

## RECENZJA

rozprawy doktorskiej mgr inż. Agnieszki Ochman pt.:  
**„Intensyfikacja procesów cieplnych w wymiennikach poprzez modyfikację kształtu powierzchni czynnych”**

### 1. Podstawa formalna

Recenzja ww. rozprawy doktorskiej została wykonana na pisemne zlecenie Zastępcy Przewodniczącego Rady Dyscypliny Naukowej Inżynieria Środowiska, Górnictwo i Energetyka dr. hab. inż. Bartosza Zajączkowskiego, prof. uczelni, z dnia 16 marca 2023 r. (zgodnie z pismem L.dz. W9/PW/187/2023) oraz na podstawie Uchwały nr 607/28/RDND08/2021-2024 Rady Dyscypliny Naukowej Inżynieria Środowiska, Górnictwo i Energetyka z dnia 15 marca 2023 r. w sprawie wyznaczenia recenzentów w przewodzie doktorskim Pani mgr inż. Agnieszki Ochman.

Opracowanie wykonano zgodnie z wymogami art. 13 tekstu Ustawy z dnia 14 marca 2003 roku o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki (Dz.U. Nr 65, poz.595 z późn. zm.).

### 2. Uzasadnienie podjęcia badań

Wymiana ciepła, z którą mamy do czynienia w wielu gałęziach przemysłu, wymaga stosowania m.in. wysokosprawnych i wydajnych wymienników ciepła, które obniżą koszt produkcji i eksploatacji urządzeń. Zwiększenie sprawności wymienników można osiągnąć na wiele sposobów, poprzez zastosowanie pasywnych i aktywnych technologii intensyfikacji wymiany ciepła. W recenzowanej dysertacji podjęto temat związany z wpływem zastosowania turbulizatorów na procesy cieplno-przepływowe w wymiennikach ciepła, zatem podjęta tematyka badań jest uzasadniona z punktu widzenia poznawczego i praktycznego.

### 3. Ocena merytoryczna pracy

#### Ogólny opis pracy

Tekst rozprawy doktorskiej Pani mgr inż. Agnieszki Ochman liczy 110 stron, przy czym zasadnicza część pracy wraz z bibliografią, spisem rysunków (65 plus 11 w załącznikach – łącznie 76) i spisem tabel (12 plus 2 w załącznikach – łącznie 14) to 99 strony. Kolejne strony (od 100 do 110) to załączniki pracy, które zostały opisane jako Dodatek A, Dodatek B,

Dodatek C, Dodatek D i Dodatek E.

Pierwsze strony pracy doktorskiej to: strona tytułowa, wymagane streszczenia w języku polskim i angielskim oraz podziękowania. „Spis treści” zawierają strony 4, 5 i 6. Następnie na trzech kolejnych stronach Autorka podała „Wykaz ważniejszych oznaczeń” użytych w tekście rozprawy, z podziałem na zastosowane symbole greckie, użyte skróty oraz indeksy dolne. Struktura podziału pracy doktorskiej na rozdziały jest w miarę poprawna (odnosząc się do tego w dalszej części recenzji).

Zasadnicza część pracy to sześć numerowanych rozdziałów oraz kolejne nienumerowane rozdziały nazwane „Bibliografia” oraz „Spis rysunków” i „Spis tablic”.

### Szczegółowe omówienie pracy

Zasadnicza część pracy rozpoczyna się Rozdziałem 1 „Wstęp”. Zaprezentowano w nim, w sposób tabelaryczny, ograniczenia oraz proponowane rozwiązania, które zastosowano w trakcie analiz procesów cieplno-przepływowych zachodzących wzdłuż powierzchni ogrzewanej wyposażonej w turbulizatory, jak również podano cel pracy (jakim jest analiza wpływu geometrii turbulizatorów na procesy intensyfikacji wymiany ciepła z powierzchni czynnej wymiennika w kontekście zwiększenia lokalnego współczynnika przejmowania ciepła), tezę (zastosowanie turbulizatorów powoduje lokalne zmiany struktury przepływu, co skutkuje zwiększeniem współczynnika przejmowania ciepła) oraz cele pomocnicze, jakim było określenie na podstawie studiów literaturowych geometrii turbulizatorów, ich ustawienia, kąta natarcia i pochylenia; zaprojektowanie oraz wykonanie stanowiska badawczego, umożliwiającego uzyskanie jednorodnego profilu prędkości na wlocie do sekcji badawczej; przeprowadzenie badań eksperymentalnych dla różnych geometrii turbulizatorów oraz prędkości przepływu czynnika roboczego; opracowanie modelu numerycznego procesu oraz jego walidacja za pomocą wyników eksperymentalnych; analiza otrzymanych wyników za pomocą wybranych parametrów cieplnych oraz liczb bezwymiarowych, w celu potwierdzenia intensyfikacji procesów cieplnych po zastosowaniu turbulizatorów.

