Nr: 52-IWP-Nr_indeksu-PI-2013

SYMULACJE PRZEPŁYWOWE KOLEKTORA DOLOTOWEGO DLA BOLIDU FORMULA STUDENT

Student: ***Waldemar BAKUNIAK***

Promotor: dr inż. Witold STANKIEWICZ

Poznań, 2015

STRESZCZENIE

Praca zawiera opis procesu obliczeń numerycznych dla przepływu wewnętrznego kolektora dolotowego dla bolidu Formula Student. Badany obiekt został zaprojektowany zgodnie z wytycznymi regulaminu Formula SAE na rok 2015 w trzech wariantach, gdzie jeden z nich zawiera kanały zasysające w rzędzie, natomiast pozostałe ułożone są w wierzchołkach kwadratu. Każdy z wariantów poddano symulacji w programie ANSYS Fluent, przygotowując wcześniej geometrię i siatkę w modułach programu ANSYS. Celem obliczeń przepływowych było sprawdzenie oraz porównanie rozkładu prędkości na końcu każdego kanału, a także sprawdzenie rozkładu ciśnienia na powierzchni elementów. Wnioski wynikające z analizy wizualizacji wykazały, że każdy z wariantów ma swoje zalety i wady, a konstrukcja kolektora zbliżonego do ideału powinna łączyć prostotę technologiczności, z ułożeniem kanałów zasysających w wierzchołkach kwadratu, a także być możliwie najprostsza do wykonania.

SUMMARY

The work contains description of the process of computational fluid dynamics for internal flow of intake manifold for Formula Student car. The examinated object was designed with regulations of 2015 Formula SAE rules, and it was created in three versions, where one of it has the runner inlets in the row, the others have that inlets placed in apex of square. Each model was simulated in ANSYS Fluent, where geometry and mesh were prepared in modules of ANSYS software. The target of simulation was to check and compare the distribution of velocity in cross section at the end of the runners and the distribution of pressure at surfaces of intake manifold. The results from visualization analyses showed, that each of versions has it own advantages and disadvantages. Construction of intake manifold which is close as most as possible to ideal one should merge technological simplification with placement of runner inlets in the apex of square and it should be as simple as it can be to manufacture.

Serdeczne podziękowania dla firmy MESco
za udostępnienie oprogramowania ANSYS
do prowadzenia badań przepływowych

