

Gliwice, 21 sierpień 2019

Recenzja rozprawy doktorskiej
mgra inż. Michała Sobieraja
*Zastosowanie mieszanin z CO₂ jako czynników roboczych w podkrytycznym
autokaskadowym obiegu chłodniczym*

Komentarze o charakterze ogólnym

Wybór tematu doktoratu Pana Michała Sobieraja należy uznać za słuszny, gdyż jego głównym celem była analiza zastosowania mieszanin z naturalnym dwutlenkiem węgla w układzie chłodniczym.

Zastrzeżenie budzi jednak częściowo tytuł, gdyż powinien wskazać, że chodzi o mieszaniny butanu lub izobutanu z CO₂. Tytuł mógł się również odwoływać do naturalnych czynników chłodniczych. W ten sposób przekaz doktoratu do społeczności akademickiej i sektora prywatnego byłby znacznie silniejszy. Moim zdaniem ważne jest, żeby minimalizować lub wręcz rezygnować z badań nad czynnikami o wysokim GWP na rzecz czynników o niskim GWP, a najlepiej naturalnych. W Polsce ten trend jest jeszcze słabo widoczny, ale w krajach bardziej rozwiniętych badania nad naturalnymi czynnikami dominują. Świadczy o tym choćby światowy kongres chłodnictwa imienia Gustava Lorentzena, który przyczynił się do rozwoju naturalnych czynników chłodniczych, a przede wszystkim dwutlenku węgla.

Warto również podkreślić, że Doktorant zdążył już opublikować materiał z ostatniej części doktoratu w *International Journal of Refrigeration*, który jest najbardziej prestiżowym branżowym czasopismem na świecie. Formalnie wspomniany artykuł nie jest częścią doktoratu, ale bardzo mocno jest oparty o Rozdział 9 (*Wyznaczenie wartości współczynnika przejmowania ciepła*), a przede wszystkim świadczy o jakości raportowanych badań w doktoracie.

Komentarze o charakterze porządkowym

Wśród słabych stron pracy należy wymienić niedociągnięcia o charakterze edytorskim, językowym oraz prezentacyjnym. Pierwsze dwa będą omówione zbiorczo, żeby nie powtarzać w recenzji tych samych treści, a błędy prezentacyjne zostały wskazane podczas omówienia konkretnej części pracy.

Błędy edytorskie dotyczą:

- Formatowania liczb kryterialnych, np.: Nu oraz Re, które zapisuje się czcionką prostą. Przykład: spis oznaczeń.
- Formatowania liczb oraz jednostek za pomocą kursywy, a powinny być one zapisane wyłącznie czcionką prostą. Przykłady: str. 33 (l. 3-5), str. 77 (l. 3-5).
- Konfliktu oznaczeń temperatury, dla których przyjęto wielką literę *T*, ale jednocześnie dwie skale: Celcjusza i Kelvina. Przykład: spis oznaczeń.
- Indeksu *eva*, które odnosi się do odparowania i nie jest typowym oznaczeniem. Rozumiem, że Doktorant chciał uniknąć konfliktu z oznaczeniem *ev* dla zaworu rozprężnego, ale to oznaczenie również nie jest typowe. Przykład: spis oznaczeń.
- Brakujących kropek na końcu zdania oraz kropek z przecinkiem na końcu zdania. Przykład: str. 32 (l. 17).

Politechnika Śląska
Wydział Inżynierii Środowiska i Energetyki
Instytut Techniki Ciepłej

ul. Konarskiego 22, pok. 105A, 44-100 Gliwice
+48 32 237 10 19 / +48 32 237 16 61
jacek.smolka@polsl.pl / RIE@polsl.pl

NIP 631 020 07 36
ING Bank Śląski S.A. o/Gliwice 60 1050 1230 1000 0002 0211 3056

