



INSTYTUT FIZYKI MOLEKULARNEJ PAN
W POZNANIU
ZAKŁAD FIZYKI NISKICH TEMPERATUR
W ODOLANOWIE

tel.: (62) 594-00-15 e-mail: trybula@ifmpan.poznan.pl
tel. kom.: 721 288 608

prof. dr hab. Zbigniew Trybuła

Recenzja pracy doktorskiej
Pana magistra inżyniera Pawła Dudy
„Termo-hydrauliczno-mechaniczna optymalizacja konstrukcji
rurociągów do przesyłu wybranych płynów kriogenicznych”

Recenzja, przedstawionej mi do oceny pracy doktorskiej Pana magistra inżyniera Pawła Dudy, składa się z czterech punktów:

- I. Trafność wyboru tematu oraz poprawność doboru technik eksperymentalnych.**
- II. Układ recenzowanej pracy i najważniejsze wyniki.**
- III. Uwagi na temat edycji pracy.**
- IV. Podsumowanie.**

I. Trafność wyboru tematu oraz poprawność doboru technik eksperymentalnych.

Dynamiczny rozwój gospodarczy wielu krajów i stosowanie nowoczesnych technologii wiąże się z wykorzystaniem i przesyłem cieczy kriogenicznych, szczególnie azotu i helu, których temperatury wrzenia pod ciśnieniem normalnym wynoszą 77,3K dla azotu N₂ i 4,2K dla helu He⁴. Przesyłanie cieczy kriogenicznych na duże odległości wiąże się z wieloma problemami konstrukcyjnymi linii kriogenicznych związanymi z: bezpieczeństwem użytkowania, sprawnością termodynamiczną, wytrzymałością mechaniczną i niezawodnością. Ważnym zagadnieniem jest więc optymalizacja takich konstrukcji. Biorąc to pod uwagę, wybrany przez Doktoranta temat pracy doktorskiej „*Termo-hydrauliczno-mechaniczna optymalizacja konstrukcji rurociągów do przesyłu wybranych płynów kriogenicznych*” jest bardzo interesujący i ważny przy projektowaniu oraz ocenie istniejących konstrukcji rurociągów kriogenicznych.

Doktorant w sposób bardzo czytelny zawarł na stronie 48. cel, tezę i zakres pracy doktorskiej. Pisze On, że celem pracy jest:

„ – *przegląd konstrukcji jedno- i wielokanałowych kriogenicznych linii przesyłowych z uwzględnieniem konstrukcji własnych autora;*

– *opracowanie modelu matematycznego pozwalającego na wykorzystanie metody minimalizacji entropii do termo-hydrauliczno-mechanicznej optymalizacji rurociągów kriogenicznych;*

– *opracowanie wytycznych i zaleceń do projektowania kriogenicznych linii przesyłowych w oparciu o wyniki uzyskane na drodze optymalizacji.*”.

Szczegółowe zapoznanie się Doktoranta z istniejącym stanem wiedzy na temat wykorzystania drugiej zasady termodynamiki do optymalizacji procesów cieplnych, konstrukcji i oceny wielu urządzeń cieplno-przemysłowych, czego dał wyraz w rozdziale 3. recenzowanej pracy, pozwoliło Mu na postawienie tezy mówiącej o możliwości wykorzystania metody opartej na minimalizacji produkcji entropii – wykorzystanie drugiej zasady termodynamiki i prawa Gouya-Stodoli – do całościowej optymalizacji kriogenicznych linii kriogenicznych.

Doktorant w sposób prawidłowy i systematyczny podjął działania by zrealizować postawiony sobie cel badawczy i dobrał właściwe techniki i metody badawcze. Szczegółowy zakres dwunastu zadań, wykonanie których doprowadziło Doktoranta do zrealizowania celu pracy doktorskiej, został przedstawiony na stronie 48. Są to:

