x > 1$ . Podobny błąd dostrzega się na Rys. 3.51.
- 8) Rys. 3.6 dostarcza informacji, od jakiej wartości strumienia masy azotu traci się zdolność zasilania wymiennika „morskiego” parą przegrzaną azotu (wartość ta wynosi ok. 200 l/min). To powinno być naturalną przesłanką do zawężenia analizy tylko do obszaru limitowanego tym wydatkiem na Rys. 3.18÷3.20. Stosowanie korelacji dedykowanych konwekcji jednofazowej w obszarze wrzenia poskutkowało niefizycznymi profilami temperatur powyżej granicznej wartości strumienia masy, co jest szczególnie widoczne na Rys. 3.18 i 3.19.
- 9) Dla wydatków azotu w zakresie 120-200 l/min, na Rys. 3.18 i 3.19 osiągnięto zgodność wyników badań eksperymentalnych tylko z wynikami modelowania matematycznego za pomocą modelu ‘Kutateladze’. Niezrozumiałe jest stwierdzenie (szczególnie w kontekście Rys. 3.19), że „*wszystkie trzy modele mogą zostać wykorzystane do uzyskania wyników o zadowalającej dokładności. W dalszej części pracy wykorzystano model ‘Gnielinski’ do modelowania wymiany ciepła w gazowym azocie*” (s. 52). Nasuwa się pytanie, jaką dokładność Doktorant ma na myśli?
- 10) s. 60: Niezrozumiałe są wyniki modelowania przedstawione na Rys. 3.29. Objętościowy strumień azotu zmienia się ponad 3-krotnie przy zadanym przepływie wody grzewczej, a obszar wymiennika pracujący jako parownik (widziany przez pryzmat długości rurki na tym rysunku) pozostaje stały dla zastosowanego modelu wrzenia.
- 11) Rys. 3.27 i Rys. 3.2: Komentarza wymaga brak zgodności jakościowej profili temperatur wyznaczonych na drodze eksperymentalnej i modelowania matematycznego.
- 12) s. 110: Wzrost różnicy temperatury między ścianą zewnętrzną i wewnętrzną rury wężownicy jest utożsamiany ze *zwiększającym się strumieniem ciepła przenoszonego przez ścianę rury wraz ze zwiększającym się stopniem suchości pary mieszaniny parowo-cieczowej* (podano, że maksimum tej różnicy koresponduje z całkowitym odparowaniem kropeł azotu). To stwierdzenie budzi wątpliwość, ponieważ zgodnie z Rys. 3.74 w tym

obszarze może pojawić się oblodzenie ściany wprowadzające dodatkowy opór przewodzenia ciepła, co również powiększy wspomnianą różnicę temperatury.

- 13) Wskazano na wzrost przenoszonego strumienia ciepła wraz ze wzrostem stopnia suchości pary. Wniosek sformułowano na podstawie profilu współczynnika przejmowania ciepła dla modelu Miropolskiego (Rys. 3.24, gdzie maksymalne wartości współczynnika przejmowania ciepła korespondują z parą suchą nasyconą). Budzi to jednak wątpliwość w kontekście innych korelacji opisujących wrzenie w przepływie (przywołane modele Groenevelda i Giarratano-Smitha albo współczesne modele prezentowane w literaturze), które przewidują spadek wartości współczynnika przejmowania ciepła w strukturze mgłowej. Osłabienie efektywności transportu ciepła w zakresie wysokich wartości stopnia suchości pary jeszcze bardziej pogłębia się po przejściu w mechanizm konwekcji jednofazowej w parze przegrzanej.

