

dr hab. inż. Sławomir Kubacki, prof. uczelni
Politechnika Warszawska,
Wydział Mechaniczny, Energetyki i Lotnictwa,
Instytut Techniki Lotniczej i Mechaniki Stosowanej,
ul. Nowowiejska 24, 00-665, Warszawa
tel : +48.22.234.47.77, fax: +48.22.622.09.01
e-mail : slawomir.kubacki@pw.edu.pl

Warszawa, dn. 7 maja 2026

Recenzja rozprawy doktorskiej

Pana mgr inż. Piotra Kamińskiego

pt. „Numerical modelling of a turbulent boundary layer on wavy and irregular surfaces”

I. Podstawa opracowania

Recenzję przygotowano w odpowiedzi na pismo nr R-WIM-BOD-511-1.2026 z dnia 25 marca 2026 r., skierowane przez Prodziekana ds. Nauki, Wydziału Inżynierii Mechanicznej Politechniki Częstochowskiej, Pana dr. hab. inż. Janusza Szmidłę, prof. uczelni.

II. Ogólna ocena rozprawy

Rozprawa doktorska Pana mgr inż. Piotra Kamińskiego koncentruje się na symulacjach LES (ang. Large Eddy Simulation) turbulentnego przepływu dla dużej liczby Reynoldsa ($Re_\tau > 2000$). Analizy obejmują zarówno powierzchnie gładkie, jak i pofalowane, przy uwzględnieniu zmiennego gradientu ciśnienia w przepływie zewnętrznym. Celem badań było wyjaśnienie mechanizmu prowadzącego do wzrostu naprężeń ścinających w obszarze pofalowania oraz tuż za nim i ocena wpływu tych naprężeń na opóźnienie oderwania turbulentnej warstwy przyściennej. Uzyskane wyniki badań są wartościowe i wnoszą istotny wkład do rozwoju nauki, przyczyniając się do lepszego zrozumienia procesów związanych z turbulentną wymianą pędu. Przedstawione podejście należy do metod pasywnego sterowania przepływem i może znaleźć zastosowanie w praktyce inżynierskiej (kontrola przepływu wokół łopat turbin wiatrowych oraz profili lotniczych). Ważnym aspektem tej części badań było także znalezienie związków umożliwiających szacowanie tempa wzrostu naprężeń

ścinających w funkcji wybranych parametrów geometrycznych lub przepływowych, takich jak szybkość zmian krzywizny powierzchni (parametr ES) czy lokalizacja punktu oderwania warstwy przyściennej na powierzchniach pofalowanych. Druga część prac badawczych dotyczyła optymalizacji kształtu z wykorzystaniem modeli zastępczych, w szczególności podejść bazujących na optymalizacji bayesowskiej i zastosowaniu metod RANS (ang. Reynolds-averaged Navier-Stokes). Jej celem było zaprojektowanie pofalowanych powierzchni o odpowiednio dobranej zmienności amplitudy i okresu, które prowadzą do uzyskania bardziej jednorodnego rozkładu temperatury na wylocie z odcinka rury lub kanału przy niewielkim wzroście strat przepływu. Problem ten ma istotne znaczenie praktyczne i może służyć jako wskazówka przy projektowaniu bardziej zaawansowanych układów wymienników ciepła.

Praca doktorska obejmuje szereg nowych elementów, które mają istotne znaczenie dla rozwoju dyscypliny Inżynieria Mechaniczna.

Wyniki badań zostały opublikowane w pięciu artykułach naukowych, a szósta praca jest obecnie w trakcie recenzji w uznanym czasopiśmie. Świadczy to o wysokim poziomie oraz jakości osiągniętych przez Doktoranta wyników badań.

III. Struktura rozprawy i ocena jej wartości naukowej

Rozprawa doktorska Pana mgr inż. Piotra Kamińskiego obejmuje pięć artykułów opublikowanych w czasopismach naukowych. Jedna z prac (nr 6) przedstawionych do oceny znajduje się obecnie (w chwili przygotowywania przeze mnie recenzji) w procesie recenzji w renomowanym wydawnictwie naukowym.