### Uwagi do rozdziału 1:

- 1) Moim zdaniem treść tego rozdziału powinna wystąpić w dysertacji po szczegółowym przeglądzie literatury, a nie – jak jest w tym przypadku – przed tym rozdziałem pracy.
- 2) Słowo „cieplno-przepływowych” (czwarty i siódmy wiersz od góry oraz dziewiąty wiersz od dołu na s.10) – nazwa składająca się z członów równorzędnych – powinna być połączona *łącznikiem*, a nie *myślnikiem*. Przypomnę tylko, że łącznik to krótka kreska (-) łącząca dwa wyrazy, a pomiędzy tymi wyrazami a łącznikiem nie powinno być spacji (przerwy). Myślnik natomiast to znak interpunkcyjny, który dzieli zdania na mniejsze części lub rozpoczyna wypowiedź. Jest to długa kreska (–), którą oddziela się spacjami od sąsiadujących wyrazów.

Niepoprawne zapisy pojawiają się również na innych stronach pracy (trzeci wiersz od góry oraz czwarty wiersz od dołu na s.1; pierwszy wiersz od dołu na s.17; piąty, ósmy oraz trzynasty wiersz od góry na s.18; pierwszy wiersz od dołu na s.18; piętnasty wiersz od góry na s.20; 12 wiersz od dołu na s.22; czwarty wiersz od góry na s.24; trzeci wiersz od dołu na s.61; ósmy wiersz od dołu na s.63; dziesiąty i dwunasty wiersz od dołu na

- s.66; dziewiąty wiersz od dołu na s.68; czternasty wiersz od góry na s.71; dziesiąty wiersz od dołu na s.83; ósmy wiersz od góry na s.85; dziewiąty wiersz od góry na s.87).
- 3) Zastosowane wyrażenie „przy pomocy” (w czwartym punkcie *Cele pomocnicze*) powinno być zastąpione „za pomocą”, gdyż „przy pomocy” łączy się TYLKO z rzeczownikami osobowymi, co tutaj nie ma miejsca.  
Identyczne błędne użycie tego wyrażenia występuje na s.35 (czternasty wiersz od góry) oraz na s.66 (piętnasty wiersz od góry).
- 4) Czy konieczne było wprowadzenie i stosowanie nazwy stanowiska badawczego „Tunel powietrzny”? Ja nie widzę takiej konieczności.

**W rozdziale 2** Autorka omówiła najważniejsze zagadnienia związane z wymianą ciepła przy powierzchni płaskiej – wymiany ciepła na drodze konwekcji, wpływu zjawisk zachodzących w warstwie przyściennej powstającej na styku ogrzewanej powierzchni płaskiej oraz omywającego ją płynu (powstawanie hydrodynamicznej i termicznej warstwy przyściennej), wpływ liczby Prandtla na termiczną i hydrodynamiczną warstwę przyściennej; wpływ grubości warstwy przyściennej na współczynnik wnikania ciepła; zagadnienia przewodzenia ciepła w warstwie przyściennej, które powiązane z przekazywaniem ciepła na drodze konwekcji pozwoliło na wyznaczenie współczynnika wnikania ciepła  $\alpha_f$ .

W rozdziale tym odniesiono się również do bezwymiarowych liczb podobieństwa charakteryzujących wymianę ciepła, a więc liczby Nusselta (Nu) oraz liczby Stanton (St), podając, że w pracy zdecydowano się przeanalizować procesy cieplne za pomocą liczby St, co jest słuszne, gdyż częściej stosowana jest podczas analiz konwekcji wymuszonej (uwzględnia wpływ prędkości przepływu strugi na procesy wymiany ciepła) oraz lepiej opisuje związek pomiędzy zjawiskami wymiany ciepła i wymiany pędu.

W podrozdziale *Metody intensyfikacji wymiany ciepła w wymiennikach* Doktorantka wykazała, że wymienniki ciepła stosowane są w wielu gałęziach przemysłu, a wymóg stosowania technologii przyjaznych środowisku i efektywnych energetycznie, redukcja kosztów produkcji i eksploatacji urządzeń oraz miniaturyzacja wymienników ciepła są wyzwaniem dla współczesnej inżynierii. Zwiększanie sprawności wymienników ciepła może być osiągnięte przez stosowanie pasywnych i aktywnych technologii intensyfikacji wymiany ciepła – występuje zestawienie tabelaryczne (tabela 2.1.).

W końcowej części rozdziału podano, że w dysertacji podjęty będzie temat związany z wpływem zastosowania turbulizatorów na procesy cieplno-przepływowe w wymiennikach ciepła.

