

Prof. dr hab. inż. Magdalena Piasecka
Politechnika Świętokrzyska w Kielcach
tel.: (41) 3424320
email: tmpmj@tu.kielce.pl

RECENZJA

rozprawy doktorskiej magistra inż. Arkadiusza Patryka Brenka
pt. *Wpływ zamarzania cieczy grzewczej na regazyfikację cieczy kriogenicznych*

Promotor: dr hab. inż. Ziemowit Malecha, prof. uczelni

1. PODSTAWA OPRACOWANIA OPINII

Podstawę opracowania niniejszej opinii stanowi pismo Zastępcy Przewodniczącego Rady Dyscypliny Naukowej Inżynieria Środowiska, Górnictwo i Energetyka Politechniki Wrocławskiej – Pana Profesora Bartosza Zajączkowskiego, wystosowane zgodnie z uchwałą Rady Dyscypliny Naukowej Inżynieria Środowiska, Górnictwo i Energetyka z dnia 14.12.2023 r. (nr W9/PW/962/2023). Do pisma dołączono egzemplarz pracy doktorskiej Pana magistra inż. Arkadiusza Patryka Brenka pt. *Wpływ zamarzania cieczy grzewczej na regazyfikację cieczy kriogenicznych*. Ponadto, otrzymałam zawiadomienie (nr 75/12.D08/2023) o wyznaczeniu mojej osoby na Recenzenta w postępowaniu w sprawie nadania stopnia doktora w dziedzinie nauk technicznych, dyscyplinie inżynieria środowiska, górnictwo i energetyka, odnoszące się do wspomnianej wyżej dysertacji doktorskiej. W piśmie zawarto wytyczne do sporządzenia opinii, zgodne z warunkami stawianymi rozprawom doktorskim, o których mowa w art. 187 ust. 1 i 2 ustawy z dnia 20.07.2018 r. *Prawo o szkolnictwie wyższym in nauce* (Dz. U. z 2022 r. poz. 1669 poz. 574 z późniejszymi zmianami).

2. CHARAKTERYSTYKA PRACY DOKTORSKIEJ

2.1. Ogólna charakterystyka rozprawy

Recenzowana rozprawa mgra inż. Arkadiusza Brenka liczy 140 stron formacie A4 druku jednostronnego. Na pracę składają się trzy części o tytułach *Analiza dotychczasowego stanu wiedzy* (12 stron), *Badania własne* (97) i *Podsumowanie* (3), poprzedzone stroną tytułową, streszczeniem w języku polskim i angielskim (po 2 strony), spisem treści (3 strony) oraz wykazem symboli i oznaczeń (2 strony). Na każdą z części składają się rozdziały (lub rozdział), uzupełnione o wykaz pozycji literaturowych (*Bibliografia*, 10 stron), a kończy *Spis rysunków* (6 stron) oraz *Spis tabel* (2 strony). W pracy zawarto 72 rysunków, 13 tabel i 89 zacytowane pozycje bibliograficzne o charakterze poznawczym i technicznym (w większości są to publikacje w czasopismach w języku angielskim, materiały konferencyjne, publikacje zwarte i odniesienia do stron internetowych).

Pierwszą część dysertacji stanowią rozdziały zatytułowane *Wprowadzenie* (1) oraz *Cel, teza i zakres pracy* (2), drugą część podzielono na rozdziały o tytułach: *Wstępny model wrzącej cieczy kriogenicznej i wymiany ciepła z czynnikiem grzewczym* (3), *Wielowariantowe badania na przykładzie przepływu przez kanał* (4), *Badania nad wpływem geometrii przegród na proces narastania lodu i wymiany ciepła podczas opływu pęczka rur* (5), *Rozszerzony model wymiennika do odparowania cieczy kriogenicznej* (6) oraz *Eksperyment porównawczy dla rozszerzonego modelu wymiennika* (7). Ostatnią część rozprawy stanowi rozdział pt. *Wnioski i kierunki dalszych badań* (8).

2.2. Tematyka, cele, tezy i główne zadania realizowane w pracy doktorskiej

Przedmiotem zainteresowania autora rozprawy doktorskiej było modelowanie zjawisk cieplno-przepływowych w wymienniku ciepła, ze szczególnym skoncentrowaniem na procesach wymiany ciepła między cieczą kriogeniczną a czynnikiem grzewczym. Głównym celem pracy było stworzenie modelu numerycznego, mającego zastosowanie w procesie projektowania wymiennika ciepła, dostosowanego do wyżej scharakteryzowanych warunków pracy. Opracowany model umożliwił przeprowadzanie obliczeń koncepcyjnych, analizę pracy urządzenia w określonych warunkach oraz podejmowanie działań w przypadku awarii związanych z tworzeniem się warstwy lodu w kanale grzewczym (redukowanie przekroju przepływu, a nawet blokowanie przepływu przez formujący się w kanale wodnym lód).

Jako główny problem badawczy rozprawy wskazano opracowanie modelu numerycznego z zakresu obliczeniowej mechaniki płynów, dedykowanego do przeprowadzania obliczeń wspierających projektowanie wybranych konstrukcji wymienników ciepła (płytowy i płaszczowo-rurowy), w których występuje przepływ cieczy kriogenicznej i wody jako czynnika grzewczego.

Sformułowane zostały dwie tezy (hipotezy) dysertacji:

1. *Możliwa jest integracja złożonych modeli zjawisk fizycznych występujących podczas procesu regazyfikacji cieczy kriogenicznych za pomocą modelowania numerycznego.*
2. *Proces regazyfikacji może przebiegać stabilnie mimo częściowego zamrożenia cieczy grzewczej.*

Doktorant potwierdza postawione tezy na podstawie wyników przeprowadzonych obliczeń numerycznych i badań eksperymentalnych, które zostały poddane analizie, głównie o charakterze porównawczym i weryfikacyjnym. Procedury obliczeniowe oparto na zaproponowanych modelach numerycznych, a otrzymane wyniki posłużyły do przeprowadzenia szczegółowych analiz.