Tezy pracy zostały przedstawione w rozdziale „Introduction and objectives”. W mojej ocenie mają one ambitny charakter. Obejmują one szeroko pojęte analizy numeryczne przepływów turbulentnych, ukierunkowane na identyfikację mechanizmów odpowiedzialnych za wzrost naprężeń ścinających na powierzchniach gładkich i pofalowanych w obecności zmiennego gradientu ciśnienia. Z drugiej strony koncentrują się na opracowaniu efektywnych metod intensyfikacji mieszania, prowadzących do uzyskania bardziej jednorodnego rozkładu temperatury na wylocie z kanału lub odcinka rury. W mojej opinii postawione tezy zostały potwierdzone.

Praca doktorska zawiera bardzo obszerny przegląd literatury zarówno w autoreferacie, jak i w publikacjach składających się na dorobek naukowy Kandydata,

co świadczy o dobrej znajomości przez Doktoranta tematyki badań. Ma to szczególne znaczenie w obszarze kontroli przepływu, która cechuje się bardzo rozbudowaną literaturą przedmiotu, a właściwe wyłonienie kluczowych źródeł ściśle powiązanych z tematyką badań wymaga starannej selekcji odpowiednich prac. Kandydat właściwie dobrał źródła literaturowe, dzięki czemu trafnie osadził swoje cele badawcze w kontekście dotychczasowych osiągnięć w zakresie pasywnej kontroli przepływu.

W publikacji nr 1, Doktorant analizuje wpływ pofalowania powierzchni w kierunku poprzecznym do głównego kierunku przepływu na opóźnienie oderwania turbulentnej warstwy przyściennej dla dużej wartości liczby Reynoldsa (opartej na prędkości tarcia, $Re_\tau = 1000-2500$), wykorzystując metodę LES. Obliczenia przeprowadzono z użyciem programu ANSYS Fluent. Dla analizowanej konfiguracji wykonane zostały wcześniej badania eksperymentalne w tunelu aerodynamicznym znajdującym się w Katedrze Maszyn Ciepłych (KMC), Politechniki Częstochowskiej. Uzyskane wyniki badań eksperymentalnych zostały wykorzystane w pracy doktorskiej Kandydata do sformułowania warunków brzegowych, jak i do walidacji przyjętych metod numerycznych. Warto w tym miejscu pokreślić, że analizowane symulacje LES charakteryzowały się poprawnie zdefiniowanymi warunkami brzegowymi na wlocie do obszaru obliczeniowego, dzięki zastosowaniu metody generacji syntetycznej turbulencji. Celem było wierne odtworzenie warunków panujących w badaniach eksperymentalnych. Cel ten został osiągnięty. Niemniej jednak interesujące byłoby określenie minimalnej odległości w kierunku x, liczonej od wlotu do obszaru, przy której analizowane parametry przepływu, w tym naprężenia normalne Reynoldsa, osiągają wartości zgodne z danymi eksperymentalnymi. Ma to istotne znaczenie dla zapewnienia odpowiednio rozwiniętej anizotropii ruchu turbulentnego w pobliżu ściany przed wejściem przepływu w obszar, w którym znajdują się pofalowania. Poprawnie zdefiniowane zostały również schematy numeryczne do aproksymacji członów konwekcyjnych w równaniach Naviera-Stokesa i w sposób poprawny został dobrany model podsiatkowy (WALE). Model WALE jest powszechnie wykorzystywany do symulacji przepływów przyściennych, także jego wybór był w pełni uzasadniony.