#### Uwagi do rozdziału 2:

- 1) Informację nt. wyboru przyjęcia w pracy (analiza procesów cieplnych) liczby Stanton (s.16) podano w taki sposób, że można mieć wrażenie, że liczby Stanton opisane równaniem (2.7) i (2.11) są „różne”, a one są tożsame. Lepiej byłoby użyć sformułowania „W niniejszej pracy postanowiono przeanalizować procesy cieplne za pomocą liczby Stanton – równanie (2.7), które możemy przekształcić do postaci zależności (2.11), wykorzystując (2.8), (2.9) i (2.10):”.
- 2) Słowo „hydromechaniczno-termicznej” (czwarty wiersz od dołu s.16) – nazwa

- składająca się z członów równorzędnych – powinno być połączone *łącznikiem*, a pomiędzy tymi wyrazami a łącznikiem nie powinno być spacji (przerwy).
- 3) We wzorze (2.3) w indeksie dolnym termicznej warstwy przyściennej powinna być wielka litera *T* (jest małe *t*).
  - 4) Za zależnością (2.1) opis wszystkich wymienionych wielkości we wzorze powinien być poprzedzony myślnikiem (–), długą kreską (jest krótka).
  - 5) Według mnie zbyt ubogie odwołanie do pozycji literaturowych występujących w dziesiątym i dwunastym wierszu od góry oraz drugim wiersz od dołu, s.17.
  - 6) Uwaga techniczna – likwidacja pustej linii w kolumnie *Systemy aktywne* (tabela 2.1.).

**Rozdział 3** przedstawia aktualny stan wiedzy o turbulizatorach – Doktorantka dokonała przeglądu literatury z którego wynika, że pierwsze wzmianki o ich stosowaniu pochodzą z lat siedemdziesiątych i osiemdziesiątych XX wieku. Początkowo w badaniach nacisk położono na analizę wpływu wirów na procesy cieplno-przepływowe oraz znalezienie modyfikacji powierzchni płyty, których konsekwencją będzie polepszenie procesów wymiany ciepła pomiędzy nagrzanymi płytami, a omywającym je płynem. Kolejnym etapem (od lat dziewięćdziesiątych XX wieku do obecnych) było pojawianie się prac mających na celu analizę wpływu różnych modyfikacji powierzchni czynnej na procesy cieplno-przepływowe, gdzie poddawano analizie różne kształty elementów zaburzających przepływ (owalne, sześciennie), typy i grubość warstwy przyściennej powstającej przed zmienioną powierzchnią, lokalizację tych elementów na powierzchni wymiany ciepła, zastosowanie w wymiennikach płytowych i płytowo-rurowych, czy też modelowanie numeryczne, które w połączeniu z rozwojem technologicznym przyczyniło się do opracowywania nowych kształtów turbulizatorów (trapezowe, półpięściennowe, zakrzywione trójkąty i prostokąty, czy też odwołujące się do „formacji lejących ptaków”).

Szczegółowo podano zasadę działania turbulizatorów, zaprezentowano najpopularniejsze ich kształty oraz omówiono ich geometrie. Jak podaje Doktorantka, w zależności od typu turbulizatora, jego położenia w laminarnej warstwie przyściennej, intensyfikacja wymiany ciepła gwałtownie wzrasta w porównaniu do płyty bez turbulizatorów, a różnorodność ich geometrii oraz ustawienia przyczynia się do powstawania silniejszych wirów, co wpływa na osiąganie większych lokalnych współczynników wymiany ciepła. Konkluduje, że na charakter przepływu, wymianę ciepła w wymienniku (z zainstalowanymi turbulizatorami) oraz generowane spadki ciśnienia wpływ mają takie parametry turbulizatora, jak: jego kształt i kąt pochylenia, kąt natarcia, położenie w wymienniku i względem siebie oraz ich ilość. Ustawienie pierwszego turbulizatora ma większy wpływ na wymianę ciepła niż generowanie spadków ciśnienia, gdzie ustawienie kolejnego turbulizatora istotne jest z punktu widzenia zarówno intensyfikacji wymiany ciepła, jak i minimalizacji strat ciśnienia.

W rozdziale tym, na podstawie dokonanego przeglądu literatury, Doktorantka określiła główne wyznaczniki doboru geometrii turbulizatora: proces i koszt jego wykonania, wpływ na wymianę ciepła, generowanie spadków ciśnienia oraz przyjęła, że w swojej pracy badawczej przeanalizuje wpływ turbulizatorów prostokątnych oraz trójkątnych, pełnych oraz z otworami, na procesy cieplno-przepływowe zachodzące wzdłuż ogrzewanej płyty. Zaprezentowała geometrie poddanych analizie turbulizatorów (wysokość, długość), zachowując tutaj najpopularniejsze proporcje pomiędzy tymi wymiarami, które spotykane są

w literaturze przedmiotu (rys. 3.4 i 3.5). Grubość turbulizatorów wynosiła 5 mm i wynikała z ograniczeń technologicznych (druk 3D) oraz montażowych (za pomocą magnesów).

Analizie poddano zestaw trzech turbulizatorów, ustawionych pod kątem  $30^\circ$  do kierunku napływu powietrza i prostopadle do ogrzewanej płaszczyzny, dla dwóch prędkości przepływu strugi powietrza wzdłuż płyty – 0,9 m/s i 3,16 m/s.