Aby zweryfikować postawione tezy, wskazano realizację sześciu zadań. Zadanie pierwsze miało na celu uzasadnienie i wybór metod CFD do efektywnego rozwiązania problemu sprzężonej wymiany ciepła. Kolejnym zaplanowanym etapem było utworzenie modelu wymiennika ciepła lub jego części, stanowiące drugie zadanie badawcze. Trzecie zadanie objęło określenie wpływu właściwości termofizycznych cieczy grzewczej na funkcjonowanie zamodelowanego wymiennika ciepła. Czwarte zadanie koncentrowało się na analizie wpływu zastosowanej geometrii wymiennika na badane procesy. Kolejne zadanie obejmowało rozwinięcie modelu wrzenia cieczy kriogenicznej poprzez uwzględnienie przegrzewu par czynnika. Jako ostatni krok realizacji zaplanowanych prac wskazano przeprowadzenie analizy, porównującej wyniki obliczeń numerycznych z rezultatami uzyskanymi w wyniku badań eksperymentalnych.

2.3. Omówienie zawartości części i rozdziałów pracy doktorskiej

Na rozprawę doktorską mgr inż. Arkadiusza Brenka składają się trzy części oraz osiem rozdziałów związanych z tematyką wyrażoną tytułem pracy, tj. wpływem zamrażania grzewczej na regazyfikację cieczy kriogenicznych.

Część I - *Analiza dotychczasowego stanu wiedzy*

Rozdział pierwszy, o tytule *Wprowadzenie*, posiada charakter ogólnie – przeglądowy. W rozdziale przybliżono tematykę związaną z transformacją energetyczną i jej przyczynami. Omówiono *Europejski Ład*, kluczowe obszary inicjatywy oraz szeroko znane strategie Unii Europejskiej, takie jak *Strategia na Rzecz Zrównoważonego Rozwoju 2030. Europejski Ład*, jako jedna z najważniejszych inicjatyw politycznych regionu, ma na celu transformację gospodarczą i społeczną, osiągnięcie neutralności klimatycznej do 2050 roku oraz budowanie bardziej zrównoważonej, innowacyjnej i sprawiedliwej gospodarki. Podkreślono ważność pakietu ustawodawczego *Fit for 55*, pod kątem realizacji celu zmniejszenia emisji gazów cieplarnianych o co najmniej 55% do 2030 roku, w porównaniu do poziomu z 1990 roku. W podrozdziale (1.2) rozprawy, Doktorant scharakteryzował skroplony gaz ziemny (LNG), przybliżając zarówno jego właściwości fizyczne, jak i możliwe zastosowania, zwłaszcza w środkach transportu. W tym kontekście omówiono procesy skraplania LNG, a także wymagania, które powinny być uwzględniane podczas logistycznego planowania transportu tego gazu. Kolejny podrozdział (1.3) poświęcono regazyfikacji LNG. Omówiono różne rozwiązania technologiczne regazyfikacji LNG, wskazano na problemy związane z procesem regazyfikacji oraz kontekst badawczy wynikający z unikalnych właściwości LNG i zmian fazowych czynnika. Szczególny nacisk położono na fakt, że ze względu na niską temperaturę wrzenia, w wielu zastosowaniach LNG może wytwarzać się faza stała w roboczym czynniku grzewczym. To zagadnienie stwarza wyzwania i wymaga szczegółowych badań, które przedstawiono w kontekście tematyki dysertacji.

W rozdziale drugim pracy doktorskiej (pt. *Cel, teza i zakres pracy*), zostały przedstawione: cel, dwie postawione tezy (hipotezy) oraz zakres badawczy dysertacji. Zagadnienia te szczegółowo omówiłam w punkcie 2.2 niniejszej recenzji.

Część II – *Badania własne*

W tej najobszerniejszej części rozprawy doktorskiej, omówiono istotę i założenia przyjęte w modelach numerycznych autora. Na część II składa się pięć rozdziałów.

Rozdział trzeci nosi tytuł *Wstępny model wrzącej cieczy kriogenicznej i wymiany ciepła z czynnikiem grzewczym*. W pierwszym podrozdziale (3.1) przedstawiono opis i założenia modelu, a także dokonano charakteryzacji trzech podstawowych rodzajów obszarów (domen), zadanych w programie numerycznym. Kolejny podrozdział (3.2) skupia się na środowisku obliczeniowym i używanym oprogramowaniu komputerowym do symulacji numerycznych (solver *chtMultiRegionFoam* pakietu numerycznego OpenFOAM). Zawarto w nim także ogólną charakterystykę modelu matematycznego, prezentując podstawowe równania rządzące oraz omawiając cechy modelu entalpia-porowatość. W podrozdziale (3.3) opisano zbudowany model numeryczny, charakteryzując trzy wydzielone domeny obliczeniowe w kontekście dwóch geometrii modelowego wymiennika ciepła: płytowego i płaszczowo-rurowego. Przedstawiono właściwości termofizyczne zdefiniowanych obszarów obliczeniowych oraz istotne założenia w modelu. Warto zauważyć, że warstwa cieczy kriogenicznej została zamodelowana jako ciało stałe i nazwano ją *reprezentacją zastępczą* tego czynnika. Ponadto omówiono istotne kwestie dla obu modelowych konstrukcji wymienników ciepła, tj. płytowego i płaszczowo-rurowego.