Analizy numeryczne CFD (ang. Computational Fluid Dynamics) obejmowały symulacje przepływu wzdłuż ścian gładkich oraz pofalowanych, przy zerowej i

niezerowej składowej wzdłużnej gradientu ciśnienia mierzonej na granicy warstwy. Kandydat przeprowadził szczegółową analizę uzyskanych wyników, uzyskując interesujące i wartościowe rezultaty. Wykazano, że zastosowanie konfiguracji z pofalowaniem i zmiennym gradientem ciśnienia (W-APG) prowadzi do wzrostu naprężeń ścinających na ścianie za pofalowaniem o około 10-15%, co potwierdza skuteczność zaproponowanej metody pasywnej kontroli przepływu. Osiągnięcie to należy uznać za istotne, zwłaszcza w kontekście trudności związanych z kontrolą przepływu turbulentnego przy tak wysokich wartościach liczby Reynoldsa. Doktorant dokonuje pogłębionej analizy wyników obliczeń numerycznych, identyfikując istotny wpływ wzdłużnych fluktuacji turbulentnych, występujących na wierzchołkach pofalowań, na kształtowanie dynamiki przepływu. Na szczególne podkreślenie zasługują wysoki poziom szczegółowości analiz oraz staranność w opracowaniu wyników, które były kluczowe dla zrozumienia mechanizmów odpowiedzialnych za wzrost naprężeń ścinających za pofalowaniami.

W drugiej publikacji Kandydat koncentruje się na analizie wyników obliczeń LES dla konfiguracji, w której amplituda zaburzeń periodycznych w dolnym obszarze przepływu stopniowo rośnie. Opracowany model parametryczny uwzględnia zarówno zmiany bezwymiarowej amplitudy A_0 , jak i liczby okresów (w zakresie od 5 do 7). Uzyskane rezultaty mają istotne znaczenie praktyczne, ponieważ Autor podejmuje próbę określenia zależności między wzrostem naprężeń ścinających, kluczowych dla analizowanej metody sterowania przepływem, początkiem lokalnych oderwań warstwy przyściennej za przeszkodami oraz długością stref oderwania. Jednym z najważniejszych osiągnięć pracy jest wykazanie, że parametr ES, opisujący tempo zmian krzywizny powierzchni, umożliwia skuteczną charakterystykę zarówno zmian naprężeń ścinających (rys. 13), jak i długości oderwania (rys. 21a). Jest to istotny rezultat pracy, mogący w przyszłości przyczynić się do rozwoju modeli chropowatości powierzchni, opracowania korelacji oraz poprawy metod RANS w opisie przepływu turbulentnego z zastosowaniem powierzchni chropowatych.

Trzecia publikacja poświęcona jest analizom LES z wykorzystaniem regularnych powierzchni pofalowanych opisanych funkcją sinus (W_0) oraz powierzchni zmodyfikowanych, w których elementy faliste nachylono w lewo (WL) i w prawo (WR). Celem badań było znalezienie takich konfiguracji, które umożliwiłyby

zwiększenie generacji naprężeń ścinających zarówno na pofalowanej ścianie, jak i na płaskiej płycie znajdującej się za nią, w porównaniu z przypadkiem bazowym W0.

Autor osiągnął ciekawe i nieintuicyjne wyniki obliczeń numerycznych, z których wynika, że pofalowanie typu WL prowadzi jednocześnie do wzrostu prędkości średniej oraz wzrostu składowej fluktuacyjnej prędkości, co przekłada się na zwiększenie naprężeń ścinających przy ścianie. Zwykle wzrost składowej fluktuacyjnej prędkości skutkuje większym ubytkiem prędkości średniej, co w analizowanym przypadku nie ma miejsca. Wzrost ten jest istotny, bo naprężenia są o około 70% wyższe od tych uzyskiwanych dla referencyjnej powierzchni sinusoidalnej W0 (rys. 14), przy jednoczesnym spadku współczynnika oporu o 14% (przypadek WL2).

