

INNOWACYJNY PROCES PROJEKTOWANIA I OPTYMALIZACJI PRODUKTÓW Z WYKORZYSTANIEM SOLVERA *ADJOINT*

Zbigniew PLUTECKI, Paweł SATTLER, Krystian RYSZCZYK

Streszczenie: Optymalizacja procesu projektowania kształtów i wymiarów nowych produktów może być obecnie realizowana z wykorzystaniem metodologii automatycznej parametryzacji procedur iteracyjnych. Autorzy przedstawiają w pracy wybrane możliwości praktycznego stosowania metody operatora sprzężonego wykorzystującego ocenę gradientową wybranego parametru kryterialnego (*Adjoint*). Główną cechą wykorzystania tej metody jest możliwość uzyskania pól wrażliwości (czułości), które wyznaczają ewentualne zmiany w geometrii obiektu w odniesieniu do przyjętej funkcji np. funkcji kosztu, minimalizacji oporów hydraulicznych strat ciśnienia czy prędkości. Wykorzystując doświadczenia użytkowników oprogramowania *Ansys Fluent* autorzy przedstawili istotę nowego podejścia do procesu projektowania oraz efekty stosowania metody *Adjoint* w procesie projektowania na wybranych przykładach.

Słowa kluczowe:

proces projektowania, badania symulacyjne, metody deterministyczne, *Adjoint*

1. Wstęp

Klasyfikacyjny proces prac projektowych nad elementami układów przepływowych składa się szeregu etapów, zaczynając od zdefiniowania przez projektanta proponowanych wariantów koncepcyjnych kształtu i wymiarów, poddaniu ich analizie parametrycznej a następnie ocenie i wyborze wariantu realizacyjnego a następnie wykonania projektu podstawowego, wykonawczego oraz technologicznego z nanoszeniem, na każdym etapie tych prac, ewentualnych zmian i poprawek.

Podstawą w procesie projektowania jest dokonywanie ocen a następnie decyzji na podstawie przyjętego kryterium. Oceny ostatecznej najczęściej dokonuje się w oparciu o rachunek ekonomiczny. Oczywistym problemem jest zależność jakości do ceny wykonanego elementu. Kryterium jakości oparte jest zawsze na wskaźnikach technicznych takich jak np. sztywność, masa, niezawodność. Określenie warunków eksploatacyjnych, czasu pracy czy ograniczeń wynikających z miejsca zabudowy. Wieloletnie doświadczenie projektowe pokazuje, iż zastosowanie jednego kryterium oceny nie pozwala jednoznacznie wyznaczyć najwłaściwszego rozwiązania. Efektem prowadzenia analiz wieloparametrycznych jest wydłużenie czasu tych analiz jak również konieczność tworzenia większej grupy projektowej posiadającej bardzo zróżnicowane kompetencje [1].

Komputerowe wspomaganie procesu projektowania może znacznie przyspieszyć realizację prac. Wykorzystując techniki komputerowe i stosując metody obliczeniowe można uzyskać przybliżone do empirycznych parametry techniczne projektowanego elementu, będące podstawą ostatecznej oceny. Wymaga to jednak stosowania bardzo zaawansowanych technik i metod.

2. Numeryczna mechanika płynów

Jedną z najszybciej rozwijających się komputerowych metod projektowania i oceny właściwości jest numeryczna mechanika płynów (CFD). Komputerowa mechanika płynów CFD (ang. *Computational Fluid Dynamics*) związana jest z analizą systemów takich jak: przepływy cieczy, wymiana ciepła i towarzyszące jej zjawiska, czy zachodzące reakcje chemiczne. Wyniki takich analiz można przedstawiać za pomocą symulacji komputerowych. Komputerowa mechanika płynów znalazła szerokie spektrum zastosowań w branży przemysłowej i nie tylko. Poniżej przedstawiono przykładowe zastosowania CFD:

- aerodynamika samolotów, pojazdów, turbin wiatrowych
- hydrodynamika statków
- spalanie w silnikach paliw stałych, ciekłych i gazu
- ogrzewnictwo, wentylacja i klimatyzacja
- oddziaływania różnego typu na budynki od zewnątrz i wewnątrz
- meteorologia
- hydrologia i oceanografia: przepływ w rzekach, ujściach
- inżynieria środowiska: rozkład zanieczyszczeń
- inżynieria fizyki budowli: badanie naprężeń.

