

Warszawa, 3.12.2021 r.

Dr hab. inż. Piotr Łapka, prof. uczelni  
Instytut Techniki Ciepłej  
Wydział Mechaniczny Energetyki i Lotnictwa  
Politechnika Warszawska  
ul. Nowowiejska 21/25

E-mail: [piotr.lapka@pw.edu.pl](mailto:piotr.lapka@pw.edu.pl)

### **Opinia o rozprawie doktorskiej mgra inż. Mieszka Tokarskiego pt.: Computational and experimental analysis of a condensation hood**

Podstawą do opracowania opinii rozprawy doktorskiej mgra inż. Mieszka Tokarskiego pt.: Computational and experimental analysis of a condensation hood jest uchwała Rady Dyscypliny Inżynierii Środowiska, Górnictwa i Energetyki Politechniki Śląskiej z dnia 30.09.2021r. o powołaniu mnie na recenzenta oraz pismo nr RIE-BD/4/30/2020/2021 Przewodniczącego Rady Dyscypliny Inżynierii Środowiska, Górnictwa i Energetyki Politechniki Śląskiej prof. dr hab. inż. Andrzeja Rusina z dnia 19.10.2021r.

Promotorem ocenianej rozprawy doktorskiej jest dr hab. inż. Ziemowit Ostrowski, prof. uczelni, a promotorem pomocniczym dr inż. Arkadiusz Ryfa.

#### **1. Tematyka rozprawy**

Tematyka rozprawy doktorskiej związana jest z badaniami i optymalizacją przebiegu procesów ciepłno-przepływowych (m.in. procesu skraplania pary wodnej z mieszaniny pary i gazu nieskraplającego się) oraz z badaniami i optymalizacją urządzeń komercyjnie dostępnych (okapów kondensacyjnych), które realizują te procesy. Zaprezentowana w pracy analiza prowadzi do zwiększenia efektywności badanych urządzeń, uproszczenia ich konstrukcji, zmniejszenia zużycia materiałów na ich wytworzenie oraz redukcji czasu i kosztów produkcji. Te działania są pożądane z punktu widzenia rozwoju innowacyjnych produktów, ale również są zgodne z dążeniami do redukcji niekorzystnego wpływu na środowisko poprzez zmniejszenie zużycia energii w trakcie eksploatacji nowych bardziej efektywnych urządzeń oraz do zmniejszenia materiało-, energo- i pracochłonności w procesach produkcyjnych. Praca doktorska dotyczyła również opracowania zaawansowanego modelu procesu skraplania pary wodnej w okapie kondensacyjnym oraz przeprowadzenia z jego wykorzystaniem analiz pracy i optymalizacji urządzenia. Wobec powyższego uważam tematykę rozprawy za aktualną i istotną zarówno pod względem naukowym, jak i gospodarczym.



## 2. Omówienie rozprawy doktorskiej

Rozprawę doktorską przygotowano w formie monografii, w której zaprezentowano poszczególne etapy prowadzonych badań. Praca powstała w ramach realizacji projektu badawczo-rozwojowego nr POIR.03.02.01-18-0019/15-00 pt.: Wdrożenie do produkcji nowej generacji pochłaniaczy pary do pieców konwekcyjno-parowych, który był finansowany przez Polską Agencję Rozwoju Przedsiębiorczości. Projekt był realizowany przy współpracy firmy Retech Sp. z o. o. z Politechniką Śląską.

Praca składa się z siedmiu rozdziałów. Czterema załącznikami do pracy są listingi funkcji użytkownika (tzw. UDF-ów) opracowane w ramach rozwoju autorskich modeli obliczeniowych okapów kondensacyjnych oraz modeli wymienników ciepła pomiędzy mieszaniną pary wodnej i powietrza a powietrzem zewnętrznym (z uwzględnieniem modelowania procesu skraplania pary wodnej z mieszaniny pary i gazu nieskrapalającego się). Ponadto praca zawiera bibliografię, spis oznaczeń i skrótów oraz streszczenia po angielsku i po polsku. Całkowity rozmiar pracy to 163 strony. W rozprawie odwołano się do 52 publikacji. Znaczna część z cytowanych artykułów naukowych została opublikowana w ostatnich dziesięciu latach. Świadczy to o aktualności tematyki. Praca zawiera bardzo dużo rysunków (64) oraz tabel (15). W pracy podano ponad 40 równań.

W pierwszym rozdziale rozprawy zwięźle przedstawiono przegląd obecnego stanu wiedzy. Analizowano prace dotyczące badań eksperymentalnych oraz modelowania numerycznego zjawisk, które występują w okapach kondensacyjnych tj.: kondensacji pary z mieszaniny pary i gazu nieskrapalającego się (najczęściej powietrza), wymiany ciepła wokół uźebrowanych rur i przewodów, przepływu płynu z wymianą ciepła przez wewnętrznie uźebrowane przewody i rury oraz wymiany ciepła w pęczkach rur. Omówiono również prace dotyczące analiz wymienników ciepła (głównie skraplaczy).

W drugim rozdziale podano cel i zakres pracy. Głównym celem rozprawy było opracowanie nowej generacji okapów kondensacyjnych. Zakres pracy dotyczył budowy modeli obliczeniowych oraz analiz procesów cieplno-przepływowych w badanym urządzeniu z uwzględnieniem kondensacji pary wodnej z mieszaniny zawierającej parę i powietrze. W celu opracowania nowej konstrukcji rozważanego urządzenia przygotowano autorskie modele obliczeniowe dla trzech wersji okapów kondensacyjnych.

W trzecim rozdziale ogólnie opisano zasadę działania i konstrukcję okapu kondensacyjnego.