Rezultaty te potwierdzają zasadność stosowania analiz LES, które umożliwiają lepsze zrozumienie mechanizmów odpowiedzialnych za wzrost naprężeń ścinających zarówno w obszarze pofalowania, jak i poza nim, w odniesieniu do wyników uzyskiwanych dla powierzchni gładkiej. Warto zaznaczyć, że uzyskanie przez Doktoranta wyników symulacji numerycznych wiązało się z istotnymi wyzwaniem. W analizowanych przypadkach przy zmiennym gradiencie ciśnienia na granicy warstwy i dużej liczbie Reynoldsa wartości szczytowe naprężeń normalnych Reynoldsa (rys. 11) pojawiają się bardzo blisko ściany, w odległości $y/\delta = 0.005-0.01$ (δ to grubość warstwy). Dla porównania, w warstwie laminarnej przy wysokim poziomie turbulencji poza warstwą wartości maksymalne fluktuacji występują w połowie jej grubości ($0.4-0.5\delta$), natomiast w klasycznej warstwie turbulentnej, uzyskiwanej dla dużo niższych liczb Reynoldsa, obserwuje się je w odległości $y/\delta = 0.1$. Otrzymane przez Doktoranta wyniki mają zatem unikatowy charakter, a ich uzyskanie wymagało dużej staranności w przygotowaniu siatek obliczeniowych, doborze schematów numerycznych oraz właściwym określeniu warunków brzegowych na wlocie do obszaru obliczeniowego.

Publikacja nr 4 przedstawia analizy LES dla turbulentnego przepływu w warstwie przyściennej rozwijającej się wokół powierzchni gładkiej oraz pofalowanej, odwzorowującej rozkład ciśnienia otrzymywany dla profilu NACA 4412 przy efektywnym kącie natarcia wynoszącym 5° . Obliczenia wykonano dla różnych liczb Reynoldsa, uwzględniając odmienne warianty pofalowania powierzchni (zestawione w tabeli 1). Domena obliczeniowa obejmowała odcinek dolotowy o długości 7.5 m, w

k którym przyjęto zerową wartość składowej wzdłużnej gradientu ciśnienia w celu uzyskania dostatecznie rozwiniętego profilu turbulentnego przed wejściem do obszaru o zmiennym gradiencie ciśnienia (APG). W tej części zastosowano zarówno powierzchnię gładką, jak i kilka wariantów wspomnianych wyżej powierzchni pofalowanych. Wlot do obszaru obliczeniowego zdefiniowano na lewym brzegu, definiując na tym brzegu prostokątny profil prędkości średniej i generując struktury turbulentne z założonym poziomem turbulencji wynoszącym 0.7%. Nie do końca jest jednak dla mnie jasny sposób definiowania warunku brzegowego na górnej ścianie kanału dolotowego (ZPG). Jakie warunki brzegowe zostały tutaj przyjęte i czy przyjęty poziom turbulencji 0.7% był utrzymywany poza warstwą aż do osiągnięcia części domeny, w której znajduje się profil? Niejasne jest dla mnie również, które ścianki traktowano jako ścianki „bez poślizgu”. Na str. 075157-7 znajduje się informacja, że warunek ten przyjęto na dolnej i górnej ścianie. O którą ściankę chodzi?

Analiza wyników symulacji numerycznych została w pracy przedstawiona w sposób przejrzysty i spójny. Autor omawia wpływ rodzaju pofalowania powierzchni na wzrost naprężeń ścinających w obszarze za pofalowaniem. Dalsze rozważania prowadzone są dla konfiguracji referencyjnej (bez pofalowania) oraz dla wariantów skrajnych, najmniej i najbardziej korzystnych z punktu widzenia przyjętej funkcji celu, jaką jest przyrost naprężeń ścinających. Odniesiono się również do rezultatów wcześniejszych badań (artykuł nr 1), w których na górnej ścianie zadano odpowiednie składowe prędkości w kierunkach x i y , uzyskując odpowiednią wartość składowej wzdłużnej gradientu ciśnienia. Na uwagę zasługuje porównanie wyników LES przedstawione na rys. 15, wskazujące, że w przypadku wystąpienia krzywizny wklęsłej (ang. convex curvature), sprzyjającej tłumieniu turbulencji, możliwe jest uzyskanie około 15% wzrostu naprężeń ścinających na ścianie przy zastosowaniu powierzchni pofalowanych w porównaniu z powierzchnią gładką. Istotnym elementem jest także wykazanie, że wzrost naprężeń pojawia się dopiero dla odpowiednio dużych wartości liczby Reynoldsa opartej na prędkości tarcia ($Re_\tau > 2300$). Autor pokazuje również, że kluczową rolę w przypadku powierzchni pofalowanych odgrywa mechanizm wzbudzenia (modulacji) struktur wirowych rozwijających się bardzo blisko ściany ($y/\delta = 0.01$) przez struktury rozwijające się w dalszej odległości od ściany ($y/\delta = 0.15$). Wynik ten może odgrywać istotną rolę w procesie projektowania układów pasywnej kontroli przepływu. Warto również podkreślić, że przedstawione symulacje LES