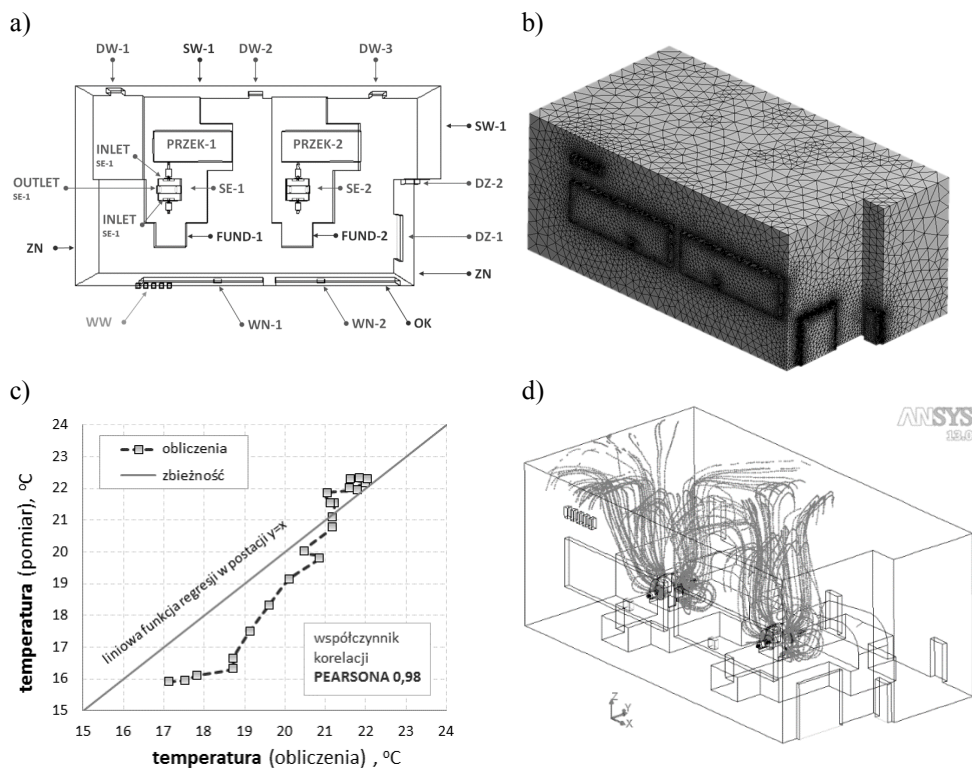
Podstawą numerycznej mechaniki płynów jest stosowanie modeli matematycznych opisujących zjawiska cieplno-przepływowe. Do najważniejszych równań opisujących te zjawiska należy uznać: równanie ciągłości przepływu, równania ruchu z uwzględnieniem charakteru tego ruchu (przepływ laminarny, turbulentny czy z obszaru przejściowego), równania transportu energii dla przepływów jedno- i wielofazowych oraz równania transportu promieniowania, wówczas gdy musimy uwzględnić to zjawisko. Modele matematyczne umożliwiają rozpatrywanie zjawisk cieplno-przepływowych w dwu lub trójwymiarowej przestrzeni geometrycznej badanego obiektu.