- Bardzo częstego powoływania się na rysunek lub tabelę za miejscem wystąpienia tego obiektu. Ta sama uwaga dotyczy równań. Taki sposób odnoszenia się do rysunków oraz tabel utrudnia odbiór danego fragmentu tekstu. Przykłady: tab. 2.6, rys. 4.1., rys. 4.4.
- Niewyjaśnionych symboli wykorzystanych w równaniach. Przykłady: ΔT_{log} w rów. (5.5).
- Używania słowa *zależność* zamiast *równanie*. Ponadto numer równania powinien znajdować się w nawiasie. Przykłady: str. 127, l. 7 od dołu.
- Nieprawidłowej numeracji rysunków. W paru miejscach w pracy pojawiły się w tekście niewłaściwe odniesienia. Przykłady: powołanie w tekście na rys. 9.1-9.4 na str. 147 powinny być na rys. 8.1-8.4.

Błędy językowe dotyczyły przede wszystkim:

- Uchybień interpunkcyjnych w postaci zbyt dużej liczby przecinków, które wstawiano w nieodpowiednich miejscach. Przykłady: str. 64, l. 3 od dołu.
- Niekonsekwencji w stosowaniu czasu, w którym napisano rozprawę.
- Braku wyrazów łączących zdania, co utrudniało logiczny odbiór treści.
- Nieodpowiedniego użycie spójników, np. *który* które nie odnosiły się do odpowiedniego słowa.

Te błędy pojawiły się w całej pracy i były dość liczne, szczególnie w streszczeniu, aczkolwiek nie utrudniły merytorycznego odbioru pracy.

Komentarze o charakterze merytorycznym

Praca doktorska Pana Michała Sobieraja składa się formalnie z 11 rozdziałów, choć faktycznie zawiera trzy zasadnicze części: przegląd literatury, badania eksperymentalne i badania modelowe.

W pracy zacytowano prawie sto pozycji literaturowych. Ważne jest, że zdecydowana większość z nich to teksty, które opublikowano w dobrych czasopismach JCR, i które zostały wydane niecałe dziesięć lat temu. To oznacza, że Doktorant zapoznał się z najnowszą, światową literaturą w przedmiocie swoich badań. W wykazie znalazło się jedynie kilka błędów edytorskich.

Pierwsza część pracy zawiera wstęp, przegląd literatury oraz omówienie tezy, celu i zakresu pracy. Tę część uznaję za najsłabszą w całym tekście pracy doktorskiej Pana Michała Sobieraja. Najważniejsze krytyczne uwagi dotyczą następujących kwestii:

- Sposobu cytowania licznej literatury. Jak już wspomniano, spis literatury zawiera prawie sto pozycji, a mimo tego w tekście zdecydowano się na numerowanie doniesień literaturowych według porządku alfabetycznego zamiast kolejności występowania danego cytowania. Taki sposób cytowania jest nietypowy i niestosowany w czasopismach naukowych JCR, a przede wszystkim niepraktyczny. Przy tak dużej liczbie pozycji śledzenie cytowań podczas czytania przeglądu literatury jest bardzo uciążliwe.
- Braku definicji oraz zakresów wartości wskaźników czynników chłodniczych takich jak GWP, ODP oraz TEWI. Nie wyjaśniono też skrótu ITH oraz LFL w miejscu pierwszego użycia.
- Sposobu prezentowania czynników roboczych wszystkich czterech generacji. Wydaje się, że jest to ciekawy rys historyczny, w którym podano sposoby oznaczeń syntetycznych czynników chłodniczych, wskazano sposoby oddziaływania chloru oraz fluoru na tworzenie efektu cieplarnianego oraz podano wady i zalety najnowszych czynników chłodniczych z grupy HFO. Moim zdaniem ta część pracy jest całkowicie niepotrzebna, gdyż dotyczy zagadnień już nieaktualnych. W to miejsce powinny być szeroko opisane czynniki naturalne i ewentualnie najnowsze z grupy HFO.
- Zagadnień bezpieczeństwa. Z jednej strony omówiono mechanizmy palności i gaszenia, niestety również dla czynników zawierających fluor, ale z drugiej nie omówiono klas bezpieczeństwa i konsekwencji z tego wynikających.
- Jakości rysunków. Większość rysunków pochodzi z literatury, a ich jakość, np.: pod kątem oznaczeń jest dyskusyjna (rys. 2.18(b)) lub braku oznaczeń (rys. 2.5).
- Kompozycji rozdziałów w przeglądzie literatury oraz sposobu podawania treści. Na przykład przeprowadzono analizę niepalności mieszanin zawierających dwutlenek węgla na podstawie literatury (rozdział 2.2.1), ale nie