#### Uwagi do rozdziału 3:

- 1) W trzecim wierszu od góry (s.18) użyto wyrażenia „badania wpływu zmiany struktury powierzchni **grzanej**” – wg mnie korzystniej byłoby użyć słowa **ogrzewanej**.
- 2) Po wierszach od 8 do 12 „aż się prosi” o przywołanie/podanie literatury związanej z treścią zagadnień w nich poruszanych.
- 3) Czy podczas powoływania się na literaturę przedmiotu ma znaczenie kolejność cytowania? Z cytowania na s.19 (trzeci wiersz od góry), wynika, że chyba ma to znaczenie – jest [26, 28, 2, 18]. Jeżeli nie, to powinna być zastosowana kolejność wg wykazu literatury, czyli [2, 18, 26, 28].
- 4) Na rys.3.1. znajdują się oznaczenia geometrii turbulizatorów, które nie zostały wyjaśnione (nie ma ich również w wykazie ważniejszych oznaczeń). Skoro praca skierowana jest do czytelnika operującego językiem polskim, to należałoby również zadbać o opis w języku polskim (zdaję sobie sprawę, że 99% czytających operuje językiem angielskim, który tutaj został zastosowany, więc zapewne nie ma to większego znaczenia).
- 5) Na rys.3.3. korzystniejsze byłoby użycie oznaczenia kąta natarcia (tutaj  $\theta$ ) oraz kąta pochylenia turbulizatora (tutaj  $\varphi$ ) według podanego w wykazie oznaczeń, czyli kolejno  $\beta$  i  $\gamma$  (patrz s.8).  
Oznaczenie rysunku (a) oraz (b) korzystniej byłoby umieścić w górnej lewej części obu grafik – zastosowane oznaczenie jest nieczytelne.
- 6) W wierszu piątym od góry na s.21 (licząc od podpisu rys.3.3) pojawiła się literówka w nazwisku **Nusselta** (jest **Nuseelta**).
- 7) Z czego wynika użycie w pomiarach dwóch prędkości przepływu strugi powietrza wzdłuż płyty o wartości 0,9 m/s i 3,16 m/s? Czym jest to spowodowane?

**W rozdziale 4** rozprawy, nazwanym „Badania doświadczalne”, Doktorantka dokładnie opisuje zaprojektowane na potrzeby pracy stanowisko pomiarowe składające się z sekcji: wylotowej, badawczej, kształtowania strugi i wyrównywania przepływu oraz zasysania (szczegółowo podano parametry każdej z sekcji, z jakich elementów się składała, odniesiono się do istotnych normatywów, układów pomiarowych – pomiar temperatur, strumienia ciepła, prędkości, ciśnienia, wilgotności powietrza, przepływu czynnika chłodniczego.

W sposób dokładny podano procedurę przeprowadzenia badań eksperymentalnych, w tym etap sprawdzenia poprawnego wykonania i montażu stosowanej dyszy Witoszyńskiego (profilowania prędkości na wlocie i wylocie z sekcji badawczej). Za pomocą aplikacji Boundary Layer App określono wysokość warstwy przyściennej oraz rozkład prędkości przy analizowanej powierzchni i dzięki tym analizom oszacowano grubość warstwy przyściennej

w miejscu mocowania turbulizatorów (dla prędkości strugi 0,9 m/s grubość ta wyniosła 7 mm, dla prędkości 3,16 m/s około 3,6 mm).

Przeprowadzono również bilansowanie cieplne płyty – uwzględnienie strat radiacji podczas szacowania strumienia ciepła, przekazywanego od płyty do powietrza, pozwoliło na pominięcie analizy procesów radiacyjnych w trakcie modelowania numerycznego, co uprościło model oraz przyspieszyło obliczenia.

Jednym z ciekawych rozwiązań w pracy było zastosowanie, do analizy procesów zachodzących na ogrzewanej płycie wyposażonej w turbulizatory, kamery termowizyjnej. Wyczerpująco podano informację nt. sprzętu, jak również jego wykorzystania oraz określenia istotnych parametrów początkowych, jak: emisyjność, temp. odbitego promieniowania podczerwonego RTC, wilgotność, temperaturę otoczenia. Na potrzeby pomiaru wyznaczono funkcję opisującą temperaturę odbitego promieniowania podczerwonego (RTC) w zależności od temperatury płyty – zależność (4.10).

W podrozdziale 4.4 przedstawiono metodologię prowadzenia pomiarów z wyszczególnieniem kolejnych etapów badań eksperymentalnych – analizie poddano pięć przypadków geometrycznych: płyta bez turbulizatorów (SP) oraz płyta wyposażona w trzy turbulizatory o kształcie: prostokątnym (P), prostokątnym z otworem (PP), trójkątnym (T) i trójkątnym z otworem (TP) – dla wspomnianych wcześniej dwóch prędkości powietrza (0,9 oraz 3,16 m/s); dla każdej z geometrii określono omówione wcześniej istotne parametry (jak temperatura, wilgotność – tab.4.5) oraz określono dokładność i niepewność pomiarową – tabela 4.6.

W rozdziale 4.5. dokonano analizy wyników pomiarów uzyskanych za pomocą modułów (National Instruments) z czujników pomiarowych oraz wyników uzyskanych na bazie zdjęć wykonanych kamerą termowizyjną (rys. 4.19 – 4.24). Zauważono, że występują różnice w temperaturze płyty w zależności od kształtu turbulizatora oraz prędkości przepływu strugi, jak również zaobserwowano powstawanie tzw. „falowania” izoterm. Z tego względu, podczas dalszych analiz temperatury powierzchni płyty, uwaga Doktorantki skoncentrowana była na centralnej części jej powierzchni.