Istotnym elementem numerycznej mechaniki płynów jest implementacja modelu. Na proces ten składa się kilka elementów. Za najważniejsze należy uznać: przyjęcie założeń i uproszczeń, określenie obszaru obliczeniowego poprzez opracowanie modelu geometrycznego np. w środowisku CAD, dyskretyzacja obszaru obliczeniowego (podział geometrii na skończoną liczbę elementów), wybór i parametryzacja równań opisujących zjawiska, wybór i parametryzacja warunków brzegowych na granicy obszaru obliczeniowego, przyjęcie odpowiedniej metodyki obliczania (wybór metody numerycznej). Następnie prowadzi się testy obliczeniowe i poddaje się model weryfikacji empirycznej lub walidacyjnej. Dopiero wówczas można przystąpić do prowadzenia badań symulacyjnych w oparciu o przyjęty plan badań. Przykład opisu ważniejszych etapów modelowania przedstawiono na rysunku 1.

3. Automatyczne wyznaczanie topologii kształtu w oparciu o kryterium optymalizacyjne metodą *Solver Adjoint*

Opisany wyżej sposób wykorzystania numerycznej mechaniki płynów przedstawia klasyczny sposób realizacji prowadzenia badań symulacyjnych. W podejściu tym determinantą jest przyjęcie na początku prac obszaru obliczeniowego wyrażonego konkretnym kształtem i wymiarami, który w CFD zwany jest domeną.

W celu uniknięcia wielu błędów czy niedoskonałości w procesie projektowania produktu, projektant powinien korzystać z metody, która pozwala optymalizować projektowany



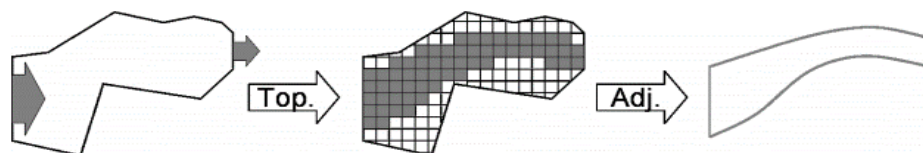
Rys. 1. Ważniejsze etapy tworzenia modelu badań symulacyjnych w technice CFD:
a) wybór i definiowanie obszaru obliczeniowego, b) dyskretyzacja obszaru obliczeniowego,
c) ocena jakości obliczeń – weryfikacja, d) przykładowe wyniki badań

produkt od samego początku pracy. Przykładem takiego narzędzia jest moduł *Solver Adjoint* (AS), który jest częścią składową pakietu *Ansys Fluent*. Moduł jest narzędziem do optymalizacji kształtu w oparciu o przyjęte funkcje kryterialne jak również z uwzględnieniem wielu dodatkowych zmiennych projektowych. Działanie AS opiera się na teorii sterowania optymalnego, w której funkcja kryterialna jest zdefiniowana za pomocą mnożników *Lagrange*, które obejmują zarówno rozwiązania równań z obszaru CFD jak i zmiany geometrii siatki w wyniku optymalizacji.

W nowym podejściu do realizacji prac projektowych z wykorzystaniem obliczeń przepływu jest przyjęcie odpowiedniego kryterium, które pozwala podjąć i prowadzić poszukiwania takiej geometrii obiektu, która będzie spełniać cechy wynikające z zachowania kryterium optymalizacji. Wówczas podczas kolejnych obliczeń numerycznych podejmowane są decyzje, czy dana komórka modelu geometrycznego jest "dobra" lub "zła" z punktu widzenia warunków wybranej funkcji kryterialnej. Wraz z prowadzeniem kolejnych procesów iteracyjnych dochodzi do usuwania zidentyfikowanych jako złych komórek z domeny płynu lub ich znakowana przez nadanie jej utraty pędu lub w miejscu tych komórek pojawiają się komórki puste [1]. W pierwszym przypadku, termin utraty pędu jest zazwyczaj określany poprzez porowatość komórek. Każda komórka ma przyporządkowaną indywidualną wartość porowatości α_i , która jest określana na podstawie prawa *Darcy'ego*.