W czwartym rozdziale przeprowadzono eksperymentalną i numeryczną analizę okapu kondensacyjnego ConvoVent 4 produkowanego przez firmę Retech Sp. z o. o. i dedykowanego do zastosowań z piecem konwekcyjno-parowym ConvoTherm 4. W pierwszej kolejności szczegółowo opisano analizowane urządzenie. Podano szczegóły konstrukcyjne i wyjaśniono zasadę jego działania. Następnie zaprezentowano prosty model bilansowy okapu kondensacyjnego oraz wykonano stanowisko badawcze. Celem tych prac była w szczególności analiza niestandardowego wymiennika ciepła pomiędzy mieszaniną pary i powietrza pochodzącą z pieca konwekcyjno-parowego a chłodnym powietrzem pobieranym z otoczenia. Opracowany model, który składał się z trzech równań bilansowych, miał służyć do wykonania wstępnej analizy cieplnej okapu kondensacyjnego. Kolejno opisano stanowisko pomiarowe do badań eksperymentalnych okapu kondensacyjnego oraz przeprowadzono pomiary eksperymentalne przy różnych konfiguracjach i warunkach jego pracy. W czasie tych pomiarów wytwarzano parę za pomocą generatorów (o małej i dużej mocy), jak również przeanalizowano pracę w warunkach rzeczywistych tj. okap połączono z piecem konwekcyjno-parowym. Zbadano różne tryby pracy pieca. Uzyskane wyniki posłużyły do



wyznaczenia, z wykorzystaniem opracowanego modelu bilansowego, wielkości strumienia generowanej pary oraz strumienia kondensatu, które nie były mierzone bezpośrednio w trakcie pomiarów eksperymentalnych. Na podstawie wyników pomiarów i obliczeń wyznaczono eksperymentalnie efektywność procesu skraplania w okapie kondensacyjnym. W dalszej części rozdziału przedstawiono autorski trójwymiarowy model obliczeniowy analizowanego okapu kondensacyjnego. Model opracowano w oprogramowaniu komercyjnym ANSYS Fluent z wykorzystaniem funkcji definiowanych przez użytkownika. Składał się on z trzech części (podobszarów), które były połączone warunkami zaimplementowanymi z wykorzystaniem User-Defined Function (UDF) oraz z autorskiego modelu kondensacji przy występowaniu cienkiego filmu cieczy również zaimplementowanego z wykorzystaniem UDF-ów. W opisie głównie skoncentrowano się na przedstawieniu metod sprzęgania obliczeń w podobszarach i idei modelu kondensacji. Zaprezentowano również wygenerowaną siatkę obliczeniową. Następnie omówiono wyniki przeprowadzonych symulacji, które wykonano dla trzech konfiguracji pracy okapu kondensacyjnego. Zaprezentowano mapy konturowe modułu prędkości i temperatury oraz wyznaczono m.in. efektywność kondensacji. W podsumowaniu stwierdzono, że oryginalna konstrukcja charakteryzowała się wysoką sprawnością kondensacji, ale była przewymiarowana. Uzyskane wyniki obliczeń porównano z wynikami pomiarów eksperymentalnych w ten sposób walidując opracowany model obliczeniowy.

W kolejnym rozdziale zaproponowano modyfikacje budowy okapu kondensacyjnego. Zmiany te miały na celu uproszczenie konstrukcji i obniżenie kosztów produkcji urządzenia przy zachowaniu jego wysokiej efektywności kondensacji. Dążono do poprawienia dystrybucji mieszaniny pary i powietrza w trakcie przepływu przez wymiennik ciepła. W procesie optymalizacji wymiennika ciepła usunięto dwa rzędy rurek (pierwszy i ostatni), rozszerzono kanał dystrybuujący mieszaninę pary i powietrza oraz zmodyfikowano przegrody. Następnie wykonano nowy model obliczeniowy, przeprowadzono analizy numeryczne i porównano pola modułu prędkości i temperatury w oryginalnej i zmodyfikowanej konstrukcji okapu kondensacyjnego. Nowy model różnił się od modelu zaprezentowanego w rozdziale czwartym tylko geometrią. Wprowadzone modyfikacje do konstrukcji wymiennika ciepła pozwoliły na uzyskanie równomiernego przepływu mieszaniny pary i powietrza przez obie części wymiennika ciepła. W procesie walidacji modelu predykcje modelu porównano z danymi pomiarowymi uzyskanymi na prototypie urządzenia z modyfikacjami. Wprowadzone zmiany konstrukcyjne zmniejszyły o kilka procent efektywność kondensacji, ale jednocześnie istotnie uprościły konstrukcję wymiennika ciepła i spowodowały zmniejszenie ilości materiałów potrzebnych na wykonanie zmodyfikowanego urządzenia.

W szóstym rozdziale zaprezentowano nową konstrukcję okapu kondensacyjnego i przeprowadzono jej badania eksperymentalne i obliczeniowe. Głównym zmianom podlegał wymiennik ciepła. W nowej konstrukcji powietrze zewnętrzne przepływało przez przestrzeń między rurkami, a nie przez uźebrowane wewnętrznie rurki, jak było w oryginalnym urządzeniu. Z kolei mieszanina pary i powietrza płynęła wewnątrz rurek. Następnie opracowano model obliczeniowy, ale tylko dla wymiennika ciepła. W ramach prac obliczeniowych zoptymalizowano sposób rozprowadzenia powietrza zewnętrznego w wymienniku ciepła poprzez zastosowanie przewodnic przepływu. W tym celu użyto narzędzia optymalizacyjnego dostępnego w ANSYS Workbench, a funkcja celu bazowała na indeksie jednorodności przepływu. W kolejnym kroku opracowano i za pomocą interfejsu UDF zaimplementowano w ANSYS Fluent model wymiany ciepła między mieszaniną pary i powietrza w rurkach a chłodnym powietrzem przepływającym przez obszar między rurkami w wymienniku ciepła. Model ten bazował na tej samej idei co model z czwartego rozdziału i



jednocześnie zawierał kilka nowych elementów. Następnie przeprowadzono pomiary eksperymentalne i analizy numeryczne pracy nowego okapu kondensacyjnego. Badania wykonano dla dwóch konfiguracji pracy okapu, ale tylko przy zastosowaniu generatora pary. Przewidywania modelu bardzo dobrze zgadzały się z danymi pomiarowymi. Dokonano również szczegółowej analizy wyników uzyskanych z modelowania. Omówiono rozkłady modułu prędkości oraz temperatury w przeprojektowanym wymienniku ciepła. Nowa konstrukcja okapu kondensacyjnego okazała się znacznie lepsza i wydajniejsza niż konstrukcja oryginalna i zmodyfikowana. Co więcej koszt jej wytworzenia i zużycie materiałów były znacznie niższe.