SPIS TREŚCI

1. WSTĘP 1

1.1. Wprowadzenie 1

1.2. Cel i zakres pracy 1

2. BADANY OBIEKT - KOLEKTOR DOLOTOWY 2

2.1. Kolektor dolotowy wg regulaminu 2015 Formula SAE 2

2.2. Koncepcja 3

2.3. Modele koncepcyjne 5

2.4. Wlot do kanału typu bellmouth 7

3. OPIS ZJAWISK W PRZEPŁYWIE – PODSTAWY TEORETYCZNE 9

3.1. Przepływ 9

3.2. Równania ciągłości i Naviera-Stokesa 9

3.3. Równania uśrednione w czasie – RANS 9

3.3.1. Model Spallart-Allmaras 10

3.3.2. Model k-ε 10

3.3.3. Model k-ω 10

3.3.4. Metody wielkich wirów – LES 10

3.3.5. Metody hybrydowe – LES-RANS 11

3.4. Wybór modelu obliczeniowego 11

4. TEORIA PRZYGOTOWANIA MODELU DO OBLICZEŃ 12

4.1. Rodzaje elementów 12

4.2. Rodzaje siatek 13

4.3. Metoda triangulacji Delaunay'a 13

4.4. Metoda postępującego frontu 14

5. PRAKTYCZNE PRZYGOTOWANIE MODELU DO OBLICZEŃ 15

5.1. Model domeny obliczeniowej 15

5.2. Import geometrii do pakietu ANSYS 15

5.3. Generacja siatki obliczeniowej 17

6. SYMULACJA PRZEPŁYWU W PROGRAMIE ANSYS FLUENT 19

7. WYNIKI 23

8. PODSUMOWANIE 32

Literatura 33

1. WSTĘP

1.1. Wprowadzenie

Poznanie zjawisk fizycznych otaczającego nas świata jest podstawą do zaspokajania potrzeb człowieka w odpowiedni sposób. Od niepamiętnych czasów ciekawość prowadziła do wielu odkryć i wielokrotnie zmieniała bieg historii. Ta cecha naszego gatunku często skutkowała sytuacjami niebezpiecznymi lub pożerała spore zasoby materiałowe, jak również ludzkie. Gdy użycie komputerów rozpowszechniło się wśród inżynierów i badaczy, nastąpiło gwałtowne ułatwienie i przyspieszenie badań. Należy zaznaczyć, iż metody numeryczne zostały sformułowane przed erą komputerów, jednak dopiero teraz jesteśmy w stanie wykorzystać ich potencjał. Metody numeryczne w połączeniu z mocą jednostek obliczeniowych spowodowały nagły rozwój wielu dziedzin życia, tego codziennego, jak również inżynieryjnego i naukowego. Jedną z tych dziedzin inżynieryjnych jest mechanika płynów, a metoda zwana Computational Fluid Dynamics (CFD – Komputerowa Mechanika Płynów) używa jednostek obliczeniowych do badania przepływu wewnątrz lub wokół badanego obiektu.

Fundamentem obliczeń CFD są techniki dyskretyzacji np.: metoda elementów skończonych (MES), metoda różnic skończonych (MRS), metoda objętości skończonych, a także rozwiązywanie równań różniczkowych opisujących przepływ. Zanim nastąpi start obliczeń badanego obiektu należy stworzyć siatkę opisującą domenę przepływową, co jest zagadnieniem równie złożonym jak same obliczenia. Wyniki uzyskane tą drogą dostarczają wielu informacji do zrozumienia zjawisk oraz ulepszania poszczególnych elementów, ale warto zaznaczyć, że CFD jest metodą pośrednią. Do jej uzupełnienia nadal wykorzystuje się metody teoretyczne i doświadczalne, m.in. badania w tunelu aerodynamicznym. Dzięki wykorzystywaniu metod komputerowych obniża się koszty oraz czas wykonania projektu.

Komputerowe obliczenia przepływów będą pomocne w projekcie jednomiejscowego bolidu wg zasad Formula SAE na rok 2015. Badania dla kolektora dolotowego i wylotowego oraz analizy przepływu wokół całego samochodu określą kierunek rozwoju danych elementów. Bolidy Formula SAE budowane są przez studentów z całego świata wielokrotnie będąc przykładem pomysłowego i oryginalnego podejścia do wielu tematów. Grupa studentów Politechniki Poznańskiej zamierza uczestniczyć w zawodach w 2015 roku pod nazwą PUT Motorsport. Postęp prac zespołu można śledzić na stronie www.motorsport.put.poznan.pl lub na portalu Facebook https://www.facebook.com/put.motorsport .

1.2. Cel i zakres pracy

Celem pracy jest symulacja przepływu powietrza wewnątrz geometrii kolektora dolotowego dla bolidu Formuła Student wg zasad Formula SAE. Zakres pracy obejmuje:

– omówienie zasad dotyczących konstrukcji i geometrii kolektora dolotowego,
– opis koncepcji kolektora dolotowego,
– symulacje przepływowe geometrii dla zadanych warunków brzegowych,
– wizualizację wyników.

Wykonanie postawionych celów pracy wiąże się ponadto z koniecznością stworzenia siatki przepływowej dla modelu obliczeniowego, a także zapoznaniem się ze sposobami prowadzenia obliczeń, interpretacji wyników wraz z ich wizualizacji.