Wartość α_i określa, czy komórka ma właściwości zbliżone do płynu (wartości niskiej porowatości) lub do ciała stałego (wysokie wartości α_i).

Opisany sposób wykorzystania CFD związany jest z poszukiwaniem takiej geometrii obiektu, która będzie spełniała cechy geometrii wygenerowanej w oparciu o założone kryterium optymalizacyjne. Przy takim podejściu, dzięki metodzie równań sprzężonych możliwe jest obliczenie wrażliwości wybranej funkcji kryterialnej każdej komórki. Uzyskane czułości można następnie wprowadzić do algorytmu optymalizacji bazującego na metodzie gradientowej. Ewentualnie można uzyskać również pośrednie wartości w celu otrzymania „numerycznego” rozkładu porowatości. Po kilku iteracjach otrzymuje się pożądane optimum topologii przedstawione jako obiekt powierzchniowy lub przestrzenny, który jest sumą wszystkich nieporowatych komórek (Rys.2). Bazowe równania opisujące prezentowaną metodę przedstawiono w poniższym rozdziale.



Rys. 2. Łańcuch procesów dla metody optymalizacji geometrii wg *Solver Adjoint* [2]

Schemat dyskretnego podejścia w procesie badań związanych z poszukiwaniem optymalnej topologii kształtu obiektów z wykorzystaniem modułu *Solver Adjoint* przedstawiono na rysunku 3.

Na początku prowadzonych badań kształt i wymiary obiektu są proponowane przez użytkownika. Pierwsze obliczenia w zakresie rozwiązywania równań ciągłości, ruchu, transportu energii są rozwiązywane tradycyjnie. Po wyznaczeniu pól prędkości oraz rozkładu ciśnienia przepływu następuje uruchomienie rozwiązania kolejnych równań z modułu *Solver Adjoint*. Ich celem jest uzyskanie zestawu mnożników *Lagrange'a*. W kolejnym kroku obliczana jest funkcja gradientu kształtu. Uzyskanie nowego kształtu następuje poprzez przesunięcie granicy modelu na podstawie oceny jakościowo-ilościowej udziału komórek badanego obszaru w przyjętym kryterium ich oceny. Następnie wraca się do analizy przepływowej. Możliwe jest również na tym etapie zmienienie funkcji kryterialnej lub zadanych parametrów tej funkcji pod warunkiem, że wartość kryterialna jest mniejsza niż pożądany parametr zbieżności. Osiągnięcie zakładanej wartości kryterium pozwala zakończyć pomyśle proces optymalizacji. Proces obliczeniowy z wykorzystaniem równań *Solver Adjoint*, wymaga wydłużenia czasu na prowadzenie badań symulacyjnych mniej więcej o dwa razy.

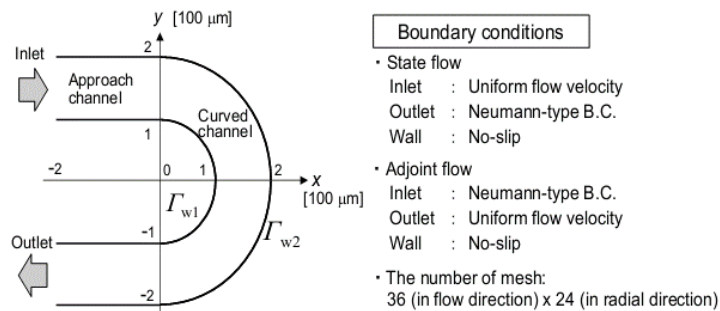
4. Przykłady topologicznej optymalizacji kształtów z wykorzystaniem *Solwera Adjoint*

4.1. Optymalizacja kształtu kolana typu U (180°)

Pierwszym prezentowanym przykładem praktycznego wykorzystania *Solwera Adjoint* jest optymalizacja kształtu i wymiarów kanału przepływowego w kształcie litery U w zakresie stosowności przepływów płynów nieściśliwych. Rozważania prowadzone były dla geometrii 2D. Celem optymalizacji było zminimalizowanie wartości strat ciśnienia dynamicznego w kanale. Warunek ten będzie osiągnięty, gdy jako kryterium optymalizacji przyjmie się liczbę *Reynoldsa* na poziomie nie większym niż 10. Pozostałe założenia analizy przedstawiono na rys. 4.