W ostatnim rozdziale podsumowano całą pracę, w której opracowano modele numeryczne trzech okapów kondensacyjnych (oryginalna konstrukcja, zmodyfikowana konstrukcja i konstrukcja z nowym wymiennikiem ciepła) oraz przeprowadzono analizy obliczeniowe i eksperymentalne pracy badanych urządzeń.

### **3. Elementy nowości naukowej**

Biorąc pod uwagę zawartość rozprawy doktorskiej stwierdzam, że zawiera ona elementy nowości naukowej, które stanowią oryginalny dorobek Doktoranta. Analizowane urządzenie oraz proces kondensacji pary z mieszaniny pary i powietrza są złożone, a ich modelowanie obliczeniowe stanowi duże wyzwanie naukowe.

W mojej ocenie praca zawiera następujące elementy charakteryzujące się nowością naukową:

- Koncepcja autorskiego modelu numerycznego procesu kondensacji pary wodnej z mieszaniny pary i gazu nieskrapalającego się przy występowaniu cienkiego filmu cieczy. Opracowana koncepcja została zaimplementowana w oprogramowaniu komercyjnym ANSYS Fluent. Łączy ona dostępne w tym oprogramowaniu modele obliczeniowe (model przepływu turbulentnego z wymianą ciepła oraz model transportu składnika) z modelami analitycznymi (m.in. z korelacjami do wyznaczania współczynników przejmowania ciepła po stronie kondensującej pary i po stronie czynnika odprowadzającego ciepło oraz z modelami bilansowymi) za pomocą interfejsu customizacji zwanego potocznie UDF-em. Opracowaną koncepcję zastosowano do obliczeń dwóch typów wymienników ciepła: skraplacza zastosowanego w oryginalnym i zmodyfikowanym okapie kondensacyjnym z przepływem pary przez pęczek rur i z powietrzem płynącym przez uźebrowane wewnętrznie rurki oraz skraplacza zastosowanego w nowej konstrukcji okapu kondensacyjnego z parą płynącą przez rurki i powietrzem przepływającym przez pęczek oźebrowanych rur. Opracowana koncepcja ma uniwersalny charakter i może być zastosowana również do modelowania innych urządzeń i procesów, w których występuje kondensacja z cienkim filmem cieczy lub pochłanianie par różnych czynników.
- Teoretyczne badania pracy okapów kondensacyjnych i ich elementów, w ramach których opracowano metodykę badań i dedykowane autorskie modele obliczeniowe dla dwóch okapów kondensacyjnych oraz dla wymiennika ciepła w nowej konstrukcji okapu kondensacyjnego. Zaproponowane modele okapów zaimplementowano w programowaniu komercyjnym ANSYS Fluent i bazowały na podziale obszaru obliczeń (geometrii okapu kondensacyjnego) na trzy strefy, które były ze sobą sprzężone za pomocą funkcji użytkownika (UDF-ów) oraz na autorskim modelu numerycznym procesu kondensacji pary wodnej z mieszaniny pary i gazu

nieskrapającego się. Elementy nowości naukowej zawierają również zaprezentowane w pracy wyniki przeprowadzonych analiz obliczeniowych pracy badanych urządzeń, które pozwalają lepiej zrozumieć zasadę ich działania oraz zachodzące w nich zjawiska ciepłno-przepływowe. Podobne modele i analizy pracy okapów kondensacyjnych nie były do tej pory opisane w literaturze.

- Eksperymentalne badania pracy okapów kondensacyjnych oraz metoda określania wydatku masowego pary docierającej do okapu z pieca konwekcyjno-parowego i wydatku kondensatu bazująca na równaniach bilansowych. Podobnie jak analizy obliczeniowe, badania eksperymentalne okapów kondensacyjnych nie zostały do tej pory opisane w literaturze. Zatem przeprowadzone badania wnoszą wkład poznawczy w zakresie zjawisk ciepłno-przepływowych zachodzących w tych urządzeniach.
- Opracowanie nowej zoptymalizowanej konstrukcji okapu kondensacyjnego z zastosowaniem metody obliczeniowej mechaniki płynów oraz wymiany ciepła. Konstrukcja ta bazowała na nowym wymienniku ciepła, w którym mieszanina pary i powietrza przepływała i kondensowała wewnątrz rurek wymiennika ciepła, natomiast chłodne powietrze zewnętrzne omywało ożebrowane rurki ułożone w pęczek. Nowa konstrukcja charakteryzowała się znacznie lepszą efektywnością kondensacji, a zarazem prostszą konstrukcją, której wytworzenie wymagało mniej materiałów, energii i pracy.