dokonano już podsumowania tych udziałów, co mogłoby dodatkowo dostarczyć uzasadnienia stosowanych w pracy mieszanin. Nie przeprowadzono też analizy teoretycznej właściwości mieszanin, a przecież w drugiej i trzeciej części pracy Doktorant dokonuje zaawansowanych analiz eksperymentalnych i obliczeniowych. Wydaje się też, że poszczególne rozdziały nie łączą się ze sobą. Nie są też właściwie podsumowane, a ich obecność dobrze uzasadniona. Dlaczego rozdział 2.2.2 (*CO₂ jako czynnik niskotemperaturowy*) jest po, a nie przed rozdziałem 2.2.1 (*Mieszaniny zawierające CO₂*)?

- Pobieźnego omówienia układów autokaskadowych. W rozdziale 2.3.3 (*CO₂ w układach autokaskadowych*) dość pobieżnie omówiono wyniki badań nad tego typu układami, a przecież analogiczne układy są przedmiotem pracy, więc powinny być omówione szerzej, włącznie z zasadą działania. Ponadto niezrozumiałe jest dlaczego ten rozdział jest przed, a nie po rozdziale 2.4 (*Układy autokaskadowe*). We wspomnianym rozdziale spodziewałbym się szczegółowego omówienia układów autokaskadowych: charakterystycznych komponentów, zasady działania, typowych parametrów, typowych czynników, itp., a niektóre zamieszczone rysunki nie zostały nawet zdawkowo omówione (rys. 2.17(b)).

Mocnymi stronami tej części pracy są:

- Promocja układów transkrytycznych na dwutlenek węgla. W przeglądzie literatury opisano układy transkrytyczne, również te z równoległym sprężaniem, które są dość powszechnie stosowane w nowych układach chłodniczych supermarketów. Wskazano na najnowsze rozwiązania układów transkrytycznych III generacji z dwutlenkiem węgla, choć nie podano całorocznych wyników eksploatacji takich systemów, mimo, że są już dostępne w literaturze.
- Promocja układów kaskadowych i autokaskadowych z dwutlenkiem węgla. Krótko omówiono kilka rozwiązań układów kaskadowych dwutlenku węgla jako czynnikami wysokowrzącym z amoniakiem, propanem, propenem oraz czynnikami starszymi, których nie warto wymieniać. W tej części przeglądu pojawiło się długo oczekiwane podsumowanie układów kaskadowych.
- Motywacja do podjęcia badań w postaci ogólnych wniosków z przeglądu literatury. Wskazano w nich, m.in. niewielką liczbę publikacji dotyczących układów autokaskadowych, w których stosuje się mieszaniny dwutlenku węgla i innych wysokowrzących czynników naturalnych jak izobutan oraz butan. W związku z tym zdefiniowany cel i zakres pracy jest jak najbardziej uzasadniony.

Druga część pracy dotyczyła własnych badań eksperymentalnych poprzedzonych omówieniem wyboru składników mieszaniny oraz budową samego stanowiska. Po lekturze tej części pracy można stwierdzić, że Doktorant świetnie się czuje w aktywnościach o tym charakterze.