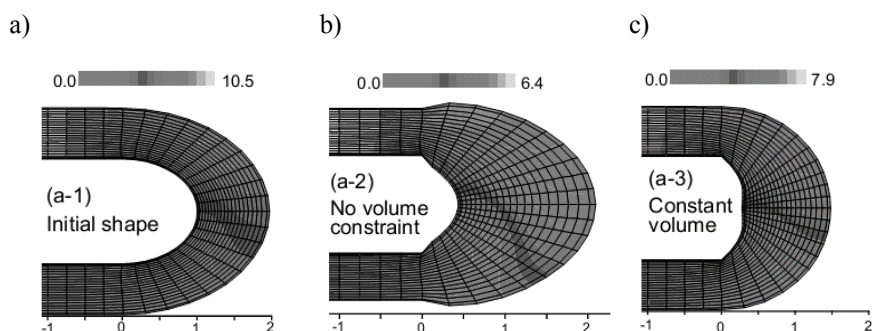
Rys. 3. Schemat topologicznej optymalizacji kształtu [3]



Rys.4. Domena i przyjęte warunki brzegowe dla analizy kształtu mikrokanалу typu U [4]

Szerokość początkowa mikrokanалу wynosiła $100\mu\text{m}$. Zakrzywiona część kanału połączona jest z wlotem i wylotem przy pomocy prostych odcinków. Całkowita liczba elementów wygenerowanej siatki wynosi 864. Granice projektowe zostały przypisane do Γ_{w1} i Γ_{w2} , a zmienne projektowe połączone są z punktami siatki na obu projektowanych granicach. W prowadzonej analizie za bardzo istotny uznano również dodatkowy warunek wynikający z poślizgu między warstwami płynu. Wynika z niego, że kierunek wektora prędkości na wejściu do kanału jest równoległy względem ścian kanału, a poprzeczna składowa prędkości na w tym miejscu jest równa zero.

Wyniki działania *Solvera Adjoint* w prezentowanej analizie przedstawiono na rysunku 5. Przedstawiono na nim obliczeniowe wartości ciśnienia dla początkowo przyjętego kształtu (a), optymalnego kształtu lecz bez uwzględnienia drugiego kryterium za jakie uznano ograniczenie objętości (b) oraz kształt uwzględniający oba kryteria optymalizacji. Nie przyjęcie drugiego kryterium w postaci ograniczenia objętości spowodowało znaczne poszerzenie wymiarów kanału, co wpłynęło znacząco na modyfikację kształtu (rys. 5b).



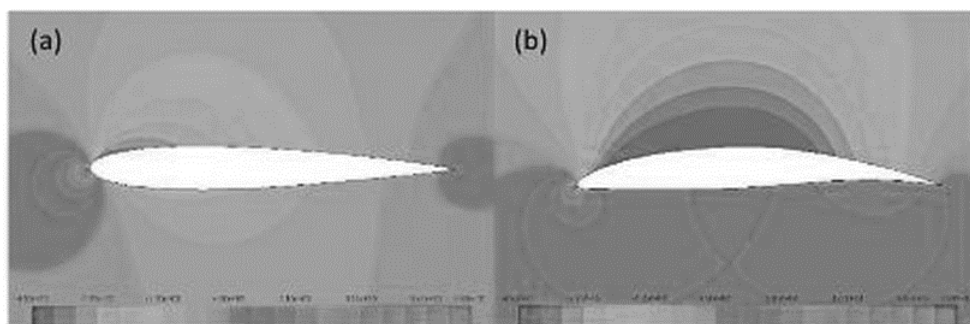
Rys. 5. Rozkład ciśnienia w: a) początkowym kształcie b) ostatecznym kształcie bez ograniczenia objętości, c) optymalnym kształcie z ograniczeniem objętości. Układ odniesienia jest pokazany poniżej każdego kształtu [7]