#### **4. Wartości użytkowe rozprawy**

Praca doktorska została wykonana w ramach realizacji projektu badawczo-rozwojowego nr POIR.03.02.01-18-0019/15-00 pt.: Wdrożenie do produkcji nowej generacji pochłaniaczy pary do pieców konwekcyjno-parowych, który był finansowany przez Polską Agencję Rozwoju Przedsiębiorczości. Opisane w ramach pracy modele i wyniki analiz zostały wykorzystane do opracowania dwóch prototypów okapu kondensacyjnego (jeden ze zmodyfikowanym skraplaczem, a drugi z nową konstrukcją skraplacza). Zgodnie z informacjami zawartymi w pracy część uzyskanych wyników została wdrożona przez firmę Retech Sp. z o. o. Firma ta opracowała na bazie uzyskanych w pracy rezultatów dwie konstrukcje okapu kondensacyjnego inspirowane nową konstrukcją zaproponowaną w szóstym rozdziale i wdrożyła je do produkcji. Ponadto, opracowana koncepcja modelu procesu kondensacji pary wodnej z mieszaniny pary i gazu nieskrapającego się ma szeroki potencjał aplikacyjny. Może być zastosowana do projektowania i optymalizacji innych urządzeń i procesów, w których występuje kondensacja z cienkim filmem cieczy lub pochłanianie par różnych czynników.

#### **5. Uwagi merytoryczne**

Po przeczytaniu rozprawy doktorskiej nasunęły mi się następujące uwagi, pytania i komentarze natury merytorycznej:

##### **Uwagi ogólne**

- W wielu miejscach pracy przedstawione opisy nie są jasne, m.in. brakuje: szczegółowego opisu matematycznego analizowanego procesu i zjawisk, szczegółów dotyczących modeli obliczeniowych czy sposobów implementacji modeli w środowisku ANSYS Fluent, informacji o przyjętych założeniach, itd. Niektóre fragmenty rozprawy wyjaśniają się dopiero po przeczytaniu dalszych jej części lub całej pracy.

## Rozdział 1

- Przegląd literatury jest dość powierzchowny. Skupiono się w nim na problemie modelowania i badań eksperymentalnych zjawisk i procesów składowych, które występują w okapach kondensacyjnych. W odniesieniu do przytoczonych prac brakuje głębszej i szerszej analizy pod kątem stosowanych metod eksperymentalnych i obliczeniowych. W szczególności nie podano informacji o opracowanych modelach z uwzględnieniem stosowanych technik i metod numerycznych oraz o ich walidacji i uzyskanej dokładności przewidywań. Nie przedyskutowano przydatności opracowanych modeli w procesie projektowania mając na uwadze poprawność przewidywanych wyników obliczeń.

## Rozdział 4

- W równaniu 4.5 jest symbol, który nie został opisany ( $\dot{m}_{\text{cond,IV,ad}}$ ). Ponadto nie jest jasne co oznacza „additional condensate flow rate”, o którym wspomniano w opisie pod równaniem oraz co oznacza symbol  $\dot{m}_{\text{cond,III,ad}}$ .
- Proszę o wyjaśnienie skąd w równaniu 4.10 wzięła się liczba 100.
- Proszę wyjaśnić jak był mierzony wydatek wody zasilającej generator pary i moc generatora.
- Co jest rozumiane przez „semi-steady state”?
- Jakie przyjęto założenia do oszacowania strat konwekcyjnych z powierzchni „V” okapu kondensacyjnego?
- W jaki sposób szacowano wydatek związany z kompensacją kondensatu?
- Czy w trakcie pomiarów nie można było zastosować innych konstrukcji elementu łączącego piec konwekcyjno-parowy z okapem kondensacyjnym takich, które uniemożliwiałyby spływanie kondensatu do pieca?
- Czy sprawdzono ilościowo jaka część kondensatu spływała do pieca?
- Przeprowadzone pomiary eksperymentalne były dość proste koncepcyjnie i zostały wykonane przy pomocy standardowych metod. Niestety nie zmierzono problematycznych wydatków, tj. wydatku pary doprowadzonej do okapu kondensacyjnego oraz wydatku kondensatu. Wielkości te zostały dopasowane przy użyciu modelu bilansowego. Pomimo że taka metodyka jest poprawna, należało ją zwalidować eksperymentalnie. Szczególnie istotne wydaje się zmierzenie wydatku pary w trakcie pracy okapu z piecem. Brak takich pomiarów nie może być uzasadniony złożoną budową oraz zaawansowanymi funkcjami i automatyką pieca. Pomiar tych wydatków jest istotny, ponieważ wielkości korekcji wydatków masowych pary i kondensatu były duże i w kilku przypadkach były wielokrotnością wielkości wyznaczonych z bilansu masy. Dlaczego do pomiaru wydatku masowego pary nie można było zastosować np. termoanemometru wykalibrowanego na przepływ pary?
- W podrozdziale 4.2 opisano zastosowane czujniki pomiarowe i podano ich dokładności. Niestety nie podano informacji o kalibracji czujników oraz o statystyce pomiarów i analizie błędów pomiarowych. Czy eksperymenty przy tych samych parametrach pracy okapu były wykonywane tylko raz czy były powtarzane kilkukrotnie? Proszę o informacje dotyczące analizy błędów (statystycznej) oraz niepewności pomiarów.