## 5. Pozostałe uwagi do pracy

- 1) Za niewłaściwe uznaję stosowanie tych samych oznaczeń do różnych wielkości fizycznych. Dotyczy to m.in. współczynnika wnikania ciepła i entalpii właściwej (oznaczenie „ $h$ ”), czy też stopnia suchości pary i grubości warstwy (oznaczenie „ $x$ ”).
- 2) Na str. 2 symbol  $G$  opisano jako „powierzchniowy całkowity strumień masy” (w zagadnieniach transportu ciepła ten parametr jest określany gęstością strumienia masy).
- 3) Różnice temperatur i przyrosty temperatury powinny być wyrażane w [K].
- 4) W pracy powinna być podana obliczeniowa wartość powierzchni transportu ciepła dla obydwu rozważanych konstrukcji regazyfikatora.
- 5) s. 25-26: Brakuje informacji o wartościach współczynników ( $f_i$ ) wykorzystanych w modelowaniu wartości liczby Nusselta. Brakuje też opisu współczynnika  $f_A$  z r-nia (3.7).
- 6) rozdziały 3.2.3 i 3.3.3: Wartościowe byłoby podsumowanie wyników pomiarów/obliczeń tabelarycznymi zestawieniami wartości min/max błędów względnych.
- 7) s. 37: Brakuje domknięcia nawiasów w r-niu (3.34).
- 8) s. 79 i s. 81: Występuje niespójność w przekazie informacji nt. zadawanej wartości przepływu wody grzewczej w „pierwszej kampanii pomiarowej”.
- 9) s. 79 i s. 90: Występuje niespójność w przekazie informacji nt. dolnej granicy przepływu azotu w ramach „trzeciej kampanii pomiarowej”.
- 10) Doktorant akcentuje problemy badawcze związane z niedostateczną izolacją przewodu z azotem lub króćca wlotowego wymiennika ciepła. Powtórzenie serii pomiarowych po eliminacji tego problemu dostarczyłoby lepszych jakościowo wyników.

Szata graficzna rozprawy nie budzi zastrzeżeń. W tekście dostrzega się drobne usterki językowe (głównie literowe), np. „czynniki wnikania ciepła” (zamiast współczynniki wnikania ciepła, s. 1). Dostrzega się również nieliczne sformułowania potoczne (np. „szybki model matematyczny”, s. 18) lub skróty myślowe (np. „płyn musi charakteryzować się

wysokimi współczynnikami wymiany ciepła”, s. 17, choć współczynnik przejmowania ciepła nie jest właściwością płynu). Powyższe potknięcia językowe nie obniżają merytorycznej wartości rozprawy.

## 6. Wniosek końcowy

Rozprawa doktorska Pana mgr. inż. Jakuba Kielara pt.: „*Wpływ procesu wrzenia cieczy kriogenicznych na proces ich regazyfikacji*” zawiera rozwiązanie sformułowanego problemu badawczo-projektowego, ważnego w dziedzinie nauk inżynieryjno-technicznych, w dyscyplinie inżynieria środowiska, górnictwo i energetyka. Zrealizowany zakres prac, wespół z dyskusją uzyskanych wyników, potwierdzają gotowość Autora do prowadzenia badań naukowych.

Do głównych osiągnięć Doktoranta zaliczam:

- podjęcie zadania badawczego ważnego w kontekście projektowania i eksploatacji regazyfikatorów cieczy kriogenicznych,
- holistyczne podejście do rozwiązania sformułowanego problemu – przygotowanie stanowisk eksperymentalnych do badań dwóch konstrukcji wymienników ciepła w warunkach regazyfikacji skroplonego azotu, wykonanie testów, przeprowadzenie analiz teoretycznych,
- opracowanie matematycznego modelu regazyfikatora węzownicowego, z implementacją korelacji zwalidowanych eksperymentalnie. Pomimo dostrzegalnych nieścisłości w algorytmach, wykazano funkcjonalność modelu jako narzędzia w projektowaniu tej konstrukcji regazyfikatora.

Stwierdzam, że rozprawa doktorska mgr. inż. Jakuba Kielara spełnia wymagania określone w art. 186 ust. 1 pkt 5 (ustawa z dnia 20 lipca 2018 r. - Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce) i wniosuję o dopuszczenie Doktoranta do kolejnych etapów przewodu doktorskiego.