Szerszy kanał sprawia, że prędkości przepływu są niższe, przez co można osiągnąć duże zmniejszenie spadku ciśnienia. Przy stałym ograniczeniu objętości, zarówno wewnętrznych jak i zewnętrznych powierzchni zakrzywionego kanału w kierunku ujemnym osi X nastąpiło skrócenie kanału przepływowego (rys. 5a). W warunkach stałego ograniczenia objętości funkcja kryterialna jest osiągnięta po 92 iteracjach. Spadek ciśnienia zmniejsza się wówczas o 27,6 % w porównaniu z początkowym kształtem kanału. Brak wprowadzenia drugiego ograniczenia kryterialnego pozwoliło uzyskać bardzo mały spadek ciśnienia w badanym obiekcie bo różnica ciśnień wyniosła około 39,3 % w porównaniu z początkowym kształtem zakrzywienia. Tak duży efekt jest uzyskany kosztem dużego zwiększenia objętości.

4.2. Przykład optymalizacji kształtu profilu lotniczego NACA 0012

Innym przykładem zastosowania metody optymalizacji kształtu jest profil lotniczy NACA 0012 [5, 6]. Proponowana procedura optymalizacji ma na celu określenie głównych warunków przepływu.

Do opisu charakteru przepływu zastosowano model turbulencji k-epsilon (przepływ turbulentny). W prowadzonych obliczeniach stosowano schemat *upwind* drugiego rzędu (*Second-Order Upwind Scheme*). Intensywność turbulencji przyjęto na poziomie 1%, a lepkość turbulentną 1. Kontur pola przepływu ciśnienia wokół płata wyjściowego NACA 0012 przedstawiono na rysunku 6a, w stosunku do profilu zmodyfikowanego z wykorzystaniem metody *Adjoint* rysunek 6b.

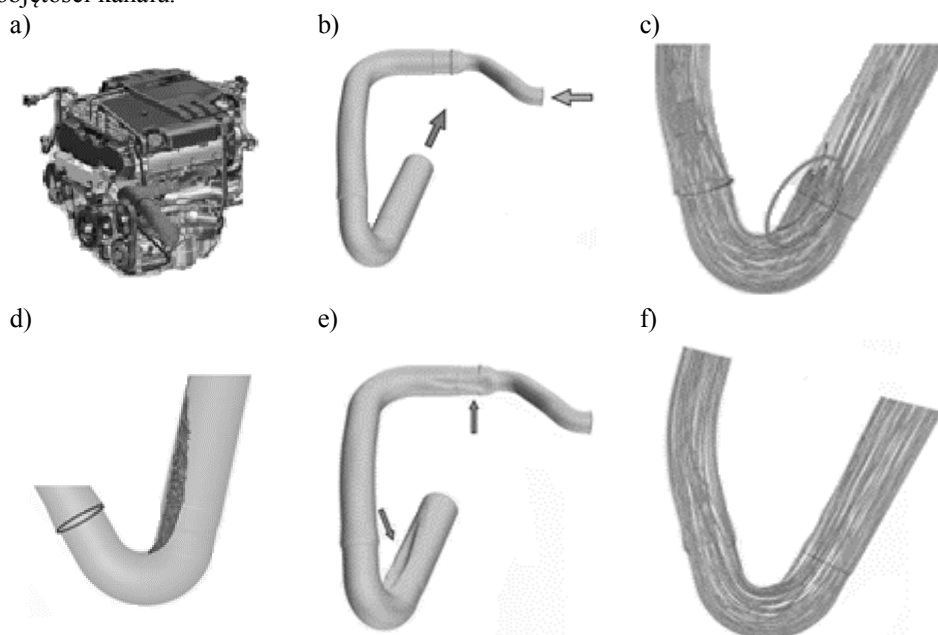


Rys.6. Rozkład ciśnienia wokół profilu NACA 0012 o kształcie bazowym (a) i zoptymalizowanym w wyniku procedury *Adjoint Solver* (b) [7]