- W jaki sposób określono wartości stałych w modelu ośrodka porowatego? Czy stałe były takie same w kierunku x, y i z? Jakie są jednostki stałych?
- Nie jest jasne w jaki sposób ustalono parametry w warunkach brzegowych symulujących działanie wentylatora.
- Proszę podać więcej informacji na temat pomiaru profilu prędkości wylotowej z wentylatora, który zastosowano w obliczeniach numerycznych.
- W pracy nie przedstawiono modelu matematycznego dla przepływu płynu oraz wymiany ciepła i masy w analizowanym obszarze. Nie podano założeń. Nie ma szczegółowych informacji na temat warunków brzegowych. Opisano jedynie, ale w sposób niejasny, sprzężenia pomiędzy obszarami I, II i III. Proszę przedstawić kompletny model matematyczny analizowanego okapu kondensacyjnego wraz z warunkami brzegowymi i równaniami opisującymi sprzężenia poszczególnych obszarów.
- Proszę podać szczegóły dotyczące implementacji modelu numerycznego i ustawień solwera dotyczące: zastosowanego schematu rozwiązania, schematów dyskretyzacji przestrzennej, sposób wyznaczania gradientów wielkości, zastosowanych współczynników podrelaksacji, itd.
- Proszę podać informacje na temat czasu obliczeń oraz na temat uzyskiwanego poziomu zbieżności równań modelowych.
- Proszę podać szczegóły dotyczące zastosowanego modelu turbulencji:
  - Dlaczego zdecydowano się na model k-epsilon?
  - Czy testowano inne modele turbulencji?
  - Jak modelowano region w pobliżu ścianki?
  - Jakie były wartości  $y^+$  na kluczowych, z punktu widzenia wymiany ciepła, powierzchniach?
- Nie przedstawiono w sposób jasny warunków na granicach między obszarami II i III oraz sposobu sprzęgania obliczeń w obszarze II i III. Podano kilka wzorów, jednak nie opisano jasno sposobu ich wyprowadzenia. W szczególności:
  - Jakie są przesłanki fizyczne uwiarygadniające poprawność modelu wymiany ciepła między powietrzem w rurkach i parą omywającą pęczek?
  - Nie jest jasne jak zamodelowano przepływ powietrza przez perforowane rurki wymiennika ciepła i w jaki sposób wyznaczano wydatek powietrza w rurkach wymiennika. Proszę o wyjaśnienie.
  - Nie jest jasne na jakiej podstawie sformułowano wzór 4.16. Nie wiadomo w jaki sposób wyznaczono współczynniki korekcyjne  $\epsilon_t$  i  $\epsilon_s$  oraz  $Q_{max}$ .
  - Nie jest jasne jak wyznaczano temperaturę powietrza na wyjściu z wymiennika.
  - Nie jest jasne jak wyznaczono opór we wzorze 4.19 oraz co oznacza  $T_{air}$  oraz  $T$ .
  - Nie jest jasne dlaczego we wzorze 4.20 użyto ciepła przemiany fazowej, a nie zmodyfikowanego ciepła przemiany fazowej tak jak we wzorze 4.17.



- Nie jest jasne jaka była procedura sprzęgająca warunek brzegowy na powierzchni rurek w obszarze powietrza i w obszarze pary. Nie wiadomo, czy sprzężenie było dwukierunkowe. Ponadto przedstawione w załącznikach listingi UDF-ów dotyczące sprzężenia obszarów II i III są niejasne. Brakuje opisów poszczególnych fragmentów kodów. W UDF-ach pojawia się wiele współczynników oraz warunków typu if, które nie zostały wyjaśnione. Proszę podać prawidłowy opis sprzężenia obliczeń w obszarach II i III wraz z precyzyjnym wskazaniem jak zostało to sprzężenie zaimplementowane w oprogramowaniu komercyjnym.
  - Nie jest jasne dlaczego na ściankach wymiennika po stronie powietrznej przekazywanie ciepła było modelowane za pomocą makra DEFINE\_SOURCE, a nie za pomocą makra DEFINE\_PROFILE jako warunek brzegowy na ściankach wymiennika dla równań rozwiązywanych po stronie powietrza w obszarze III. Zastosowanie warunku na powierzchni lepiej odzwierciedla fizykę procesu niż zastosowanie członu źródłowego. Jakie są przesłanki przemawiające za użyciem makra DEFINE\_SOURCE? Czy porównywano obie metody modelowania przekazywania ciepła? Czy podobne sprzężenie zastosowano na pozostałych ściankach wymiennika ciepła (np. w obszarze III.A i III.B z rysunku 4.15)?
  - Nie jest jasne jak wyznaczano wydatek kondensatu, czy tylko na podstawie członów źródłowych w komórkach kontaktujących się z rurami, czy również na podstawie członów źródłowych w komórkach kontaktujących się ze ściankami wymiennika. Co w sytuacji jak ta sama komórka siatki stykała się zarówno z obudową wymiennika, jak i ze ścianką rurki?
  - Proszę o informację jak w modelu kondensacji została uwzględniona charakterystyka konwekcyjnej wymiany ciepła po stronie wewnętrznej (po stronie powietrza wewnętrznego) oraz po stronie zewnętrznej (po stronie mieszaniny pary i powietrza).
- Czy siatki w modelowanych podobszarach były spójne w miejscach, w których te podobszary łączyły się?
  - Jaka była jakość siatki (skewness, aspect ratio, orthogonal quality, y+)?
  - Nie jest jasne jaki rozmiar siatki zastosowano do finalnych obliczeń. W pracy pojawiają się niespójności. Najpierw podano, że „The finest mesh was used in the heat exchanger steam side II, where condensation occurs and source terms are applied. This part almost entirely was meshed with the use of a sweep method with orthogonal elements of size up to 5 millimeters.”. Następnie stwierdzono, że „As it was said, the maximum element size in part (II), where the condensation process occurs, was up to 5E-6 m, but elements in the inter-pipe space were kept below 1E-7 m just to stay at the plateau mentioned earlier.”
  - W części dotyczącej analizy wyników nie zdefiniowano precyzyjnie warunków dla jakich przeprowadzono obliczenia. Ogólnie podano, że analizowano przypadek A, B i C. Wcześniej jednak w opisie prac eksperymentalnych dla każdego z przypadków rozważano kilka wariantów pracy okapu (A1, A2 itd.). W końcowych fragmentach podrozdziału dotyczącego prezentacji wyników podano informacje na temat warunków symulacji. Jednak nie jest jasne dla jakich trybów pracy przeprowadzono analizy. Proszę o precyzyjne wskazanie, przy jakich warunkach pracy okapu kondensacyjnego przeprowadzono obliczenia.