charakteryzowały się bardzo dużym kosztem obliczeniowym, gdyż wykonywano je na bardzo gęstych siatkach, obejmujących ponad 100-150 milionów komórek. Wartości szczytowe naprężeń Reynoldsa w kierunku głównym przepływu występowały bardzo blisko ściany w odległości $y/\delta = 0.01$. (Podobne wyniki obliczeń uzyskano w publikacjach nr 1 i 3.) Uzyskanie wiarygodnych wyników LES stanowiło zatem istotne wyzwanie, któremu Kandydat sprostał, realizując założone cele badawcze i uzyskując rezultaty o wysokiej wartości naukowej.

Piąta i szósta publikacja dotyczą zagadnień częściowo odmiennych od tych omawianych wcześniej. Koncentrują się one na optymalizacji kształtu z wykorzystaniem modeli zastępczych, w szczególności w ramach podejścia bayesowskiego, stosując metody RANS do modelowania przepływu turbulentnego. Zastosowanie metod RANS, zamiast wcześniej rozważanych metod LES, jest celowe bo umożliwia ono uzyskanie stacjonarnych pól prędkości, co jest niezbędne do efektywnego wyznaczenia funkcji celu. Analizy obejmowały optymalizację procesu wymiany ciepła w przepływie przez odcinek rury, na której powierzchni zastosowano pofalowanie o określonej amplitudzie i okresie. Wielkości te były przedmiotem optymalizacji. Jako funkcję celu przyjęto uzyskanie możliwie jednorodnego rozkładu temperatury na wylocie przy jednoczesnym ograniczeniu strat ciśnienia. Kandydat uzyskał interesujące wyniki badań, wskazujące na możliwość istotnej poprawy procesu mieszania, prowadzącej do bardziej równomiernego profilu temperatury na wylocie (publikacja 5, rys. 6), przy niewielkim wzroście strat ciśnienia.

W szóstej publikacji rozpatrywano proces mieszania z zastosowaniem powierzchni pofalowanych umieszczonych na górnej i dolnej ścianie trójwymiarowego kanału płaskiego. Analizy z zastosowaniem modeli zastępczych poprzedzone zostały gruntowną walidacją wybranych metod RANS. Na podstawie porównania wyników obliczeń z danymi dostępnymi w literaturze stwierdzono, że najbardziej wiarygodnym modelem RANS jest model $k-\epsilon$. W konsekwencji został on wykorzystany w dalszych analizach dotyczących optymalizacji kształtu. Kandydat przeprowadził optymalizację kształtu, modyfikując powierzchnie pofalowane, najpierw z wykorzystaniem funkcji sinus, a następnie wielomianów Hermite'a. Otrzymane wyniki wskazywały, że dla zwiększenia jednorodności pola temperatury w płaszczyźnie wylotowej konieczne jest stopniowe zwiększanie amplitudy pofalowań wzdłuż kanału. W końcowym etapie rozważono także uproszczenie zaproponowanych modyfikacji poprzez redukcję liczby okresów pofalowania o

kilkanaście, co nie spowodowało istotnego pogorszenia wartości funkcji celu.