Solver Adjoint jest wykorzystywany do prowadzenia inteligentnych zmian konstrukcyjnych kształtu bazowego modelu w procesie projektowania. Przeprowadzone badanie miało na celu ocenę zdolności modułu, by zapewnić szereg zmian konstrukcyjnych w celu poprawy parametrów płata pod względem wydajności przy danym kącie natarcia. Deterministyczny problem optymalizacji zdefiniowany został jako problem minimalizacji współczynnika doskonałości aerodynamicznej wyrażany jako stosunek siły nośnej do oporu (*Lift to Drag ratio*). Odbyło się to poprzez ustawienie w *Solver Adjoint* definicji i podglądu zmiennej nazwanej L/D. W porównaniu do standardowego kształtu, gdzie współczynnik L/D wyniósł 12,43 po optymalizacji uzyskano wartość na poziomie 51,40.

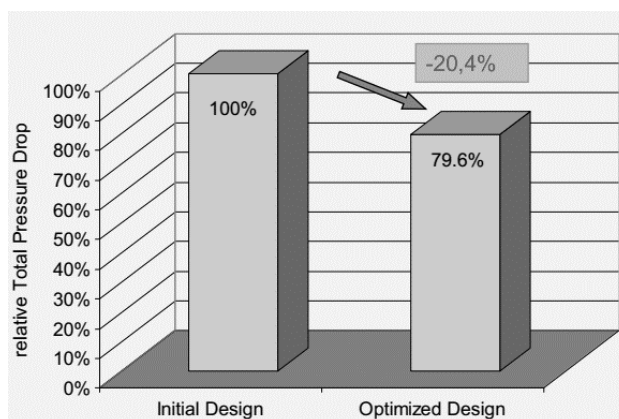
4.3. Przykłady zastosowania w branży samochodowej

Kolejnym przykładem stosowania *Solver Adjoint* jest optymalizacja kształtu kanału cieczy chłodzącej w silniku diesla na odcinku dolotowym do intercoolera (rys. 7). Funkcją ograniczającą był równomierny rozkład ciśnienia. Pierwszym krokiem było zamodelowanie początkowego kształtu kanału (rys. 7b) z zadeklarowanym wlotem i wylotem. Następnie została przeprowadzona analiza przepływowa (rys. 7c), która wykazała miejsca powodujące zakłócenie równomiernego rozkładu ciśnienia wewnątrz kanału. Zastosowanie *Solver Adjoint* prowadzi do modyfikacji początkowego kanału o regularnych kształtach do wyznaczenia nowego kształtu kanału. Na rysunku 7e strzałkami zostały zaznaczone miejsca modyfikacji początkowego kształtu. Docelowe kształty w pewnych miejscach są bardzo nieregularne, dzięki czemu możemy uzyskać równomierny rozkład ciśnienia w całej objętości kanału.



Rys. 7. Kanał cieczy chłodzącej w silniku diesla na odcinku dolotowym do intercoolera: a) lokalizacja kanału w silniku, b) model początkowego kształtu, c) rozkład ciśnienia wewnątrz początkowego kształtu kanału, d) miejsca zakłócające równomierny rozkład ciśnienia, e) zmodyfikowany kształt kanału, f) rozkład ciśnienia wewnątrz kanału

Efektorem zmian kształtu osiągniętego dzięki wykorzystaniu *Solver Adjoint* jest zmniejszenie spadku ciśnienia na badanym odcinku o 20,4 % (rys.8). Tak duży uzyskany efekt ma wpływ na zmniejszenie energii potrzebnej do napędu pompy w obiegu cieczy chłodzącej a w efekcie na zmniejszenie zużycia paliwa przez samochód.