- Na rysunkach 4.21 i 4.22 struktura przepływu w obszarze pary (III) jest słabo widoczna. Kontury są zdominowane przez duże wartości prędkości w obszarze II. Warto byłoby zawęzić obszar analizy tylko do obszaru między rurkami.
- Proszę wyjaśnić dlaczego w symulacjach nie przyjęto takich samych wartości parametru  $\phi_{in}$  jak w eksperymentach. Domyślam się, że chodzi o wilgotność względną powietrza na wlotach. Symbol  $\phi_{in}$  nie został zdefiniowany.
- Dokonano porównania efektywności kondensacji oraz rozkładów temperatury w wybranych punktach układu. Przy czym rozmieszczenie punktów pomiarowych, w których były rejestrowane temperatury termoparami podano na samym końcu podrozdziału z wynikami. Takie informacje należało zamieścić w rozdziale „4.2.2 Measurement methodology”. Ponadto na rysunku 4.31 dla lepszej czytelności termopary powinny być oznaczone jako punkty.

### Rozdział 5

- W pracy stwierdzono, że „Data for validation was provided by the original construction measurements, and once the validation of the modified model was successful, a prototype has been built and tested in the mentioned above cases.” Ten fragment jest niejasny. Proszę wyjaśnić jak została przeprowadzona walidacja zmodyfikowanego modelu. Proszę przedstawić ilościowe wyniki przeprowadzonej walidacji.
- Czy testowano ustawienie pierwszej przegrody za drugim rzędem rur? Jak taka modyfikacja wpłynęłaby na pracę wymiennika?
- Na czym polegały problemy z przeprowadzeniem pomiarów eksperymentalnych dla zmodyfikowanej konstrukcji dla przypadku C?

### Rozdział 6

- Proszę wyjaśnić na czym polegała optymalizacja przewodnic powietrza zastosowanych w nowym wymienniku ciepła.
- Proszę wyjaśnić stwierdzenie: „The decision to neglect the slopes also enabled the use of correlations for convective heat transfer for the in-line bundle configuration.”. W jakim celu zastosowano te korelacje i dlaczego nie mogły być zastosowane przy małym pochyleniu rurek?
- Jaki był kształt i wysokość żeber zamocowanych na rurkach po stronie zewnętrznej?
- Na jakiej podstawie stwierdzono, że w rurkach z mieszaniną pary i powietrza występuje przepływ turbulentny a nie laminarny?
- W jaki sposób określano temperaturę ścianki rurki ( $T_{pipe,wall}$ ) w równaniu 6.4?
- W jaki sposób określono maksymalną prędkość przepływu powietrza przez pęczek rur?
- Jakie przyjęto wartości stałych A, b, c i F, które występowały w równaniach 6.8 i 6.13?
- Na jakiej podstawie przyjęto współczynnik korekcyjny ( $\epsilon_h$ ) uwzględniający obecność żeber?
- Przy wyznaczaniu ciepła wymianianego na drodze konwekcji z reguły we wzorach na liczbę Nusselta przyjmuje się temperatury z dala od ścianek lub jako średnią w

pęczku/kanale. Dlaczego we wzorze 6.16 przyjęto temperaturę  $T_{air,out}$  jako średnią temperaturę powietrza między żebrami, a nie średnią dla pęczka rur?

- Czy w opracowanym modelu uwzględniono w równaniach pędu występowanie żeber na powierzchniach zewnętrznych rur w wymienniku poprzez zastosowanie w tym obszarze modelu ośrodka porowatego?
- Jakie były parametry jakości siatki (skewness, aspect ratio, orthogonal quality,  $y^+$ )?
- Jakie były powody nieprzeprowadzenia badań nowej konstrukcji w kombinacji z piecem konwekcyjno-parowym?
- W tabeli 6.3 wilgotności względne na wejściu do okapu kondensacyjnego przyjęta w modelu i zmierzona na stanowisku eksperymentalnym różnią się. Dlaczego w modelu obliczeniowym nie zadano takich samych parametrów powietrza na wejściu jak zmierzono eksperymentalnie?
- Dlaczego w nowej konstrukcji nie porównano temperatur w wybranych punktach wymiennika tak, jak zrobiono to dla oryginalnej i zmodyfikowanej konstrukcji?

## 6. Uwagi edycyjne

Rozprawa została napisana w języku angielskim. Styl wypowiedzi jest poprawny typowy dla opracowań naukowych. Układ pracy jest czytelny. Cele rozprawy, jej zakres oraz osiągnięcia naukowe są opisane właściwie. Niestety strona edycyjna budzi zastrzeżenia. Wiele fragmentów jest niejasnych, stosowane równania/modele nie zostały właściwie wyjaśnione albo wyjaśnienia można znaleźć w dalszych fragmentach pracy, a nie w chwili wprowadzenia równania/modelu, nie podano założeń do przyjętych modeli, nie wyjaśniono precyzyjnie implementacji numerycznych, itd. Błędy te nie wpływają na wartość naukową rozprawy, ale znacznie obniżają jej walory estetyczne. Czytając pracę znalazłem wiele błędów redakcyjnych, które są zamieszczone poniżej.