Słabymi stronami drugiej części pracy są:

- Niepotrzebna analiza czynników o wysokim GWP jako składników mieszanin z dwutlenkiem węgla. Domyślam się, że ta analiza została wykonana pod wpływem doniesień w literaturze, ale wydaje mi się, że jednak powinna być ograniczona do czynników naturalnych, ewentualnie syntetycznych o niskim GWP.
- Brak odniesienia się do palności mieszaniny. Po wskazaniu mieszaniny dwutlenku węgla i izobutanu o wysokim udziale masowym tego drugiego składnika napisano o zakwalifikowaniu tego czynnika do grupy palności A3. Wydaje mi się, że to nie powinno pozostać bez komentarza, bo w pewnym stopniu ograniczy ew. zakres stosowania omawianego układu.
- Zbyt zdawkowe omówienie stanowiska. Na rys. 5.1 przedstawiono schemat projektowanego stanowiska i omówiono jego podstawowe elementy, ale brakuje ogólnego obiegu, np. w typowych współrzędnych ciśnienie-entalpia właściwa jak pokazano to na rys. 2.12 oraz 2.17, które przytoczono z literatury. Wydaje się, że taki rysunek jest konieczny ze względu na odniesienia do rys. 5.1 w dalszej części pracy.
- Nieprecyzyjne omówienie bilansu cieplnego układu. W rów. (5.5) i (5.6) wykorzystano współczynnik przenikania ciepła na poziomie $550 \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$, który wydaje się zbyt niski. Ponadto przyjęto sprawność sprężarki jako wartość stałą na dość wysokim poziomie. Nie opisano też w odpowiednim momencie analizowanych wariantów.
- Niezweryfikowane dane do obliczeń zaprojektowanego układu. W rów. (6.5), które służyło do określenia zysków ciepła, wątpliwość budzi przyjęcie wartości współczynnika przejmowania ciepła, gdyż ta wartość jest bardzo wysoka. To równanie jest o tyle ważne, że na jego podstawie określano temperaturę płynu w kolejnych etapach pracy. Zatem czy ten współczynnik obejmuje też promieniowanie? Czy temperatura zewnętrzna była



niezmienna i nie wpływała na wartość tego parametru? Pod rów. (6.9) pojawia się informacja, że współczynnik wyznaczano iteracyjnie bez żadnych dodatkowych wyjaśnień. Proszę o doprecyzowanie, w jaki sposób wyznaczano zyski oraz wyjaśnienie, który element modelu powodował różnice pomiędzy teoretycznym a praktycznym poziomem napełnienia.

- Analiza czynnika R134a jako czynnika niskowrzącego. Moim zdaniem te badania nie powinny znaleźć się w tym doktoracie, który, przypominę, jest poświęcony nowoczesnemu układowi chłodniczemu z naturalnymi czynnikami chłodniczymi. Zamiast tej analizy lepiej byłoby zamieścić wyniki szerszych badań eksperymentalnych lub badania innego czynnika naturalnego lub syntetycznego o niskim GWP.
- Drobny błąd edytorski: *strumień mocy* powinien być zastąpiony słowem *moc* lub *strumień energii*.

Jak wspominałem we wstępie do omówienia tej części pracy, mocnych stron jest bardzo wiele, a do najważniejszych można zaliczyć:

- Analizę parametrów mieszanin z dwutlenkiem węgla pod kątem normalnej temperatury wrzenia dla mieszanin dwutlenku węgla z czynnikami wysoko i niskowrzącymi, wpływu na palność oraz odpowiedniego udziału masowego składników. Na tym etapie wskazano na mieszaninę dwutlenku węgla z naturalnym izobutanem o udziale masowym po 50%.
- Analizę przemian zachodzących w analizowanym układzie i zobrazowanie ich na wykresach temperatura-udział masowy oraz entalpia właściwa-udział masowy. Analiz przemian dokonano, zarówno dla wariantu z oraz bez wymiennika regeneracyjnego. Na samym schemacie stanowiska ten wymiennik mógł być lepiej oznaczony, podobnie jak pozostałe wymienniki wewnętrzne.
- Bilans cieplny i dobór urządzeń do stanowiska. Ta analiza pozwoliła na określenie podstawowych parametrów układu, wyznaczenie teoretycznego COP oraz zaprojektowanie wymiarów wymienników. Potwierdzono też pozytywny wpływ wymiennika regeneracyjnego na efektywność energetyczną układu.