W rozdziale czwartym pt. *Wielowariantowe badania na przykładzie przepływu przez kanał*, Doktorant omówił własne badania dotyczące przepływu przez wąski kanał o przekroju prostokątnym. W pierwszym podrozdziale (4.1) opisana została geometria układu wymieniającego ciepło, w którym czynnik przepływający wzdłuż kanału grzewczego (woda) jest oddzielony od wrzącej cieczy kriogenicznej LNG dwiema przegrodami. W drugim podrozdziale (4.2) przedstawiono analizę wpływu zagęszczenia siatki numerycznej w symulacji CFD, które przyjęto jako podstawowe kryterium weryfikacji poprawności wyników otrzymanych z obliczeń numerycznych. Omówiono przyjętą metodę optymalizacji siatki, a także przeanalizowano wpływ zagęszczenia siatki na kluczowe wielkości obliczeniowe oraz czas obliczeń. Wyniki zostały zaprezentowane graficznie, a ich analizę i interpretację przedstawiono w podsumowaniu. Podrozdział (4.3) skupia się na badaniach wpływu warunków przepływu na proces formowania się warstwy lodu podczas przepływu wody wzdłuż kanału grzewczego. Analizy uwzględniały różne wartości liczby Reynoldsa charakteryzującej przepływ, temperaturę wody na wlocie do kanału oraz warunki wrzenia. Kolejny podrozdział (4.4) dotyczy zagadnień związanych z walidacją modelu. W tym celu użyto uproszczonego modelu analitycznego 1D. Zestawienie wyników uzyskanych z modelu 1D i symulacji numerycznych pozwoliło na analizę i wyciągnięcie wniosków dotyczących tej części badań, umieszczone w ostatnim podrozdziale (4.5).

W rozdziale piątym, zatytułowanym *Badania nad wpływem geometrii przegród na proces narastania lodu i wymiany ciepła podczas opływu pęczka rur*, przedstawiono badania dotyczące drugiego wariantu konstrukcyjnego modelowego wymiennika ciepła - wymiennika płaszczowo-rurowego. W tym wypadku przyjęto przepływ charakterystyczny dla tego typu wymiennika, czyli poprzeczny opływ pęku rur o przekroju kołowym. W pierwszym podrozdziale (5.1) opisano założony przypadek geometryczny, prezentując sposób wydzielenia obszarów: czynnika grzewczego, cieczy kriogenicznej oraz ścian pęku rurek w układzie. Podobnie jak dla modelu płytowego, zdefiniowano trzy domeny obliczeniowe, a ciecz kriogeniczna LNG została potraktowana jako ciało stałe. Wprowadzono zależność dotyczącą współczynnika przewodzenia ciepła dla obszaru ciekłego gazu. W podrozdziale (5.2) zilustrowano wyniki badań wstępnych, koncentrując się na grubości tworzącej się warstwy lodu dla wybranych chwil czasowych i różnych geometrii układu rozmieszczenia rurek oraz zależności grubości warstw lodu w funkcji czasu dla różnych geometrii. Wprowadzono parametr oceniający udział lodu w określonym rzędzie rurek, przy czym wyniki dotyczyły zarówno tego parametru, jak i mocy cieplnych, przy czym przedstawiono je w funkcji liczby Reynoldsa. Kolejny podrozdział (5.3) zawiera wyniki analiz numerycznych przeprowadzonych dla uzmiennianej geometrii rurek. Dla zmodyfikowanych kształtów analizowano parametr przewodnictwa cieplnego warstwy LNG w zależności od względnej grubości ściany. Zaprezentowano rozkłady temperatury i prędkości w modelowym fragmencie układu wymiennika z pękiem rur, wyznaczając moc cieplną i udział lodu dla różnych konfiguracji geometrycznych. Analizowano spadki ciśnienia w opływie rur oraz stosunek mocy cieplnej do wymaganej mocy pompy dla testowanych układów. Ostatni podrozdział (5.4) zawiera podsumowanie wyników otrzymanych na podstawie przeprowadzonych obliczeń oraz analiz.

Tytuł rozdziału szóstego *Rozszerzony model wymiennika do odparowania cieczy kriogenicznej*, adekwatnie odzwierciedla jego treść. W poprzednich częściach pracy zaproponowano uproszczony model wrzenia, nazwanym *wstępnym*, który dostosowano do dwóch geometrii modelowego wymiennika ciepła. W modelu tym skoncentrowano się głównie na analizie tworzenia się lodu w grzewczym kanale wodnym, szczególnie w kontekście procesu przepływu ciepła. W podrozdziale (6.1) przedstawiono założenia rozszerzonego modelu

obliczeniowego, wprowadzając dodatkowe podziały obszarów, przyjętych w obliczeniach numerycznych. Kluczowym rozszerzeniem modelu było uwzględnienie obszarów kriogenicznej cieczy w stanie wrzenia oraz kriogenicznego gazu. Ten krok pozwolił na bardziej kompleksową analizę procesu odparowania cieczy kriogenicznej w wymienniku ciepła. Przedstawiono najważniejsze założenia modelu oraz ogólnie scharakteryzowano sposób prowadzenia obliczeń. W kolejnym podrozdziale (6.2) szczegółowo omówiono procedurę przeprowadzania symulacji numerycznych.