W celu łatwiejszego porównania ze sobą wszystkich rozpatrywanych przypadków zastosowanych turbulizatorów, wytypowanie jego geometrii, przy której występuje najlepsze wychłodzenie płyty względem płyty bez turbulizatorów, wprowadzono temperaturę bezwymiarową, która została zdefiniowana zależnością (4.11). Zaprezentowano wykresy zmienności tej temperatury w funkcji odległości na płycie (rys. 4.25 – 4.28) – wyznaczone na bazie pomiarów termoparami, jak również wyniki uzyskane na podstawie obróbki zdjęć termowizyjnych. Z analizy zaprezentowanych wykresów Doktorantka wykazała, że największa intensyfikacja wymiany ciepła ma miejsce na powierzchni płyty bezpośrednio za turbulizatorami, co jest wynikiem największych zaburzeń intensyfikujących konwekcyjną wymianę ciepła. Wykorzystując zależność wynikającą z prawa Newtona Doktorantka pokusiła się określić stopień intensyfikacji wymiany ciepła jaki zachodził przy zastosowaniu turbulizatorów – zależność (4.13). Na tej podstawie w tabeli 4.7 zaprezentowane zostały minimalne, maksymalne oraz średnie wartości wzmocnienia cieplnego dla rozpatrywanych przypadków stosowanych turbulizatorów.

W podrozdziale 4.5.3. dokonano analizy bezwymiarowej liczby Stanton ( $St$ ), którą w pracy określano na podstawie badań eksperymentalnych ze wzoru (4.14) oraz z sześciu modeli teoretycznych (opisanych na s.53) słusznych dla przepływów nad ogrzewaną płaską płytą.

Obliczenia zaprezentowano w formie graficznej na rys. 4.29 – 4.33 (wpływ liczby  $Re$  na wartość liczby  $St$ ). Analiza wykazała, że dla każdej analizowanej wartości prędkości strugi, wyniki uzyskane z modeli teoretycznych, nie pokrywały się z wynikami uzyskanymi na bazie przeprowadzonych eksperymentów. Największe różnice pomiędzy modelami (teoretyczny i doświadczalny) zaobserwowano dla płyty wyposażonej w turbulizatory prostokątne pełne (P).

Rozdział 4 kończą wnioski, w których Doktorantka potwierdza postawioną w rozdziale 1 tezę, że „Zastosowanie turbulizatorów powoduje lokalne zmiany struktury przepływu, co skutkuje zwiększeniem współczynnika przejmowania ciepła” oraz formułuje dziewięć wniosków (niektóre przez mnie zostały podane wcześniej), m.in. że zastosowanie otworu w turbulizatorach najstąbiej wpłynęło na wzrost lokalnego współczynnika wnikania ciepła, a największe wartości wzmocnienia cieplnego otrzymano dla prędkości strugi wynoszącej 3,16 m/s i płyty wyposażonej w turbulizatory prostokątne pełne – wartości te zgadzają się z danymi literaturowymi – oraz, że nie można jednoznacznie określić równania opisującego związek liczby Stanton od liczby Reynoldsa dla płyty wyposażonej w turbulizatory.

Ostatni stawiany wniosek to tak naprawdę spojrzenie w przyszłość: nakreślenie rozwinięcia ewentualnych dalszych działań w przestrzeni badań eksperymentalnych poprzez uwzględnienie: długości analizowanej płyty, wpływu ścianek bocznych płyty na procesy zachodzące na jej powierzchni, wpływu kąta natarcia turbulizatora na procesy zachodzące przy sąsiadującym turbulizatorze.

#### Uwagi do rozdziału 4:

- 1) Powołując się w tekście na wcześniejsze (lub późniejsze) rozdziały/podrozdziały, korzystniej byłoby stosować (razem z ich tytułem) numerację, co ułatwia czytanie/sprawdzanie pracy (m.in. s.35, piąty wiersz od góry po tabeli 4.2).
- 2) W indeksie dolnym liczby  $Re$  (s.35, pierwszy wiersz od dołu) powinno być kolejno 0,9 oraz 3,16 (a nie jak jest w obu przypadkach 0,41).
- 3) Pod zależnością (4.9) przydałoby się wyjaśnienie, czym jest  $Q_c$  (jest to podane co prawda w tabeli 4.3, ale dla łatwiejszego wchłaniania wiedzy byłoby to wskazane podać wcześniej, tak jak to uczyniono względem wielkości występującej na przykład w zależności 4.6).
- 4) Piąty wiersz od dołu na s.36: *styku płyta - powietrze* (powinno być *styku płyta-powietrze*).
- 5) Szósty wiersz od dołu s.37 – nazwa firmy Testo piszemy wielką literą.
- 6) Rozumiem, że sekwencyjne stosowanie powtórzeń, na wykresach zaprezentowanych na rys. 4.25 – 4.28, wartości temperatury bezwymiarowej (od 0,8 do 1) miało na celu zwiększenie czytelności danych uzyskanych na drodze badań termowizyjnych i pomiarów termoparami. Według mnie nie do końca dało to dobry efekt.
- 7) Ósmy i szósty wiersz od dołu, s.49: nie powinno być powołania *na wykresy* 4.25, 4.26. 4.27 czy 4.28, ale na wykresy, które znajdują się na **rys.** 4.25, 4.26, 4.27 czy 4.28 (powołujemy się zawsze na **rysunek**, gdyż w piśmiennictwie polskim w naukach technicznych mamy do czynienia tylko z rysunkami – nie stosujemy Wyk., Ryc. Zdj.).