- „1. *Synteza stanu wiedzy dotyczącej wykorzystania metody minimalizacji produkcji entropii do poprawy parametrów urządzeń cieplno-przepływowych.*
2. *Przegląd i opis istniejących konstrukcji kriogenicznych linii przesyłowych w oparciu o źródła literaturowe.*
3. *Przegląd literaturowy stanu wiedzy dotyczący optymalizacji urządzeń cieplno-przepływowych w oparciu o minimalizację produkcji entropii.*
4. *Opracowanie modelu matematycznego pozwalającego na powiązanie parametrów termo-hydrauliczno-mechanicznych za pomocą strumieni generowanej entropii w celu optymalizacji konstrukcji jednokanałowych rurociągów kriogenicznych.*
5. *Zaprezentowanie metody optymalizacji jednokanałowych linii kriogenicznych na wybranym przykładzie.*
6. *Opis konstrukcji i problemów związanych z projektowaniem i budową wielokanałowych linii kriogenicznych.*
7. *Wykorzystanie metody minimalizacji produkcji entropii w celu optymalizacji temperatury ekranu radiacyjnego wielokanałowej linii kriogenicznej.*
8. *Wykorzystanie metody entropowej do określenia wpływu zwiększenia ciśnienia projektowego na konstrukcję i sprawność wielokanałowych kriogenicznych linii przesyłowych.*
9. *Wyznaczenie dopływów ciepła do modelu wielokanałowej linii kriogenicznej XATL1 za pomocą analizy numerycznej.*
10. *Analiza danych pomiarowych zebranych podczas pracy wielokanałowej linii kriogenicznej XATL1.*
11. *Porównanie wyników modelowania numerycznego i pomiarów za pomocą metody entropowej w celu oceny jakości linii XATL1.*

12. *Określenie zasad i wytycznych projektowych dla wielokanałowych linii kriogenicznych na podstawie analizy linii XATL1.*”

II. Układ recenzowanej pracy i najważniejsze wyniki.

Praca doktorska Pana magistra inżyniera Pawła Dudy liczy 147 stron. Składa się z 9 rozdziałów, poprzedzonych podziękowaniami, spisem treści i wykazem najważniejszych oznaczeń. Układ pracy jest przejrzysty i poprawny. Każdy rozdział kończy się krótkim podsumowaniem, co ułatwia lekturę recenzowanej pracy doktorskiej. Praca zawiera 81 starannie wykonanych rysunków i 34 tabele.

Pracę rozpoczyna Rozdział 1, zawierający streszczenie. Wprowadzeniem do zasadniczej części pracy są dwa następne rozdziały. Rozdział 2 to Wstęp, w którym Doktorant przedstawia jeno i wielokanałowe rurociągi kriogeniczne oraz przegląd istniejących konstrukcji. Omawia też parametry techniczne wpływające na poprawne działanie omawianych konstrukcji i bezpieczeństwo ich użytkowania. Przedstawia możliwe stany awaryjne występujące w kriogenicznych liniach przesyłowych. Znajomość tych zagadnień będzie potrzebna w dalszej części pracy dotyczącej optymalizacji linii kriogenicznych uwzględniających: bezpieczeństwo, wytrzymałość mechaniczną, niezawodność i możliwie jak najniższe koszty eksploatacji istniejących i projektowanych linii kriogenicznych. Doktorant wykazał się dobrą znajomością omawianych zagadnień, co pozwoliło Mu realizować zadania potrzebne do osiągnięcia przedstawionego w tej pracy celu.

Rozdział 3 dotyczy przeglądu literaturowego dotyczącego wykorzystania drugiej zasady termodynamiki w optymalizacji urządzeń ciepłno-przepływowych. Przedstawione jest prawo Gouya-Stodoli (równanie 3.24. w recenzowanej pracy) pozwalające wyznaczyć straty pracy użytecznej czyli pracy koniecznej do zrekompensowania strat wynikających z nieodwracalności w procesach rzeczywistych, które są proporcjonalne do generowanej entropii i temperatury otoczenia. Wykorzystując to prawo i wyznaczając przyrosty entropii jest możliwa ocena jakościowa i porównawcza procesów ciepłno-przepływowych. Wyznaczenie sumarycznej ilości generowanej w układzie entropii, jak słusznie zauważa Doktorant, nie pozwala na określenie jak daleko jest dany układ od jego optymalnych parametrów i porównania ze sobą kilku układów. W celu optymalizacji urządzeń kriogenicznych należy wyznaczyć tak zwany wskaźnik entropowy N_s , (równie 3.30. w recenzowanej pracy), czyli stosunek entropii generowanej przez dany układ do minimalnej ilości entropii, jaka jest konieczna do działania układu. Wiąże się to, jak słusznie zauważa Doktorant, z wykonaniem dodatkowej pracy ponad pracę minimalną, wartość której można

wyznaczyć z prawa Gouya-Stodoli. Ta dodatkowa praca, jaką należy doprowadzić do systemu wskazuje jakie są perspektywy optymalizacji danego systemu.