Rys. 8. Wyniki analizy, porównanie całkowitych spadków ciśnienia [7]

6. Wnioski

W artykule przedstawiono innowacyjny sposób projektowania optymalnej topologii obiektów w obszarze numerycznej mechaniki płynów (CFD) przy wykorzystaniu *Solver Adjoint*. Przedstawione przykłady stosowania *Solver Adjoint* wskazują na atrakcyjność metody z punktu widzenia projektowania nowych innowacyjnych produktów spełniających założone kryteria optymalizacji. W efekcie można uzyskać produkt o znacznie lepszych właściwościach niż spotykane do tej pory na rynku. Może to zatem prowadzić do uzyskania przewagi konkurencyjnej.

Głównym parametrem definiującym ostateczną geometrię jest analiza wrażliwości przyjętej funkcji kryterialnej. Proponowane podejście opiera się na wielokrotnych iteracjach, które dzięki zastosowaniu równań sprzężonych pozwalają na automatyczne modyfikowanie geometrii, aż do osiągnięcia rozwiązania zbliżającego się do optymalnego. Takie podejście zmienia proces projektowania z tradycyjnego, w którym to projektant proponuje i modyfikuje kształt i wymiary obiektów na podstawie wniosków z prowadzonych badań na proces w pełni zautomatyzowany i ponadto ukierunkowany na optymalizację według przyjętego kryterium.

Prezentowana procedura wyboru kształtu obiektów przy zastosowaniu równań sprzężonych wykazała, że *Solver Adjoint* umożliwia rozwiązanie wielu różnych problemów dotyczących procesów projektowania, eksploatacji i wytwarzania nowych lepszych produktów.

Literatura

1. Montusiewicz J., Wspomaganie procesów projektowania i planowania wytwarzania w budowie i eksploatacji maszyn metodami analizy wielokryterialnej, Politechnika Lubelska, Lublin 2012, str.16-23

2. Othmer C., Grahs T., Approaches to fluid dynamic optimization in car development process, Evolutionary and Deterministic Method for Design, Optimization and Control with Applications to Industrial and Societal Problems EUROGEN Munich, 2005
3. Soto O., Löhner R., Yang C., An Adjoint-based Design Methodology for CFD Problems, International Journal of Numerical Methods for Heat & Fluid Flow, 14, 6, str. 734-759.
4. Tonomura O., Kano M. Hasebe S., Shape Optimization of Microchannels Using CFD and Adjoint Method, 20th European Symposium on Computer Aided Process Engineering – ESCAPE20 2010.
5. Wade A., Keating M., Petrone G., Shape optimization for aerodynamic performance using adjoint methods, The International Vehicle Aerodynamics Conference 14-15 October 2014
6. Kania W., Mechanika Teoretyczna i Stosowana, vol 21, No. 4, Instytut Lotnictwa Warszawa 1983 str.611-644, ISSN 0079-3701
7. Banchak R., Stephan M., Boehm M., Topology Optimization – Driven Design Development for Automotive Components, Automotive Simulation World Congress 2012

Dr hab. inż. Zbigniew PLUTECKI¹, prof. PO

Mgr inż. Paweł SATTTLER²

Mgr inż. Krystian RYSZCZYK²

¹⁾ Katedra Innowacyjnych Procesów Technologicznych

²⁾ Katedra Elektrowni i Systemów Pomiarowych

Politechnika Opolska

45-758 Opole, ul. Prószkowska 76

tel.: (0-77) 449 80 24

tel.: (0-77) 449 80 23

e-mail: z.plutecki@po.opole.pl

p.sattler@po.opole.pl

k.ryszczyk@po.opole.pl