- 8) W drugim i trzecim akapicie (s.50) brakuje powołania na omawiane wykresy zaprezentowane na wykresach, co wzbudza pytanie u czytelnia, które wykresy Doktorantka przywołuje w omawianym tekście.
- 9) W tabeli 4.7 (s.52), dla średniej wartości wzmocnienia cieplnego, w indeksie dolnym zabrakło literki *s* – powinno być *sr* (jest *r*).
- 10) Wskazane byłoby, w podawanych zależnościach matematycznych, stosować nie tylko same nawiasy zwykłe, ale – jeżeli zachodzi taka potrzeba – również nawiasy klamrowe, kwadratowe. Dotyczy to dla przykładu zależności (4.15), (4.16), czy też (4.19) ze s.53.
- 11) **Przekształcając prawo Newtona (2.5), uzyskano ...** – drugi wiersz od góry, s.52 – korzystniej byłoby napisać **Przekształcając zależność (2.5), opisującą prawo Newtona, uzyskano ...**
- 12) Zastosowany opis modeli od 2 do 6 (oznaczenie w indeksie dolnym) – s.53 – nie pokrywa z dalszym wywołaniem oznaczeń tych modeli na kolejnych stronach. Powinno być to ujednoczone (najprościej wyeliminować w oznaczeniu w indeksie dolnym „od”, które ma miejsce na s.53).
- 13) Pierwszy wiersz od dołu na s.54: *powodowała podniesienie temperatury* – korzystniej byłoby napisać *powodowała przyrost temperatury*.
- 14) Na s.61 błędnie osadzono pierwsze zdanie – to co jest tam napisane, nie jest prawdą (chyba wynik kopiuju/wklej).
- 15) Czy wartości liczby Reynoldsa były tak małe, jak to wykazano na rys. 4.29 – 4.38?

**Rozdział 5** zawiera analizę numeryczną, która rozszerza wykonane badania eksperymentalne, a jak podaje Doktorantka, badania te posiadały pewne ograniczenia. Głównym ich celem było uzupełnienie przeprowadzonych badań doświadczalnych m.in. o wizualizację zaburzeń przepływu generowanych przez turbulizatory i analizę warstwy przyściennej, stąd w rozdziale tym opisano poszczególne elementy modelu (geometrię, zastosowaną siatkę numeryczną, warunki początkowe i brzegowe – założenia modelu, omówienie trzech przyjętych modeli w metodzie RANS: k-omega SST, transition-k-kl-omega oraz Reynolds Stress), walidację modelu z eksperymentem oraz analizę wyników. W celu zamodelowania procesu wykorzystano metodę Pressure-Velocity Coupling, a obliczenia słusznie zostały przeprowadzone metodą objętości skończonych, gdyż metoda ta zalecana jest do tego typu rozwiązań cieplno-przepływowych. Na podstawie analizy wyników doświadczalnych zaobserwowano, że dla płyty wyposażonej w turbulizatory prostokątne pełne zachodziła największa intensyfikacja wymiany ciepła, stąd Doktorantka rozpatrzyła cztery przypadki geometryczne: płytę bez turbulizatorów oraz płytę wyposażoną w turbulizatory prostokątne pełne (oba warianty dla prędkości 0,9 i 3,16 m/s). Wykonano szereg wykresów (rys. 5.5 i 5.6) na bazie których wysunięto wnioski, że trudno jest jednoznacznie określić (na płaszczyźnie „eksperyment – numeryka”), który model najlepiej opisuje procesy cieplno-przepływowe zachodzące za płytą wyposażoną w turbulizatory, stąd też zdecydowano się na określenie procentowej odchyłki temperatury dla rozpatrywanych przypadków (podrozdział 5.4.2). Zaprezentowano wykresy (rys. 5.7 – 5.9) na bazie których również trudno było stwierdzić, który model najlepiej opisuje wyniki badań eksperymentalnych, zatem kolejnym podjętym krokiem było obliczenie mediany procentowej odchyłki temperatury dla każdego przypadku oraz wytypowanie modeli z jej najniższą wartością (tabela 5.2). Na podstawie analizy zestawionych wyników



Doktorantka stwierdza – cytując: „najlepiej zwalidowanym modelem był model Transition-kl-omega, dla dziesięciu przeanalizowanych przypadków; aż w sześciu wykazywał on najniższe wartości mediany procentowej odchyłki temperatury, stąd w dalszej części dysertacji (podrozdział 5.5) przedstawiono szczegółowe wyniki analiz dla tego modelu”, w którym to podrozdziale przeanalizowano warstwę przyścienną, kształtowanie się strugi za turbulizatorem, w tym linie prądu, prędkość, temperaturę.