- Załączniki z UDF-ami nie zawierają komentarzy, zatem bardzo trudno analizuje się kody numeryczne.
- W pracy są stosowane jednostki J (W) oraz kJ (kW), zatem jest brak spójności stosowanych jednostek. Autor powinien zdecydować się na jeden format jednostek. Na przykład ciepło właściwe w spisie oznaczeń ma jednostkę kJ/(kg K), a na stronie 46 podano jednostkę J/(kg K).
- Odwołania do literatury powinny być uprządkowane w kolejności występowania w tekście.
- Styl literatury nie jest spójny. Na przykład czasem stosowano skrót imienia (imion), a czasem imię nie było skrócone, skróty imienia (imion) były przed i po nazwisku, stosowano skrót drugiego imienia, a pierwsze nie było skracane. W niektórych pozycjach podawano odwołanie do strony z artykułem, a w niektórych nie podano takich informacji.
- Niektóre odwołania do literatury zostały niepoprawnie zapisane, np. na stronie 13 jest: „For instance, Jiqiang Su [38] with...”, a powinno być „For instance, Su et al. [38] with...”. Podobnie w wielu innych przypadkach podawano tylko pierwszego autora w odwołaniu oraz jego imię (lub pierwszą literę imienia) i nazwisko.
- Brakuje danych bibliograficznych w niektórych pozycjach (np.: w pozycjach [44, 45 i 47]).

- Błędnie używano sformułowania „Velocity profile”, „Velicity”, „Velicity field” itd. w odniesieniu do rysunków zatytułowanych „Velocity field”. Rysunki te zawierały mapy konturowe modułu prędkości w wybranych przekrojach, a nie pola prędkości.
- Prawidłowa pisownia nazwy użytego oprogramowania komercyjnego to „ANSYS Fluent”, a nie „Ansys Fluent”, „Ansys-Fluent” lub „Fluent”.
- Równania i opis matematyczny były prezentowane w sposób niespójny. Na przykład kilkakrotnie powtarzano równania opisujące wydatek kondensatu (równanie 4.17 i 6.19). Z drugiej strony przy pierwszym pojawieniu się wielkości  $h_{fg}^*$  (w równaniu 4.17) nie podano sposobu jej wyznaczania. Gdy ponownie wielkość ta pojawiła się w równaniu 6.19, podano również wzór służący do jej wyznaczenia (równanie 6.20). Podobne niespójności zauważyłem w przypadku innych równań.
- Strona 8: symbol  $h$ , oznaczający konwekcyjny współczynnik wymiany ciepła powinien znajdować się na liście symboli łacińskich.
- W „Nomenclature” wprowadzono dwa symbole oznaczające podobne wielkości, tj. podkreślenie, które oznacza „mean value” oraz indeks dolny „av”, który oznacza „average”, czyli średnią wartość. Wystarczy jeden sposób do oznaczania średniej.
- Skrót „L & P”, który oznacza „Left & Right” powinien być oznaczony „L & R”.
- Skrót CFD nie znajduje się na liście skrótów.
- Strona 13: zdanie „Due to a combination of frictional, momentum and gravitational effects and excessive pressure drop may significantly affect the heat exchanger’s output.” nie jest stylistycznie poprawne i jest niezrozumiałe.
- Podpis rysunku 3.1: cyfry rzymskie nie są wypisane po kolei. Ponadto niepotrzebnie zastosowano kropki po numerach wypunktowań.
- Podpis rysunku 4.1: nie wszystkie rysunki składowe zostały opisane. Ogólnie rysunek jest mało czytelny.
- W spisie oznaczeń użyto pochylonych symboli, natomiast w tekście, np. na stronie 23 symbole nie były pochylone.
- Strona 25: brakuje przecinka przed „respectively” we fragmencie „...inlet and outlet respectively...”.
- Równania 4.2 nie są wprowadzone poprawnie do tekstu. Podobnie równanie 4.9, 4.11, 6.1 i inne. Te równania pojawiają się w tekście bez zdania wprowadzającego.
- Strona 26: nie jest zrozumiałe stwierdzenie „The same equations apply to the outlet air (point II) as well.”, ponieważ równania 4.1-4.4 podano dla wlotu I i wylotu II.
- Strona 26: pierwsze odwołanie do równania 4.5 powinno być po jego wprowadzeniu w tekście, a nie przed.
- Na liście oznaczeń powinien znaleźć się symbol  $h_{fg}$ , oznaczający ciepło parowania.
- Strona 27: w opisach symboli występujących w równaniu 4.8  $c_{p,a}$  i  $c_{p,steam}$  to ciepła właściwe przy stałym ciśnieniu, a nie ciepła właściwe.
- W równaniu 4.10 powinno zostać użyte oznaczenie  $c_{water}$  zamiast  $c_{p,water}$ . Symbol  $c_p$  sugeruje, że jest to ciepło właściwe przy stałym ciśnieniu. Takie oznaczenia stosuje się w przypadku gazów.



- Indeksy dolne „amb” i „th”, które występują w równaniu 4.11 nie zostały wyjaśnione w spisie oznaczeń. Ponadto w opisie wielkości pod równaniem nie wyjaśniono symbolu  $T_{amb}$ .
- Podpis rysunku 4.6: przed „a)” powinien być dwukropek zamiast kropki.
- Podpis rysunku 4.8: punkty d i e są niewłaściwie opisane, a na rysunku brakuje punktu e.
- Strona 32: brakuje spacji w „Eq.(4.9)”. Podobnie w przypadku odwołań do innych równań.
- Strona 32 i 33: fragment „In Figure 4.9 temperatures in the steam inlets are presented. In other words: at the combi steamer outlet and condensation hood inlet.” jest powtórzeniem z wcześniejszego akapitu.
- Tabela 4.1: nie podano jednostek.
- Odwołanie do tabeli 4.5 jest wcześniej niż odwołanie do tabeli 4.4.
- Strona 37: nawias we fragmencie „...(Table 4.3,...” nie został zamknięty.
- Strona 39: we fragmencie „...to figure 4.8...” słowo „figure” powinno być napisane z wielkiej litery. W pracy odwołania do rysunków były oznaczane „Figure”.
- Strona 40: brakuje spacji w „...not exceed3% so...”.
- Podpis rysunku 4.12: brakuje spacji w „part1”.
- Strona 42: nie wyjaśniono co oznacza „proportionality coefficient”. Wielkość ta ponownie została użyta w szóstym rozdziale w równaniach 6.1 i 6.2 i wtedy została wyjaśniona. W pracach naukowych, wszystkie symbole i wielkości powinny być wyjaśnione przy pierwszym wystąpieniu w tekście.
- W tekście rozprawy nie ma odwołania do tabeli 4.6.
- Strona 46: zdanie „Air temperature increase due to fan’s work is negligible, so temperature at the fan outlet is the same as at the fan inlet.” jest niezrozumiałe. Temperatura powietrza na wyjściu z wentylatora była wyznaczona na podstawie bilansu energii (równanie 4.14).
- Strona 46: brak spacji w „...ratio,(kg...” .
- Strona 46, pierwsze zdanie w ostatnim akapicie: nie wiadomo do czego odnosi się opis, brak odwołania do właściwego rysunku.
- Symbol  $w_{H_2O}$  ze wzoru 4.16 nie jest opisany w spisie oznaczeń.
- Wielkość  $\beta$ , która pojawia się na rysunku 4.15 i na stronie 49 nie została wyjaśniona.
- Strona 49: błąd ortograficzny w „...MODified...”.
- Strona 60: błąd edycyjny w „...(j306 K)...”.
- Strona 60: opis „Numerically obtained temperature distribution is presented in Figure 4.26.” nie jest precyzyjny. Nie podano w jakiej płaszczyźnie pokazano wyniki.
- W tekście pracy nie ma odwołania do rysunku 4.27.