W rozdziale siódmym, o tytule *Eksperyment porównawczy dla rozszerzonego modelu wymiennika*, podstawowym celem było porównanie uzyskanych wyników z symulacji numerycznych z wynikami z eksperymentu. Wyniki analizy porównawczej wykorzystano do jakościowej oceny przydatności modelu oraz ewentualnych jego modyfikacji i rozszerzenia. W pierwszym podrozdziale (7.1) opisano stanowisko badawcze wykorzystane do badania regazyfikacji w wymienniku płaszczowo-rurowym. Przedstawiono kluczowe dane dotyczące aparatury pomiarowej wykorzystywanej na stanowisku eksperymentalnym. W podrozdziale (7.2) zaprezentowano metodę badawczą oraz szczegółowy opis przebiegu eksperymentu. W kolejnym podrozdziale (7.3) omówiono procedurę obliczeń numerycznych oraz wskazano wybrane z literatury zależności wykorzystywane do obliczeń współczynnika przejmowania ciepła, związane z przepływem kriogenu. Wyniki uzyskane z symulacji numerycznych zostały pokazane jako rozkłady temperatury i prędkości przy różnych wartościach natężenia objętościowego przepływu i stopnia suchości azotu. Zilustrowano występowanie granicy międzyfazowej przy różnym stopniu suchości i założonym przepływie w kanale. W podrozdziale (7.4) porównano wyniki otrzymane z eksperymentów z wynikami z symulacji numerycznych, analizując moce cieplne. W kolejnym podrozdziale (7.5), Doktorant skoncentrował się na analizach przypadku zaburzenia pracy wymiennika ciepła w wyniku formowania się warstwy lodu w kanale, przeprowadzone na podstawie eksperymentów z symulacją wystąpienia takiej sytuacji (wstrzymanie przepływu wody podczas eksperymentu w pierwszej fazie powodowało zamarznięcie wody, a następnie wznowiano przepływ). Analizowano warunki przywrócenia normalnych warunków pracy wymiennika z oszacowaniem interwału czasowego, dla której byłoby to możliwe.

Część III - Podsumowanie

W rozdziale ósmym, zatytułowanym *Wnioski i kierunki dalszych badań*, zawarte są podsumowania oraz uwagi wynikające z prezentowanych danych i przeprowadzonych analiz. Ponadto, wskazano potencjalne obszary dalszych badań. Podkreślono, że przedstawione w rozprawie wyniki są rezultatem prac Doktoranta.

3. ANALIZA I OCENA ROZPRAWY

3.1. Ważność tematu rozprawy

Motywacją do wyboru tematu rozprawy doktorskiej była istotna kwestia poszukiwania rozwiązań na rzecz zaspokojenia rosnącego zapotrzebowania energetycznego. Skroplony gaz ziemny (LNG) odgrywa kluczową rolę w dzisiejszej gospodarce z różnych powodów. W kontekście redukcji emisji substancji szkodliwych, takich jak dwutlenek siarki (SO₂), tlenki azotu (NO_x) i cząstki stałe, LNG uznaje się za bardziej przyjazny dla środowiska niż tradycyjne paliwa, co przyczynia się do poprawy jakości powietrza i wpisuje się w światowe priorytety ekologiczne, obwarowane regulacjami prawnymi w Unii Europejskiej.

Niezmiernie ważnym aspektem jest dostępność i bezpieczeństwo energetyczne. Obfite zasoby gazu ziemnego są aktualnie dostępne nawet w obszarach pozbawionych tradycyjnej infrastruktury rurociągowej, dzięki możliwości transportu i dystrybucji LNG. Ten fakt wspomaga dywersyfikację źródeł energii, co jednocześnie zwiększa bezpieczeństwo energetyczne. Skroplony gaz ziemny, używany jako paliwo do transportu, odgrywa kluczową rolę w globalnym handlu energią, umożliwiając efektywny transport gazu na duże odległości, co ma istotne znaczenie dla światowego rynku energetycznego.

Zastosowanie LNG obejmuje szerokie spektrum sektorów przemysłowych, takich jak produkcja energii elektrycznej, ogrzewanie, chłodzenie oraz jako paliwo dla pojazdów. W kontekście globalnych wysiłków zmierzających do ograniczenia emisji gazów cieplarnianych i poszukiwań alternatywnych źródeł energii, LNG staje się ważną alternatywą dla tradycyjnych paliw, zwłaszcza w transporcie i produkcji energii.

Podsumowując, skroplony gaz ziemny odgrywa kluczową rolę w globalnym krajobrazie energetycznym ze względu na swoją przyjazność dla środowiska, dostępność, zdolność do efektywnego transportu na duże odległości i różnorodne zastosowania, co sprawia, że pełni on istotną rolę.

Jednocześnie należy podkreślić, że korzystanie z LNG wiąże się z szeregiem procesów, mających kluczowe znaczenie dla efektywności, niezawodności i bezpieczeństwa eksploatacji instalacji LNG. Procesy te są ściśle związane z koniecznością skraplania gazu ziemnego oraz efektywnego jego przechowywania, co niesie ze sobą problem rekondensacji par powstałych na skutek dopływów ciepła. Przed użyciem LNG musi być przekształcone z postaci skroplonej w gazową, przy znacznie niższych temperaturach niż otoczenie (musi zostać regazyfikowane). Efektywność tych procesów ma kluczowe znaczenie dla rentowności i niezawodności całego łańcucha procesów związanych z instalacjami LNG, niezależnie od ich skali. Zapewnienie skuteczności tych etapów jest zasadnicze zarówno z perspektywy ekonomicznej, jak i dla utrzymania niezawodności procesów, co jest szczególnie ważne w przypadku różnorodnych, skomplikowanych i wysokospecjalistycznych instalacji związanych z gazem skroplonym.

Temat dysertacji, obejmujący opracowanie modelu umożliwiającego analizę pracy wymienników ciepła z kriogenami oraz podejmowanie działań przeciwdziałających awariom związanych z zamrażaniem czynnika grzewczego, jest istotny i wartościowy. Utworzenie fazy stałej może znacznie zwiększyć hydrauliczne opory przepływu i prowadzi do pogorszenia efektywności procesów przepływu ciepła, a nawet może skutkować zniszczeniem wymiennika ciepła, kluczowego elementu instalacji. Rozpoznanie, zrozumienie i zdolność kontroli procesów wymiany ciepła towarzyszących regazyfikacji LNG są kluczowe dla optymalizacji działania wymienników ciepła. Założenia podejmowane już na etapie projektowania wymienników ciepła, mające na celu przeciwdziałanie awariom związanym z zamrażaniem czynnika grzewczego, posiadają potencjał podniesienia standardów bezpieczeństwa i efektywności w infrastrukturze energetycznej. Takie działania doskonale wpisują się w dążenie do zrównoważonego i bezpiecznego rozwoju infrastruktury energetycznej, zwłaszcza w kontekście wzrastającego znaczenia technologii kriogenicznych w sektorze energetycznym.