W podrozdziale 5.6 zaprezentowano wpływ materiału turbulizatora na przenoszenie ciepła. Porównań dokonano dla turbulizatorów wykonanych z żywicy, o współczynniku przewodzenia ciepła równym  $0,186 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ , oraz ze stali – o współczynniku przewodzenia ciepła równym  $16,27 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ . Na podstawie analiz uzyskanych wyników (na drodze obliczeń numerycznych) wysunięto wniosek, że materiał turbulizatora miał znikomy wpływ na intensyfikację procesów wymiany ciepła, a w celu potwierdzenia słuszności tego wniosku należałoby przeprowadzić analizę z zastosowaniem materiałów o wyższym współczynniku przewodzenia ciepła, różnych prędkości przepływu strugi oraz różnych kształtów turbulizatorów.

Rozdział piąty kończą cztery wnioski (s.83 – 84), na podstawie których postawiono hipotezę, że podczas pomiarów nierównomiernie wygrzewana była płyta, co mogło być spowodowane montażem dwóch grzałek i występowaniem przerw na styku grzałka-płyta, ewentualnie nierównomiernym ułożeniem przewodów grzejnych w grzałce (występowały różnice pomiędzy temp. otrzymanymi na drodze doświadczalnej oraz numeryki). Doktorantka podaje, że w kolejnych badaniach, zarówno eksperymentalnych i numerycznych, należałoby zmienić kąt natarcia z  $30^\circ$  na  $-30^\circ$  i sprawdzić jego wpływ na otrzymane wyniki w poszczególnych rzędach termopar.

Zaobserwowano również, że zaburzenia wprowadzone przez turbulizatory mają wpływ na grubość hydrodynamicznej warstwy przyściennej, a lokalna i średnia temp. powierzchni ogrzewanej płyty zależy od intensyfikacji powstających zaburzeń.

#### Uwagi do rozdziału 5:

- 1) Dlaczego w rozdziale 5.6 (Wpływ materiału turbulizatora na przenoszenie ciepła) zdecydowano się na porównanie żywicy tylko ze stalą nierdzewną, a nie wzięto pod uwagę np. dodatkowo stali stopowej lub ewentualnie nie porównano żywicy i stali stopowej? Czym było to spowodowane?
- 2) Skoro we wnioskach (rozdział 5.7) wystawiono hipotezę, że podczas pomiarów nierównomiernie wygrzewana była płyta, co mogło być spowodowane montażem dwóch grzałek i występowaniem przerw na styku grzałka-płyta, ewentualnie nierównomiernym ułożeniem przewodów grzejnych w grzałce, to czy nie powinno pojawić się stwierdzenie, że w dalszych pracach badawczych należy przeanalizować wykonanie elementu grzałka-płyta i dokonać takich zmian, które wyeliminują występujące różnice?
- 3) Na s. 68 i 82 pojawiło się błędne podanie jednostek: współczynnika przewodzenia ciepła – jest  $\text{W}/\text{mK}$ , a powinno być  $\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ ; pomiędzy „em” i „ka” powinien pojawić się również znak mnożenia, aby dla każdego czytelnika była jasność, że w mianowniku jest „metr razy Kelvin”, a nie „milikelwin” – oraz ciepła właściwego: jest  $\text{J}/\text{kgK}$ , a powinno być  $\text{J}/(\text{kgK})$ .

**Rozdział „Podsumowanie”**, jak sama nazwa wskazuje, podsumowuje dokonania wykazane w przedstawionej dysertacji. Jednocześnie Doktorantka w sposób syntetyczny podaje wyciągnięte w poszczególnych rozdziałach pracy wnioski i stwierdzenia, które potwierdzają postawianą w rozdziale 1. tezę rozprawy, jak również realizację celu głównego i celów pomocniczych pracy.

Nakreślono również pomysły i planowane dalsze działania badawcze, które zrodziły się w wyniku analizy wyników pomiarów uzyskanych na drodze badań eksperymentalnych oraz analizy wyników numerycznych.

Pracę kończy rozdział „Bibliografia” w którym, w porządku cytowania, podano informacje bibliograficzne dotyczące 84 prac naukowych. Cytowane w rozprawie prace naukowe są zgodne z przedstawioną w niej tematyką.