Podsumowując, należy podkreślić duże znaczenie zastosowanej przez Doktoranta metody optymalizacji. Uzyskane wyniki mają wyraźny potencjał praktyczny i mogą stanowić podstawę do opracowania wytycznych do optymalizacji bardziej złożonych geometrii wymienników ciepła.

Pod względem edytorskim praca prezentuje bardzo wysoki poziom. Rysunki i równania znajdujące się w autoreferacie i artykułach zostały opracowane z dużą starannością, a całość jest czytelna w odbiorze.

IV. Mocne i słabe strony pracy

Mocną stroną pracy jest realizacja zaawansowanych obliczeń numerycznych LES ukierunkowanych na symulację przepływów turbulentnych przy dużych liczbach Reynoldsa ($Re_\tau > 1000$), z uwzględnieniem zmiennego gradientu ciśnienia w warstwie przyściennej (APG) oraz z zastosowaniem pofalowanej geometrii ścian. Podjęcie przez Doktoranta analizy tak złożonych zjawisk przepływowych stanowi istotne wyzwanie, zwłaszcza, że mechanizmy odpowiedzialne za powstawanie struktur wirowych w bezpośrednim sąsiedztwie ściany ($y/\delta = 0.01-0.1$) dla powierzchni gładkich i pofalowanych (chropowatych) pozostają przedmiotem intensywnych badań eksperymentalnych i numerycznych. Innym atutem pracy jest konsekwentna i wnikliwa analiza wyników LES, która umożliwiła identyfikację mechanizmów odpowiedzialnych za intensyfikację turbulentnej wymiany pędu w pobliżu ścian (powierzchnie gładkie i pofalowane). Mechanizmy te nie zostały, z oczywistych powodów, w pełni rozpoznane w ramach badań eksperymentalnych prowadzonych przez inny zespół, dopiero analizy numeryczne umożliwiły określenie znaczenia poszczególnych zjawisk w badanych przepływach turbulentnych. Należy również zaznaczyć, że Autor nie ograniczał się wyłącznie do analizy wyników LES, lecz dążył także do uogólnienia uzyskanych rezultatów badań w postaci zależności empirycznych opisujących wpływ powierzchni pofalowanych na zwiększenie naprężeń ścinających (parametr ES). Istotnym efektem tych prac jest publikacja rezultatów badań z zastosowaniem techniki LES w czterech renomowanych czasopismach naukowych.

W obszarze optymalizacji kształtu Kandydat wykazał się dużą biegłością i samodzielnością w stosowaniu aparatu matematycznego, umożliwiającą wykorzystanie modeli zastępczych do optymalizacji procesu wymiany ciepła z

użyciem technik RANS. Na szczególne podkreślenie zasługuje fakt, że zagadnienia optymalizacyjne istotnie różnią się od analiz LES realizowanych na początkowym etapie pracy doktorskiej. Wymagało to zdobycia nowych kompetencji, co zaowocowało opracowaniem dwóch publikacji naukowych poświęconych optymalizacji procesu wymiany ciepła.

Do słabszych stron pracy należy opis warunków brzegowych zdefiniowanych w analizach LES na górnym brzegu (ZPG) w publikacji nr 4. Nie było dla mnie do końca jasne, w jaki sposób warunki te zostały zdefiniowane i czy miały one wpływ na wyniki w warstwie przyściennej (rys. 4). W odniesieniu do optymalizacji kształtu kanału płaskiego z powierzchniami pofalowanymi (przepływ 3D), opisanej w publikacji nr 6, nie w pełni jasny pozostaje dla mnie wybór odmiennego układu geometrycznego do walidacji modelu RANS od tego zastosowanego w procesie optymalizacji (gładkie ściany). Uwagi krytyczne nie wpływają jednak na moją bardzo pozytywną ocenę pracy doktorskiej Pana mgr inż. Piotra Kamińskiego.