Tematyka niniejszej rozprawy doktorskiej doskonale wpisuje się w aktualne priorytetowe strategie Unii Europejskiej, takie jak *Strategia na Rzecz Zrównoważonego Rozwoju 2030*. Sprzyja odejściu od tradycyjnych paliw kopalnych na rzecz bardziej przyjaznych dla środowiska rozwiązań energetycznych. W kontekście powyższego, można stwierdzić, że poruszane w tej rozprawie tematy są aktualne i istotne.

3.2. Ocena rozprawy

W rozprawie doktorskiej mgr inż. Arkadiusza Brenka podjęto interesujący problem badawczy, którego głównym celem jest modelowanie zjawisk cieplno-przepływowych w wymienniku ciepła. Wymiennik ten pracuje z czynnikiem kriogenicznym (ciekłym azotem) oraz czynnikiem grzewczym, reprezentowanym przez wodę. Główny nacisk został położony na procesy wymiany ciepła między cieczą kriogeniczną a czynnikiem grzewczym. W pracy istotnym zagadnieniem było zakłócenie przepływu cieczy grzewczej przez wymiennik, wywołane tworzeniem się warstwy ciała stałego (lodu) po stronie czynnika grzewczego (wody). Ten temat pozostaje nadal niedostatecznie zbadany i opisany w literaturze przedmiotu. W uwagach, poprzedzających ten fragment recenzji, zaznaczono, że temat pracy jest istotny, szczególnie w kontekście rosnącego znaczenia technologii kriogenicznych w sektorze energetycznym. Warto podkreślić, że jest to szczególnie ważne w systemach transportowych LNG, ze względu na dynamicznie rozwijający się potencjał zastosowań oraz rosnące potrzeby przemysłu energetycznego.

W pierwszych rozdziałach II części rozprawy doktorskiej przedstawiony został uproszczony sposób modelowania wrzenia cieczy kriogenicznej, w którym potraktowano ją jako ciało stałe o zdefiniowanej przez Doktoranta przewodności cieplnej. Modelowanie przeprowadzono z wykorzystaniem solvera *chtMultiRegionFoam*, wchodzącego w skład otwarto-źródłowego oprogramowania OpenFOAM (uznawanego wśród naukowców). Solver jest dedykowany do rozwiązywania problemów związanych z przepływem cieczy i ciepła, w szczególności zaprojektowany jest do obsługi problemów przewodzenia ciepła (*conjugate heat transfer* - CHT) w systemach, w których występuje interakcja między różnymi obszarami (regionami) o różnych właściwościach termicznych. Przeprowadzono analizy walidacyjne siatki numerycznej, co dobrze świadczy o podejściu do obliczeń numerycznych i umiejętności obliczeniowych Doktoranta. Choć można dyskutować o tym, które elementy i metody walidacji są kluczowe do dokładnego określenia zbieżności siatki, to jednakże z zadowoleniem stwierdzam, że walidacja rozmiaru siatki została przeprowadzona w sposób rzetelny. Model numeryczny testowano dla dwóch typów wymienników ciepła: płytowego i płaszczowo-rurowego – typowych konstrukcji wymienników ciepła stosowanych szeroko w technice cieplnej. Uważam to za ciekawe podejście do tematu. W pierwszej części pracy wyniki poddano walidacji na przykładzie płytowego wymiennika ciepła, w którym modelowy wąski kanał posiadał przekrój prostokątny. Uzyskane wartości grubości warstwy lodu po stronie czynnika grzewczego zostały porównane z wynikami uzyskanymi przy użyciu uproszczonego podejścia 1D - rozwiązania analitycznego, co również można zaliczyć na poczet walidacji obliczeń numerycznych. Kolejne etapy badawcze obejmowały analizę wpływu różnych parametrów, takich jak warunki wrzenia cieczy kriogenicznej, temperatura i prędkość czynnika, na grubość tworzącej się warstwy lodu w kanale wodnym (czynnika grzewczego). Jak już wspomniano, interesującym aspektem badania było przeprowadzenie analizy na innej geometrii wymiennika – płaszczowo-rurowego. W tej części pracy skoncentrowano się na analizie przepływu czynnika wokół pęczka rur, traktowanego jako fragment konstrukcji wymiennika ciepła. Przeprowadzono symulacje numeryczne, badając wpływ kształtu rurek na formowanie się warstwy lodu i ogólną wymianę ciepła. Uzyskane wyniki umożliwiły porównanie, między innymi, pod względem mocy cieplnej i mocy pompy. Całościowo ten temat uważam za interesujący, z uwagi na analizę różnych konstrukcji typowych wymienników ciepła. W dziedzinie techniki cieplnej spotyka się różne konstrukcje wymienników cieplnych, dlatego istotne jest określenie, które konstrukcje i jakie parametry geometryczne wymiennika ciepła pozwalają osiągnąć jego potencjalnie najwyższą efektywność pod kątem wymiany

ciepła, przy spełnieniu określonych warunków pracy (w tym pracę z przepływem czynnika kriogenicznego). Ostatnim etapem dysertacji było modelowanie numeryczne pełnowymiarowego wymiennika płaszczowo-rurowego, przy czym wyniki zostały zestawione z rezultatami eksperymentu na analogicznym wymienniku. To najciekawsza część pracy. W zaproponowanym modelu obliczeniowym uwzględniono także przegrzewanie pary po odparowaniu cieczy kriogenicznej. Analiza obejmowała również przypadki wystąpienia awarii pracy urządzenia, podczas których przepływ wody został czasowo zablokowany przez tworzącą się warstwę lodu.