Po tym wprowadzeniu, liczącym 47 stron, w Rozdziale 4 Doktorant przedstawia cele, tezy i zakres pracy. Dalsze rozdziały, od 5 do 7 stanowią zasadniczą część recenzowanej pracy doktorskiej. Rozdział 5 poświęcony jest optymalizacji jednokanałowych kriogenicznych linii przesyłowych. Przedstawiono wszystkie źródła strat: dopływy ciepła wynikające z różnicy temperatur pomiędzy otoczeniem i cieczą kriogeniczną oraz liniowe i miejscowe spadki ciśnienia powstałe w wyniku strat przepływu, zależne od prędkości przesyłanego czynnika kriogenicznego. Opisano sposoby wyznaczania strumieni entropii generowanych w procesach nieodwracalnych przy przepływie cieczy kriogenicznej w jednokanałowych liniach przesyłowych. Doktorant wykorzystując metodę minimalizacji produkcji entropii dokonał optymalizacji jednokanałowej kriogenicznej linii przesyłowej przechłodzonego ciekłego azotu o temperaturze $T_c=65\text{K}$ (Rozdział 5.5.) o długości rurociągu $L=100\text{m}$, strumieniu masy czynnika kriogenicznego $\dot{m}=2\text{ kg/s}$, ciśnieniu początkowym $p_{we}=5\text{ bar}$. Doktorant wyznaczył generowany w procesie przepływu strumień entropii w funkcji średnicy rurociągu i liczby Reynoldsa. Wyznaczył minima entropii na zależności strumieni generowanych entropii od średnicy rury procesowej (Rys. 5.10.) i w funkcji liczby Reynoldsa (Rys. 5.11). Doktorant wyznaczył optymalną średnicę rury procesowej równą 47 mm i optymalną wartość liczby Reynoldsa $Re=1,8\times 10^5$. Na koniec Doktorant wyznaczył wskaźnik generowanej entropii N_s w funkcji liczby Reynoldsa dla trzech cieczy kriogenicznych: azotu, tlenu i metanu, a wyniki przedstawił na Rys. 5.12.

Dwa kolejne rozdziały 6 i 7 dotyczą wielokanałowych kriogenicznych rurociągów przesyłowych. W Rozdziale 6 Doktorant przedstawił budowę wewnętrzną wielokanałowych przesyłowych linii kriogenicznych wykorzystywanych głównie do przesyłu ciekłego helu, który może występować w stanie ciekłym, gazowym i nadkrytycznym. Opisano każdy typ podpór dla ekranu radiacyjnego i rur procesowych. Doktorant dokonał optymalizacji temperatury ekranu radiacyjnego w wielokanałowych kriogenicznych liniach przesyłowych wykorzystując metodę minimalizacji generowania entropii. Wyniki tej części pracy zawarł w Rozdziale 6.4.

Interesujące rezultaty badań wpływu zwiększenia ciśnienia projektowego na konstrukcję i sprawność wielokanałowych kriogenicznych linii przesyłowych na przykładzie linii zasilającej największy akcelerator FCC- *Future Circular Collider* o długości 100 km, który ma być zbudowany dla Europejskiej Organizacji Badań Jądrowych CERN w Genewie, zawiera Rozdział 6.5. Analiza wykonana przez Doktoranta pokazała, że najlepszym

rozwiązaniem prowadzącym do minimalizacji produkcji entropii oraz, co jest również ważne, obniżenia awaryjności planowanej wielokanałowej kriogenicznej linii przesyłowej, będzie innowacja konstrukcji: zamiast stosować rury procesowe z mieszkaniami kompensacyjnymi, lepiej będzie zastosować rury procesowe wykonane z Invaru.

Rozdział 7 zawiera rezultaty badań wielokanałowej linii kriogenicznej XALT1, zaprojektowanej przez zespół z Politechniki Wrocławskiej z udziałem Doktoranta, wykorzystywanym w ośrodku naukowym DESY w Hamburgu. Linia ta jest wykorzystana do zasilania stacji testowanych wnęk rezonansowych oraz modułów kriogenicznych, które będą wykorzystane przy budowie superlasera XFEL (*The European X-ray Free Electron Laser*). Ta wielokanałowa kriogeniczna linia przesyłowa była wykorzystana przez Doktoranta jako ekwiwalent stanowiska badawczego. Doktorant uczestnicząc w pracach projektowych, konstrukcyjnych, a także w budowie i testach odbiorczych zdobył duże doświadczenie i uzyskał dane doświadczone, które pozwoliły Mu na szczegółową analizę linii kriogenicznej XALT1 z wykorzystaniem drugiej zasady termodynamiki i prawa Gouya-Stodoli. Rezultaty, które uzyskał i przedstawił w Rozdziale 7 pozwoliły nie tylko na ocenę zgodności parametrów pracy linii ze specyfikacją, ale także na zaproponowanie bardziej optymalnych rozwiązań konstrukcyjnych dotyczących niektórych podpór wielokanałowej kriogenicznej linii przesyłowej. Doktorant wykorzystując jako model doświadczalny linię przesyłową XATL1 opracował wytyczne i zalecenia dotyczące projektowania kriogenicznych linii przesyłowych, co jest dużym osiągnięciem w przedstawionej mi do recenzji pracy.