Na etapie doboru komponentów układu przedstawiono rozwiązanie do badania składu ciekłej mieszaniny, co stało się podstawą do zgłoszenia patentowego. Szkoda, że w pracy nie określono wpływu otoczenia na dokładność metody oraz nie wskazano różnic względem cytowanego amerykańskiego patentu.

- Budowę stanowiska. Warto tutaj podkreślić, choć nie jest to działaniem naukowym, ale Doktorant własnoręcznie wykonał wiele elementów zaprojektowanej instalacji, przygotował układ sterowania i uruchomił stanowisko. Z reguły grupy badawcze projektują stanowiska, a później je wykorzystują do planowanych badań. W tym przypadku zaangażowanie Doktoranta było jeszcze większe, więc tym bardziej gratuluję efektu.
- Badania eksperymentalne dla mieszaniny dwutlenku węgla i izobutanu. To jest najważniejsza część pracy, w której badano wpływ napełnienia układu na osiąganą efektywność energetyczną, badano rozkład temperatur na początku i końcu wewnętrznych wymienników ciepła i raportowano trudności w osiągnięciu odpowiednio niskich temperatury na końcu wymiennika, badano stopień otwarcia zaworów, a tym samym ich wpływ na pracę wymienników ciepła oraz wpływu obciążenia cieplnego parownika na parametry analizowanego układu. W tym ostatnim fragmencie wykazano, że COP rośnie wraz z obciążeniem parownika, którego jedną ze składowych są zyski cieplne. Te z kolei były wyznaczone z rów. (6.19)-(6.21). Proszę o skomentowanie jak się mają wartości tak wyznaczonych strumieni ciepła w porównaniu do tych z rów. (6.5).

Ostatnia, trzecia część pracy obejmuje badania modelowe układu kaskadowego w oparciu o analizę energetyczną i egzergetyczną, a w kolejnym rozdziale omówiono współczynnik przejmowania ciepła. Ta część pracy jest również wartościowa jak poprzednia.

Słabe strony tej części pracy są następujące:

- Założenia modelu. Czym uzasadnione są stałe minimalne różnice na końcach wymienników ciepła oraz stałe i znane przed obliczeniami zyski cieplne? Czy oba te parametry nie są czasem podstawowym źródłem niedokładności modelu? Czy podana niezgodność jest zadawalająca? Proszę o komentarz.
- Prezentacja programu obliczeniowego. W pracy nie podano czasu obliczeń programu. Czy program nadawałby się do obliczeń nieustalonych układu ze zmienną w czasie temperaturą zewnętrzną? Proszę o komentarz.
- Brak analizy ekonomicznej. W tabeli 8.2 wskazano, że układ autokaskadowy jest mniej konkurencyjny pod kątem energetycznym od układu kaskadowego. Jednocześnie podano, że zaletą badanego układu autokaskadowego jest obecność tylko jednej sprężarki w porównaniu do dwóch stosowanych w układzie kaskadowym. Czy



wykonano choćby prostą analizę ekonomiczną, która by pokazała przewagę badanego układu nad układem kaskadowym? Wydaje się, że taka analiza byłaby bardziej pożądana niż wcześniej krytykowane analizy z udziałem czynników o wysokim GWP. Proszę o komentarz.

Mocne strony tej części pracy to:

- Analiza składników mieszaniny. Za pomocą modelu przeanalizowano cztery czynniki wysokowrzące, a następnie prezentowano ich względne straty egzergii oraz COP względem udziału masowego dwutlenku węgla. Przekaz byłby lepszy, gdyby na rys. 8.1-8.4 zakresy zmienności obu tych parametrów były identyczne. Dla każdej z tych mieszanin wskazano optymalne udziały masowe. Niestety nie skomentowano tych wyników pod kątem bezpieczeństwa, tj. palności.
- Porównanie parametrów pracy dla układu kaskadowego i autokaskadowego. Szkoda, że nie przedstawiono schematu tego drugiego układu. W tab. 8.2 pokazano, że układ kaskadowy charakteryzuje się wyższą wartością COP. Czy przedstawione wyniki dla założonej, a wcześniej dyskusyjnej wartości 5 K, a nawet niższej, jest realne? Proszę o komentarz.
- Konkurencyjność badanego układu. W analizie wykazano, że układ autokaskadowy charakteryzuje się COP na nieco niższym, ale bardzo zbliżonym poziomie. Wskazano również, że znaczące straty egzergii występują w wymiennikach ciepła. Czy istnieje konfiguracja i/lub parametry pracy, w których układ autokaskadowy może potencjalnie osiągnąć wyższą efektywność energetyczną niż układ kaskadowy? Proszę o komentarz.
- Wyznaczenie współczynnika przejmowania ciepła. Celem tego badania było wyznaczenie tego parametru w warunkach wielofazowego, również w obecności suchego lodu, przepływu mieszaniny dwutlenku węgla i izobutanu. Już samo podjęcie się próby tych badań było bardzo trudne, a uzyskany efekt znakomity, gdyż zakończony publikacją w prestiżowym czasopiśmie. Proszę jednak o wyjaśnienie pochodzenia rów. (9.20), które było podstawą korelacji, wskazanie algorytmu do wyznaczania stałych w tym równaniu, a przede wszystkim warunków stosowalności proponowanej korelacji.

Przyznaję, że prześledziłem te publikację i okazało się, że była już wolna od niedociągnięć, które znalazły się w pracy takich jak: strumień ciepła liczony wg rów. (6.4), a nie (6.3), nieprawidłowym powołaniu się na rys. 10.2(b), zamiast na 9.2(b) oraz niezdefiniowany współczynnik tarcia w rów. (9.17).

Wszystkie trzy części pracy doktorskiej zostały trafnie przez Doktoranta podsumowane w postaci uogólnień i szczegółowych wniosków.

W tym miejscu chciałbym wyraźnie podkreślić podstawową wadę polskiego systemu recenzowania doktoratów. W recenzji przedstawiłem szereg uchybień o różnej wadze i charakterze. Niestety w Polsce nie ma zwyczaju, żeby Doktorant poprawił pracę doktorską zgodnie z uwagami recenzentów i ten dokument stał się przedmiotem dyskusji podczas obrony doktoratu. W ten sposób dana uczelnia, ale i sam Doktorant firmuje dysertację, która zawiera szereg uchybień, których w pracy nie powinno się znajdować. Warto zwrócić uwagę na ten aspekt, gdyż doktoraty są coraz częściej łatwo dostępne w Internecie bez większego zabiegania o jego wypożyczenie.

Wniosek końcowy

Dość krytycznie wyraziłem się o wszelkiej obecności i analizie czynników o wysokim GWP. Moim zdaniem praca doktorska jest dziełem, które powinno wyznaczać kierunki rozwoju dla danej branży o zasięgu krajowym, a najlepiej międzynarodowym. W związku z tym przedmiotem badań powinny być wyłącznie nowe rozwiązania, a takich było wiele w pracy Doktoranta.

Mimo zauważonych błędów natury prezentacyjnej oraz kompozycyjnej chciałbym wyraźnie podkreślić, że praca doktorska Pana Michała Sobieraja jest pracą na bardzo wysokim poziomie merytorycznym, o czym świadczy, m.in. publikacja w prestiżowym czasopiśmie JCR. Życzę też Doktorantowi, żeby opublikował wyniki swoich eksperymentalnych prac w czasopiśmie JCR.

Moim zdaniem Doktorant spełnia ustawowe wymagania odnośnie nadania stopnia doktora nauk technicznych i w pełni na nie zasługuje, dlatego też wnioskuję o dopuszczenie Pana Michała Sobieraja do publicznej obrony. Jednocześnie stwierdzam, że w przypadku pozytywnej dyskusji nad rozprawą będę wnioskował o jej wyróżnienie.