#### Uwagi do rozdziału „Bibliografia”:

- 1) Nie wszystkie podane pozycje literaturowe zawierają pełne dane umożliwiające proste i szybkie odnalezienie danego artykułu. Brakuje podania numeru tomu, numeru wydania, podania numerów stron czy też numeru DOI – np. [22, 26, 28].
- 2) Brakuje ujednolicenia stosowanych zapisów bibliograficznych (np. stosowane są pełne imiona autorów, gdzie w większości wydawnictw operuje się podawaniem inicjałów imion). W większości przyjmuje się, że pozycje bibliograficzne rozpoczynają się poprzez podanie nazwiska.
- 3) Wykazywana pozycja literaturowa [24] nie istnieje. Prawdopodobnie jest to wynik błędnej redakcji/kopiowania tekstu pozycji literaturowej [25]. Poprawne cytowanie powinno być następujące:  
[24] Torii K., Yanagihara J.I.: The Effects of Longitudinal Vortices on Heat Transfer of Laminar Boundary Layers, ISME International Journal, 32(3): 395-402, 1989.  
Pozycję tę można byłoby rozszerzyć poprzez parametry DOI:  
[https://doi.org/10.1299/jsmeb1988.32.3\\_395](https://doi.org/10.1299/jsmeb1988.32.3_395) , które przyspieszają dotarcie do źródła informacji.

#### **4. Ocena strony redakcyjnej pracy**

Rozprawa doktorska wymaga w kilku miejscach korekty językowej (niektóre podawałem na poszczególnych etapach mojej recenzji). Jednocześnie więcej czasu powinna poświęcić Autorka strukturze rozprawy: korzystniejsze, wydaje mi się, byłoby, aby *Cel pracy, teza i cele pomocnicze* wprowadzić po krótkim wprowadzeniu i przeglądzie literatury w temacie intensyfikacji wymiany ciepła w wymiennikach i opisie turbulizatorów – czyli najpierw rozdz. 2 i 3, a dopiero za nim rozdz. 1 (ale oczywiście o zmodyfikowanej nazwie – na pewno nie może mieć nazwy *Wstęp*). Najważniejsze uwagi redakcyjne:

- 1) Poprawne operowanie *łącznikiem (-)* i *myślnikiem (–)*.
- 2) Zwrócenie uwagi na interpunkcję, a w niektórych miejscach na użyty styl.
- 3) W przypadku odwoływania się do rozdziałów/podrozdziałów, poprzez ich nazwę, podawanie również ich numeru.
- 4) Gradacja nawiasów w zależnościach matematycznych (zwykłe, kwadratowe, klamrowe).

- 5) Dla niektórych wykresów przedstawionych na rysunkach (np. rys. 5.5 – 5.14) wyraźny podział na (a), (b) itd. – ułatwia to precyzyjne wywołanie elementu rysunku, co skutecznie polepsza zrozumienie poruszanych zagadnień przez czytelnika i czytelniejszą analizę, jak również nie odwoływać się poprzez np. wyrażenia *dolne grafiki, górne grafiki, lewe grafiki, prawe grafiki*.
- 6) Na rys. 5.15, 5.17 i 5.19 korzystniejsze byłoby oddzielenie od siebie pewnych elementów występującej grafiki, aby obrazy nie zlewały się ze sobą.
- 7) W spisie treści jest *Spis ilustracji* (s.5), gdzie w rzeczywistości mamy *Spis rysunków* (s.95).
- 8) Błędnie w spisie treści odniesiono się do strony, gdzie znajduje się *Spis tablic* (jest s.98, powinna być s.99).

## 5. Podsumowanie i wniosek końcowy

W rozprawie doktorskiej mgr inż. Agnieszki Ochman znajdują się oryginalne wyniki badań doświadczalnych i numerycznych dotyczące wpływu usytuowania turbulizatorów (wykonanych z żywicy) na procesy ciepło-przepływowe występujące nad płaską ogrzewaną stalową płytą. W porównaniu do wcześniej stosowanych metod, do odczytu temperatury analizowanej płyty, zastosowano również kamerę termowizyjną, a badania przeprowadzono za pomocą specjalnie zaprojektowanego stanowiska laboratoryjnego; opracowany model numeryczny posłużył m.in. do wizualizacji zaburzeń przepływu występujących za turbulizatorami. Zaproponowana metodyka, rozwiązania techniczne są istotnym oryginalnym wkładem Autorki w rozwój dyscypliny *Inżynieria Środowiska, górnictwo i energetyka*.

Po zapoznaniu się z przesłaną dysertacją stwierdzam, że Doktorantka posiada wystarczającą wiedzę teoretyczną i umiejętności do samodzielnego prowadzenia pracy naukowej ww. dyscyplinie.

Jednocześnie wnioskuję, że praca doktorska mgr inż. **Agnieszki Ochman** zatytułowana: **„Intensyfikacja procesów cieplnych w wymiennikach poprzez modyfikację kształtu powierzchni czynnych”**, spełnia wymogi stawiane rozprawom doktorskim zgodnie z Ustawą z dnia 14.03.2003 roku „O stopniach naukowych i tytule naukowym oraz stopniach i tytule w zakresie sztuki” (tj. Dz.U. Nr 65, poz.595 z późn. zm.) i dlatego przedkładam Radzie Dyscypliny Naukowej *Inżynieria Środowiska, Górnictwo i Energetyka* Politechniki Wrocławskiej wniosek o dopuszczenie jej Autorki do dalszych etapów przewodu doktorskiego. Treść pracy jest zgodna z dyscypliną naukową **Inżynieria środowiska, górnictwo i energetyka**.