V. Szczegółowe pytania do Autora rozprawy

Poniżej znajdują się szczegółowe pytania do Autora rozprawy:

1. W pracy nr 2 wykorzystano metodę zaproponowaną przez Adamiana i in. (2011) do generowania struktur turbulentnych na wlocie do obszaru obliczeniowego. Podejście to polega na opisie fluktuacyjnego pola prędkości poprzez superpozycję modów Fouriera, które są wyznaczone na podstawie widma von Kármána. Jakie właściwości tej metody generacji turbulencji zadecydowały o jej wyborze zamiast dostępnych w programie Fluent metod typu „Vortex Synthesizer” czy „Vortex Method”? Czy decyzja ta wynikała z lepszej zgodności wyników z danymi eksperymentalnymi? Jeżeli tak, to które aspekty podejścia Adamiana i in. sprawiły, że zostało ono uznane za bardziej odpowiednie do zastosowania w pracy nr 2, jak i w późniejszych pracach?
2. W pracach 1–4 symulacje LES realizowano z wykorzystaniem siatek hybrydowych (określanych jako blokowo-strukturalne, publikacja 2, rozdz. 2.4), które konstruowano poprzez zagęszczanie siatki w pobliżu ścian poprzez dodawanie kolejnych warstw. W tych obszarach komórkę dzielono na osiem mniejszych w przestrzeni trójwymiarowej. Podejście to jest w pełni uzasadnione, jednak prowadzi do powstawania tzw. wiszących węzłów, które

mogą powodować trudności z uzyskaniem zbieżnych rozwiązań ze względu na konieczność interpolacji pomiędzy obszarami o różnej gęstości siatki.

Proszę o wyjaśnienie, czy Doktorant analizował wpływ obecności wiszących węzłów na rozwiązanie w strefie przyściennej oraz czy efekt ten był zauważalny w interpretacji wyników obliczeń?

3. W pracy nr 4, na rysunku 4 przedstawiono porównanie profili prędkości średnich oraz fluktuacyjnych z wynikami DNS uzyskanymi przez Sillero i in. (2013). Proszę doprecyzować, w jakiej odległości w kierunku x zostały wyznaczone te profile. Jeżeli analiza została przeprowadzona w wystarczającej odległości od wlotu do przestrzeni obliczeniowej (inlet na rys. 1), to czy obserwowane niedoszacowanie prędkości średniej w zakresie $0.01 < y/\delta < 1$ może wynikać z częściowej laminaryzacji przepływu występującej w analizach LES w pobliżu górnego brzegu kanału (warunek ZPG)? Czy sprawdzono tempo zaniku turbulencji od poziomu $Tu = 0.7\%$ na wlocie do domeny aż do miejsca, w którym analizowano profil prędkości średniej i profil naprężeń turbulentnych?
4. W pracy 4 przyjęto bardzo niewielki rozmiar domeny obliczeniowej w kierunku z ($L_z = 0.12$ m) w porównaniu z jej długością w kierunku x ($L_x = 10.5$ m), co daje stosunek L_z/L_x równy około 1,1%. Dla porównania, w pracy 1 zastosowano znacznie większą rozpiętość w kierunku z , wynoszącą 18% L_x . Ograniczenie wymiaru L_z jest zrozumiałe z punktu widzenia kosztów obliczeniowych, szczególnie przy bardzo gęstych siatkach rzędu 170 milionów komórek (Tabela 2). Czy w pracy 4 przeprowadzono analizę wpływu długości L_z na rozmiar struktur wirowych generowanych w pobliżu ściany? Jeżeli tak, to jakie były wyniki tych analiz?
5. W analizach przepływów z wykorzystaniem metod RANS (publikacje 5 i 6) kluczowe było uzyskanie rozwiązań spełniających kryteria zbieżności, co umożliwiałoby wyznaczenie funkcji celu. Proces optymalizacji kształtu wymagał przeprowadzenia setek, a nawet tysięcy symulacji dla różnych konfiguracji z użyciem metod RANS. Można przypuszczać, że nie wszystkie przypadki osiągnęły satysfakcjonujący poziom zbieżności po wprowadzeniu nowych geometrii i wygenerowaniu siatek obliczeniowych. Proszę o wyjaśnienie, czy wystąpiły przypadki, które należało wykluczyć ze zbioru danych wykorzystywanego w optymalizacji, oraz w jaki sposób realizowano selekcję

lub odrzucanie danych w schemacie przedstawionym na stronie 3 publikacji nr 5?