- Strona 64: zdanie „Both designs have been examined...” nie jest jasne, ponieważ nie wiadomo o jakie dwa rozwiązania chodzi. W czwartym rozdziale przedstawiono tylko jedną konstrukcję okapu kondensacyjnego.
- Strona 68: fragment „Case B is characterized by the highest steam flow rate (about ten times the nominal one).” to niepotrzebne powtórzenie. Wspomniano o tym dwa akapity wcześniej.
- Co oznacza symbol „ $\phi_{in}$ ” w tabeli 4.7?
- Tabela 4.7: błąd edycyjny, niepotrzebny odstęp pomiędzy kropką i cyfrą w „98. 1”.
- Rysunki 5.4-5.9 są mało czytelne.
- Strona 82: nieprawidłowe odniesienie do rysunków we fragmentach: „Figures 5.13 to 5.12...”, „...Figures 5.4-5.4...” oraz „In case C, presented in Figure 5.13...” . Rysunek 5.13 przedstawia przypadek A.
- Strona 87: w wyrażeniu „Steam flow rate  $\dot{m}_{cond}$  decreased...” powinno być „Condensate mass flow rate  $\dot{m}_{cond}$  decreased...”
- Strona 93: zdanie „On the left-hand side of Figure 6.1 is an original design for a CH is presented.” nie jest stylistycznie poprawne i jest niezrozumiałe.
- Strona 103: w zdaniu „The CFD solution for the air within the interpipe space SIMPLE scheme was used as a pressure-velocity coupling” jest błąd stylistyczny.
- Symbole występujące w równaniu 6.4 i 6.5 nie zostały opisane w spisie oznaczeń. Podobnie w przypadku innych równań w szóstym rozdziale.
- W równaniu 6.4 jest symbol „ $C_{p,cond}$ ”, który powinien być napisany z małej litery oraz bez indeksu „p” sugerującego ciepło właściwe przy stałym ciśnieniu. Podobnie w równaniach 6.20 i 6.21.
- Strona 104: błąd ortograficzny w „vapourisation”.
- Brak odwołania do załącznika D w tekście pracy.
- Strona 111: drugi akapit jest częściowym powtórzeniem informacji podanych na stronie 33 i 34. Podobnie czwarty akapit na tej samej stronie.
- Strona 120: zamiast „B” powinno być „B\*”, zamiast „30kW” powinno być „27kW”.
- Strona 123: błąd ortograficzny w „walidated”.
- Strona 161: błąd edycyjny w „...( $\pm 1$  m/s)...”.

## 7. Wnioski końcowe

Oceniana rozprawa doktorska zawiera elementy nowości naukowej i wnosi wkład poznawczy w obszarze: wielowymiarowego modelowania numerycznego procesów kondensacji pary z mieszaniny pary i gazu nieskrapalającego się przy występowaniu cienkiego filmu cieczy, modelowania cieplno-przepływowego okapów kondensacyjnych oraz ich badań numerycznych i eksperymentalnych. Doktorant wykazał się umiejętnością sformułowania problemów badawczych oraz ich rozwiązania przy użyciu właściwych metod wymiany ciepła i termodynamiki, jak również technik obliczeniowej mechaniki płynów i wymiany ciepła. Zatem Doktorant opanował warsztat pracy naukowej w zakresie badań teoretycznych z zastosowaniem modelowania numerycznego oraz badań eksperymentalnych. Rozprawa

doktorska ma również istotne walory użytkowe, ponieważ zaprezentowane w niej modele obliczeniowe oraz uzyskane wyniki posłużyły do opracowania nowej konstrukcji okapu kondensacyjnego, która została wdrożona na rynek przez firmę Retech Sp. z o. o. Tematyka rozprawy doktorskiej wpisuje się w dyscyplinę Inżynierii Środowiska Górniczego i Energetyki. Na uwagę zasługuje fakt, że częściowe rezultaty przedstawione w rozprawie doktorskiej zostały opublikowane w trzech artykułach, w tym w dwóch indeksowanych w bazie Web of Science Core Collection, w których Pan mgr inż. Mieszko Tokarski jest pierwszym autorem.

Podsumowując: rozprawa doktorska Pana mgra inż. Mieszka Tokarskiego pt.: Computational and experimental analysis of a condensation hood spełnia wymagania stawiane przez obowiązującą Ustawę o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki. W oparciu o powyższe wnioskuje o dopuszczenie jej do publicznej obrony.

*Mieszko Tokarski*