Zaproponowany model obliczeniowy może być użyteczny w doskonaleniu efektywności i niezawodności wymienników ciepła pracujących z substancjami kriogenicznymi. Podkreślenie faktu, że badania i symulacje zostały zweryfikowane na stanowisku eksperymentalnym, dodaje wiarygodności opracowanemu modelowi. To sprawia, że wnioski z takich badań są bardziej praktyczne i mogą mieć bezpośrednie zastosowanie w dziedzinie bezpieczeństwa i skuteczności systemów energetycznych, zwłaszcza tam, gdzie wymagane są zaawansowane technologie związane z substancjami kriogenicznymi.

Analizując treść pracy oraz opublikowane artykuły we współautorstwie Doktoranta, można stwierdzić, że mgr inż. Arkadiusz Brenk aktywnie uczestniczył w realizacji wszystkich określonych w dysertacji zadań, obejmujących badania naukowe oraz analizę uzyskanych wyników. W ramach pracy wskazano wytyczne do kontynuowania badań w przyszłych zadaniach naukowych, jak również konkretniejsze plany prac.

4. UWAGI, SUGESTIE I SPOSTRZEŻENIA DOTYCZĄCE ROZPRAWY

W dysertacji występują pewne nieścisłości językowe i błędy edycyjne, usterki stylistyczne i nieprawidłowości w stosowaniu znaków interpunkcyjnych. Spośród nich jedynie te, które uważałam za istotne lub przykładowe, przytoczyłam w niniejszej opinii.

Uwagi, sugestie i spostrzeżenia dot. znaczących nieścisłości, stosowanej metodyki badań czy analiz przedstawiono poniżej.

- 1) Niewłaściwie wskazane numery stron w spisie treści (od wskazania strony z *Bibliografią*).
- 2) Wykaz symboli i oznaczeń: brak jednostek dla wielkości mianowanych (sekcja *Symbole* oraz sekcja *Skróty*); HTC wystąpił w sekcji *Skróty*, a w sekcji *Symbole* umieszczono α – współczynnik wnikania ciepła. Jaka jest różnica między tymi wielkościami, w odniesieniu do dysertacji? Przyjęty układ jednostek nie jest dla mnie ani zrozumiały, ani intuicyjny, nie posiada charakteru typowego dla prac o tematyce inżynierskiej.
- 3) Punkt 1.2 występują powtórzenia objaśnienia skrótu LNG.
- 4) Rysunek 1.1: niejasny opis osi, użyto jednostek spoza układu SI. Jeśli wskazane zależności dotyczą kosztów, należałoby odnieść się do roku. Może warto opracować rysunek na bazie podanego w literaturze, dostosować opisy do jednostek SI i podać informację typu „opracowanie własne na podstawie [15]” ?
- 5) Nie podano wersji pakietu numerycznego OpenFOAM, a jedynie nazwę solvera (*chtMultiRegionFoam*), który w obliczeniach pozwala na użycie różnych modeli turbulencji oraz modeli opisujących przewodzenie ciepła.
- 6) Kolejne uwagi dotyczące oprogramowania i obliczeń numerycznych są następujące:
 - a. Model *wstępny*: solver *chtMultiRegionFoam* w OpenFOAM w domyślnej konfiguracji jest przeznaczony do pracy z modelami 3D przy użyciu metody numerycznej FVM (*Finite Volume Method*). Generalnie OpenFOAM jest

elastycznym narzędziem, które obsługuje różne wymiary przestrzenne, w tym 1D, 2D i 3D. Proszę o uściślenie wyboru modelu oraz uzasadnienie tego wyboru.

- b. Model entalpia-porowatość (*enthalpy-porosity model*), znany również jako model *Darcy'ego-Forchheimera* lub model *przepływu dwufazowego*, jest stosowany do opisanego przepływu dwóch faz (np. cieczy i gazu) w porowatej strukturze materiału. Wykorzystywany jest do modelowania procesów ze zmianami fazowymi, takich jak wrzenie i skraplanie. W pracy wystąpiła konieczność rozszerzenia modelu o zmiany fazowe topnienie-krzepnięcie. Porowatość odnosi się do frakcji objętości porów w porowatym materiale i tu również zdefiniowano podejście obliczeniowe z uwzględnieniem członu S_d w równaniu *Naviera-Stokesa*, powiązane z przepuszczalnością ośrodka i prędkością przepływu. Zaadoptowano model do sytuacji, gdy ośrodek porowaty to sztucznie zdefiniowany ośrodek złożony z warstwy lodowej i cieczy. Podano informację (strona 27), że: „wprowadzone zostało dodatkowe pole α_1 , przyjmujące wartości z zakresu od 0 do 1. W obliczeniach służy ono do rozróżnienia frakcji ciekłej czynnika ($\alpha_1 = 1$) od części zestalonej ($\alpha_1 = 0$)”. W dysertacji w zależności (3.10) wprowadzono pewną stałą, nazwaną C i wskazując jej wartość przekierowano do literatury (artykuł współautorski, opublikowany w prestiżowym czasopiśmie naukowym *International Journal of Heat and Mass Transfer*). Nie wskazano jednakże co oznacza ε w wymienionym wyżej wzorze. Proszę o wyjaśnienie.

Podkreślę, że większość uwag związanych z prowadzeniem obliczeń numerycznych nie wystąpiłaby w recenzji, gdyby Doktorant uzupełnił pracę załącznikiem, w którym kwestie zostałyby przybliżone, warto wówczas wskazać pewne rozwiązania wykorzystując tzw. „zrzuty ekranu”.