Całość rozprawy Doktorant kończy Rozdziałem 8 zatytułowanym „*Podsumowanie i wnioski wynikające z pracy*”. Zwięzłe podsumowanie przedstawione na stronie 137 poprzedza wnioski zawarte w punktach: cztery wnioski ogólne, siedem wniosków dotyczących rozwiązań konstrukcyjnych kriogenicznych linii przesyłowych i cztery wnioski dotyczące wielokanałowej linii kriogenicznej XATL1.

Rozprawę doktorską kończy Rozdział 9, zawierający 116 pozycji literaturowych zawartych na stronach od 140 do 147.

Przedstawiony przez Doktoranta cel pracy został osiągnięty. W mojej ocenie najważniejsze wyniki zostały opisane w Rozdziale 6 i 7. Na ich podstawie Doktorant przedstawił wnioski.

Mimo przedstawienia w rozprawie doktorskiej interesujących wyników badawczych nie znalazłem w spisie literatury prac z udziałem Doktoranta. Czy wyniki przedstawione w recenzowanej pracy doktorskiej były publikowane w czasopiśmie naukowych i przedstawiane na konferencjach?

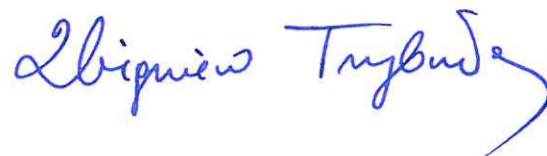
III. Uwagi na temat edycji pracy.

Praca jest napisana bardzo starannie, choć Doktorant nie ustrzegł się paru drobnych błędów edytorskich, nieobniżających wysoką ocenę pracy, które z obowiązku recenzenta przedstawiam poniżej.

1. W wielu miejscach drukowanej wersji rozprawy doktorskiej brak jest spacji pomiędzy wyrazami.
2. Brak jest kropek na końcu zdań w podpisach pod rysunkami.
3. Str. 78, 4 i 5 linia od dołu: jest „...na rysunku 6.13. b).”, powinno być „...na rysunku 6.5 b.).”.
4. Str. 91, na Rysunku 6.13. powinny być zamienione oznaczenia strumieni ciepła q_{r1} i q_{r2} , by była konsekwencja z Rysunkiem 6.12. i opisem w tekście.
5. Str. 92, ostatnia linia od dołu: jest η_{C1} , powinno być η_{C2} .
6. Str. 95, 6 linia od góry: jest „...zaczęto zastanawiać się **na** możliwością transportu gazu...”, powinno być „...zaczęto zastanawiać się **nad** możliwością transportu gazu...”.
7. Str. 107, 5. linia od dołu: jest „Nie jest to **jednak** zaleta opisanej konstrukcji.”, powinno być: „Nie jest to **jedyna** zaleta opisanej konstrukcji.”.
8. Od strony 121 w Rozdziale 7, do końca tego rozdziału jest zła numeracja rysunków. Przykładowo: Rysunek oznaczony jako 7.11 u dołu strony 121 powinien mieć oznaczenie 7.13. To samo dotyczy dalszych rysunków aż do strony 134. Numeracja rysunków powinna też być od strony 121 do 134 zmieniona w tekście, gdzie są odniesienia do przedstawianych rysunków.
9. Str. 128, 1. linia od góry: jest „Korzystając z równania (8.1.)...”, powinno być: „Korzystając z równania (7.1.)...”.

IV. Podsumowanie.

Stwierdzam, że przedstawiona mi do recenzji praca doktorska Pana magistra inżyniera Pawła Dudy „*Termo-hydrauliczno-mechaniczna optymalizacja konstrukcji rurociągów do przesyłu wybranych płynów kriogenicznych*”, spełnia wymagania stawiane rozprawom doktorskim w ustawie z dnia 14.03.2003 roku o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki (Dz. U. Nr 65, poz. 595, z 2005 r. Nr 164, poz. 1365, z 2010 r. Nr 96, poz. 620 i Nr 182, poz. 1228 oraz z 2011 r. Nr 84, poz. 455, Dz. U. z 2014 r. poz. 1852, z 2015 r. poz. 249) i wnoszę o dopuszczenie jej do publicznej obrony.



Odolanów, 8 września 2017