6. Optymalizacje kształtu dla konfiguracji analizowanych w pracy nr 6 wykonano z założeniem dosyć niskiej wartości liczby Reynoldsa wynoszącej 2000. Zakładam, że jest to liczba bazująca na połowie wysokości kanału. Jeżeli tak, to przepływ można traktować jako turbulentny. Walidację modeli RANS wykonano dla konfiguracji z prostokątnymi zagłębieniami (rys. 5, publikacja 6), natomiast sama optymalizacja dotyczyła geometrii o gładkich, pofalowanych ściankach. Tego typu powierzchnie sprzyjają powstawaniu oderwań w różnych obszarach przepływu, a lokalnie w strefach przyspieszenia przepływu na modyfikowanych powierzchniach może potencjalnie dojść do lokalnej laminaryzacji przepływu. Proszę o uzasadnienie wyboru geometrii o ostrych krawędziach do walidacji modeli RANS.

VI. Podsumowanie

Przedłożona do oceny rozprawa doktorska Pana mgr inż. Piotra Kamińskiego stanowi znaczące osiągnięcie naukowe w dyscyplinie Inżynieria Mechaniczna. Wysoka jakość uzyskanych wyników LES, rzetelność przeprowadzonych analiz oraz skuteczność Kandydata w ocenie kluczowych mechanizmów turbulentnej wymiany pędu w obszarze pofalowanych powierzchni oraz próby opracowania związków umożliwiających opis zmian naprężeń ścinających w funkcji wybranych parametrów geometrycznych i przepływowych, opracowanie modeli zastępczych umożliwiających zmiany geometryczne powierzchni skutkujące intensyfikacją procesów mieszania i uzyskanie bardziej jednorodnych temperatur na wylocie z kanału czy odcinka rury świadczą o znaczącej samodzielności naukowej Kandydata. Predysponuje to Kandydata do prowadzenia samodzielnych badań w zakresie analiz numerycznych przepływów turbulentnych oraz optymalizacji kształtu, a osiągnięte rezultaty stanowią solidną podstawę do dalszego rozwoju naukowego w tym obszarze.

W konkluzji stwierdzam, że praca doktorska Pana mgr inż. Piotra Kamińskiego pt. „Numerical modelling of a turbulent boundary layer on wavy and irregular surfaces” spełnia wymagania określone w ustawie z dn. 20 lipca 2018 r – Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce, jakie stawia się pracom doktorskim, i **wnoszę o dopuszczenie jej do dalszych etapów postępowania doktorskiego.**

Uzyskane wyniki badań, znacząco przekraczające przeciętny poziom prac doktorskich, szeroki zakres przeprowadzonych analiz, obejmujący zarówno złożone przepływy turbulentne dla dużej liczby Reynoldsa, jak i opracowanie metod zastępczych do optymalizacji kształtu powierzchni, świadczą o wysokich kompetencjach badawczych Kandydata. Ponadprzeciętna rzetelność realizacji badań, wnikliwa analiza i interpretacja uzyskanych wyników, istotny potencjał aplikacyjny opracowanych rozwiązań, a także udokumentowanie rezultatów w pięciu publikacjach oraz złożenie szóstej pracy do recenzji w renomowanym czasopiśmie naukowym świadczą o bardzo wysokim poziomie osiągnięć naukowych Doktoranta. **W związku z powyższym wnioskuję o wyróżnienie rozprawy doktorskiej Pana mgr inż. Piotra Kamińskiego.**