- 7) Jako przykład nieprecyzyjnych opisów odnoszących się do procesów wymiany ciepła, związanych z przepływem konwekcyjnym ze zmianą fazy (podczas wrzenia), przytaczam zdania występujące w pracy na stronie 39:
- a. Zdanie „Celem pozyskania ciągłej, a nie jedynie punktowej charakterystyki, dane odnoszące się do wrzenia błonowego zaraportowane w [45] zostały przybliżone wielomianem stopnia trzeciego 3.5., – usterki stylistyczne oraz niejasne odniesienie się do punktu 3.5 (?)”
- b. I dalej „Jak podają badania, wartość współczynnika wnikania ciepła jest składową wielu czynników takich jak: szorstkość powierzchni [48], reżim przepływu [49, 50, 51] oraz orientacja powierzchni wrzenia.” Uwagi:
- badania „nie podają” (wnioski z badań wskazują ich autorzy), a wartość współczynnika wnikania ciepła nie jest „składową”, ale „jest zależna”
 - nie rozumiem znaczenia terminu „reżim przepływu” – czy może o „rodzaj” lub „charakter” przepływu, tj. laminarny, przejściowy, turbulentny (?)
 - jeśli chodzi o sformułowanie „orientacja powierzchni wrzenia” – może Doktorant miał na myśli orientację przestrzenną powierzchni grzejnej (?)
 - we wcześniejszej części tego rozdziału podawano nazwę „reżim wrzenia” – w języku polskim zwykle używana jest nazwa „obszar wrzenia”.
- c. Dalsze części opisów również nie są dla mnie jasne.
- „Biorąc pod uwagę dodatkowy wpływ ewentualnej zmiany współczynnika wymiany ciepła podczas wrzenia, niniejsza analiza uwzględnia trzy odrębne warianty” - nie jest dla mnie jasne: wpływ na jaki parametr/proces tu rozważano (?), w tym zdaniu wystąpiła kolejna nazwa współczynnika

związanego z procesami wymiany ciepła, w pracy nazwy współczynnika powinny być zunifikowane. Proszę o wyjaśnienie.

- 8) Kolejne opisy/założenia rozwiązań konstrukcyjnych stanowiska pomiarowego nie są dla mnie jasne – str. 43: „dla którego concept organizacji przestrzeni obliczeniowej przedstawiono ...” W tabeli 4.1, wskazano, iż wysokość kanału wynosi 250 mm. Czy wysokość kanału oznacza jego długość, a kanał (wymiennik ciepła) ustawiono pionowo? Jaki jest kierunek/zwrot wektora prędkości przepływu płynów? Co oznacza sformułowanie „Szerokość płyty (wymiar wgłęb)”? Czy w symulacjach numerycznych uwzględniono ustawienie przestrzenne wymiennika?
- 9) Zwracam uwagę, iż w języku polskim przecinek (,) jest używany na oddzielenie części dziesiętnej. Jest to zgodne z konwencją stosowaną w Polsce i wielu innych krajach europejskich. W języku angielskim używa się kropki do oddzielenia części dziesiętnej. Niestety, w całej treści dysertacji użyto kropek do oddzielenia części dziesiętnej, pomimo iż dysertacja jest napisana w języku polskim.
- 10) W dysertacji stosuje się często uproszczone i potoczne sformułowania dotyczące liczby Reynoldsa - przykładowo na stronie 45. W opisach warto podkreślić odniesienie do określonego rodzaju przepływu, który wynika ze danej wartości liczby Reynoldsa.
- 11) W tabeli 4.4 wskazano wysokie wartości błędu względnego w przestrzeni kanału przepływowego, wyznaczonego w ramach studium niezależności wyników od gęstości siatki numerycznej. Proszę o interpretację wyników, ponieważ nie zostały zamieszczone w dysertacji.
- 12) Na rysunku 4.8 przedstawiono zależność błędu względnego w funkcji poziomu zagęszczenia komórki, proszę o analizę przedstawionych wyników.
- 13) W punkcie 4.2.3 analizowano wpływ zagęszczenia siatki na czas obliczeń. Proszę o wnioski z tej analizy. Co oznacza „analiza kosztów obliczeniowych w zależności od zaproponowanych poziomów zagęszczenia siatki”?
- 14) Punkt 4.2.4, strona 54: co oznacza sformułowanie „Warto zwrócić także uwagę jaki charakter mają błędy w przypadku niewystarczającego rozmiaru siatki”? Jak rozumieć „niewystarczający rozmiar siatki”? Proszę o wyjaśnienie.
- 15) Niefortunne jest użycie sformułowania „z tamtejszej analizy” - na stronie 55, a użycie sformułowania „algorytm w pętli” (strona 62) jest uproszczone.
- 16) Punkt 4.4.2 *Zestawienie wyników*: nie zawiera analizy przedstawionych wyników, z kolei w kolejnym punkcie 4.4.3 (*Wnioski*) wskazano bardzo ogólne sformułowania dotyczące wyników otrzymanych z obliczeń numerycznych i zgodnie z modelem 1D. Proszę o doprecyzowanie.
- 17) Na stronie 69 użyto terminu „współczynnik przenoszenia ciepła podczas wrzenia LNG” – to kolejna wielkość występująca w pracy. Czy Doktorant miał na myśli „współczynnik wnikania ciepła” czy „współczynnik przejmowania ciepła” i wymianę ciepła zachodzącą na drodze konwekcji wymuszonej w kanale z przepływającym czynnikiem LNG?
- 18) Na tejże stronie 69 w punkcie 5) podano iż „odpowiednia konstrukcja wymiennika ciepła do regazyfikacji LNG może pomóc w ochronie przed ryzykiem zamarzania i zatkania” – to bardzo ogólne i potoczne sformułowania, z których nie możemy wnioskować o jakichkolwiek wartościowych wnioskach i spostrzeżeniach z przeprowadzonych badań i analiz Doktoranta. Proszę o bardziej szczegółową interpretację i wnioski.
- 19) Strona 95 – na jakiej podstawie stwierdzono, że „Bieżące badania pozwoliły zidentyfikować krytyczną liczbę Reynoldsa (...), w literaturze przedmiotu termin krytyczna liczba Reynoldsa odnosi się do ściśle określonych sytuacji (zmiana charakteru przepływu płynu

z turbulentnego w laminarny i odwrotnie), a nie dotyczy sytuacji „gdy wymiennik ciepła jest zablokowany przed lód”? Proszę o wyjaśnienie.

- 20) Rysunek 7.2, strona 107 – w opisie pod rysunkiem należałoby wyjaśnić wszystkie elementy wchodzące w skład stanowiska laboratoryjnego.
- 21) Tabela 7.2, strona 108 i Tabela 7.3, strona 109 – należałoby wskazać błędy czy niepewności pomiarowe, dotyczące pomiarów parametrów ciepło-przepływowych z wykorzystaniem przedstawionych elementów aparatury stanowiska badawczego. Proszę o uzupełnienie.
- 22) Strona 110 – co oznacza sformułowanie „kampanie pomiarowe, które ideowo pokrywały się ze wstępnym planem”?
- 23) W analizie błędów należałoby odnieść się do odpowiednich norm i/lub pozycji literatury, na podstawie których przeprowadzano analizę błędów. Proszę o rozszerzenie tego tematu.
- 24) Nie podano co oznacza „x” w zależnościach (7.7), (7.9), „Y” w zależności (7.6), jak również nie uzasadniono wybrania z literatury wskazanych równań kryterialnych przyjętych do wyznaczenia liczby *Nusselta*. Proszę o wyjaśnienie.
- 25) Na jakiej podstawie wyznaczono stopień suchości azotu na wlocie (str. 114)?
- 26) Tytuł podrozdziału 7.5 – *Wykorzystanie modelu w celu symulacji awarii oraz szacowania ratowania* – co oznacza sformułowanie „szacowanie ratowania”? Określenie jest potoczne i nieprecyzyjne.
- 27) Bibliografia – niektóre z pozycji nie są opisane w pełni i/lub zgodnie z konwencją, np. [31], [44], niektóre opisy są niezunifikowane i niedopracowane, odniesienia do stron internetowych również nie są właściwie zacytowane (należy podać dzień korzystania ze stron www).
- 28) We wnioskach zamieszczonych w pracy, należałoby się odnieść szczegółowo do postawionych tez (hipotez), jeśli je postawiono. Na stronie wspomniano o „korelacji na współczynnik wrzenia”(?). Stwierdzenie na stronie 122, iż „Na tej podstawie należy stwierdzić, iż uzyskane efekty badań w pełni realizują założone cele rozprawy oraz potwierdzają zasadność postawionych tez” to bardzo ogólne sformułowanie.

5. PARAMETRY NAUKOMETRYCZNE DOROBKU NAUKOWEGO ARKADIUSZA BRENKA

Parametry naukometryczne dorobku naukowego mgra inż. Arkadiusza Brenka, na dzień 31.01.2024 r., uzyskano na podstawie informacji uzyskanych z dwóch baz i zestawiono poniżej.

Baza naukowa *Web of Science Core Collection*:

- 7 indeksowanych publikacji
- sumaryczny wskaźnik wpływu (*Impact Factor*) wszystkich publikacji IF = 11 (zgodnie z rokiem opublikowania)
- liczba cytowań publikacji: 41 (34 bez autocytowań)
- Indeks *Hirscha* H-indeks = 4

Baza naukowa *Scopus*:

- 6 indeksowanych publikacji
- Liczba cytowań publikacji: 41 (26 bez autocytowań)
- Indeks *Hirscha* H-indeks = 4

Należy podkreślić, iż mgr inż. Arkadiusz Brenk posiada znaczący dorobek naukowy, jak na początki swojej kariery naukowej. Wśród publikacji naukowych jego autorstwa znajdują się artykuły w prestiżowych czasopismach naukowych, o wysokim współczynniku wpływu.

6. WNIOSEK KOŃCOWY

Tematyka dysertacji autorstwa Pana mgra inż. Arkadiusza Brenka jest interesująca. Jako największą jej zaletę wskazuję komplementarność. Praca obejmuje modelowanie zjawisk cieplno-przepływowych w wymienniku ciepła, przeprowadzenie symulacji numerycznych, badań eksperymentalnych i wykonanie obliczeń uproszczonych, walidację wyników oraz ich analizy, które wymagało dużego zaangażowania Doktoranta. Temat dysertacji jest aktualny i ważny.

Reasumując, uważam, że praca doktorska Pana mgra inż. Arkadiusza Brenka pt. Wpływ zamrażania cieczy grzewczej na regazyfikację cieczy kriogenicznych spełnia warunki stawiane rozprawom doktorskim, o których mowa w art. 187 ust. 1 i 2 ustawy z dnia 20.07.2018 r. *Prawo o szkolnictwie wyższym in nauce* (Dz. U. z 2022 r. poz. 1669 poz. 574 z późniejszymi zmianami). Dysertacja stanowi oryginalne rozwiązanie problemu naukowego oraz wykazuje ogólną wiedzę teoretyczną Doktoranta w dyscyplinie *inżynieria środowiska, górnictwo i energetyka*. Wskazuje ponadto na umiejętność samodzielnego prowadzenia przez niego pracy naukowej. W związku z powyższym: stawiam wniosek o przyjęcie rozprawy doktorskiej i dopuszczenie Pana magistra inż. Arkadiusza Patryka Brenka do jej publicznej obrony.

Małgorzata Rencze