2. BADANY OBIEKT - KOLEKTOR DOLOTOWY

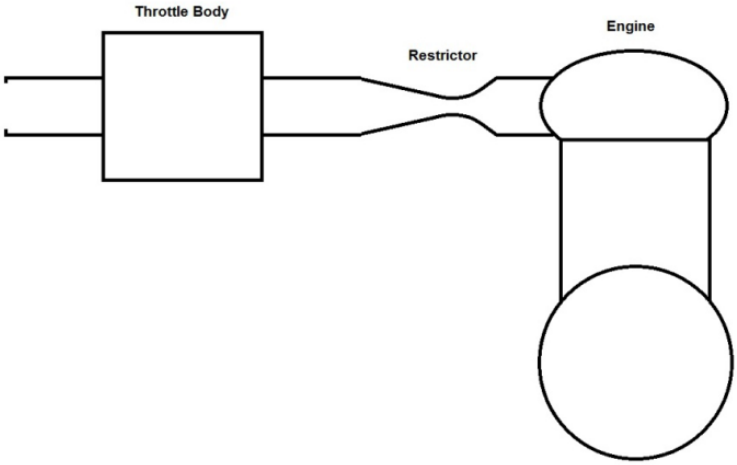
Uzyskanie jak najlepszych wskaźników pracy silnika spalinowego skupiało uwagę konstruktorów i badaczy od pierwszych lat od jego powstania. Początkowo wyrażało się to dążeniem do zwiększania mocy i sprawności ogólnej silnika. W miarę upływu czasu prace stały się bardziej złożone i dotyczyły większej liczby parametrów roboczych silnika. Podstawowym problemem pozostała jednak poprawa napełnienia cylindra czynnikiem roboczym - powietrzem. Najprostszym sposobem zwiększenia ilości powietrza w cylindrze jest wprowadzenie ładunku pod zwiększonym ciśnieniem i w niezmienionej temperaturze, co powoduje zwiększenie jego gęstości, a tym samym masy w cylindrze. Zabieg ten przyjęło się nazywać doładowaniem, a więc zwiększeniem napełnienia cylindra. Parametry dolotowe silnika znacznie skuteczniej wpływają na współczynnik napełnienia niż parametry wylotu. [11]

Kolektor dolotowy silnika to element doprowadzający dowolny czynnik gazowy lub ciekły do dowolnej maszyny lub urządzenia. Podstawowe zadania kolektora dolotowego:

– połączenie urządzeń pomocniczych z silnikiem,
– odpowiednie zmiany parametrów przepływu,
– odpowiednie zmiany parametrów pracy silnika (moc, moment obrotowy).

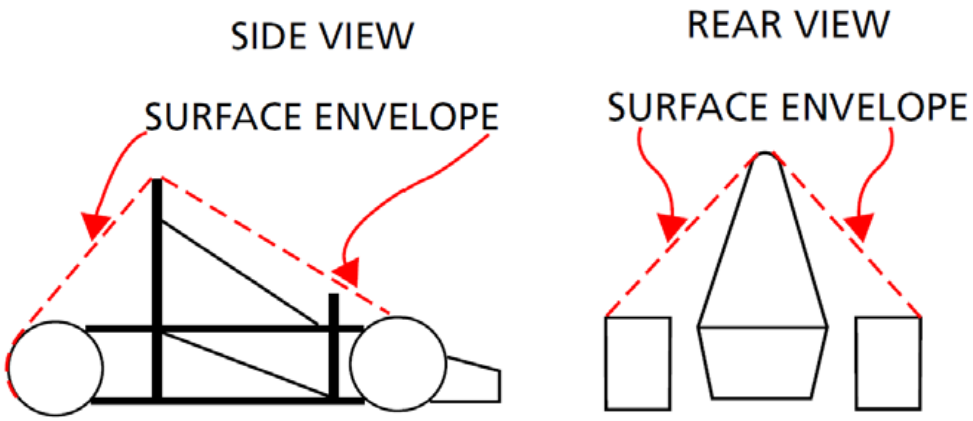
2.1. Kolektor dolotowy wg regulaminu 2015 Formula SAE

W związku z ograniczeniem mocy silnika nałożonym w regulaminie zawodów w układzie dolotowym jest konieczne umieszczenie zwężki (przekrój okrągły) o średnicy 20mm. Jedynie przez nią powietrze może być dostarczane do silnika. Między zwężką, a silnikiem dozwolone jest dodanie komory objętościowej (plenum), która sprzyja doładowaniu silnika w powietrze na zasadzie różnicy ciśnień.



Rys. 1. Schemat układu dolotowego wg regulaminu FSAE: przepustnica (throttle body) – zwężka(restrictor) – silnik (engine)
[2015 Formula SAE® Rules]

Drugim ograniczeniem wynikającym z regulaminu jest umieszczenie kolektora dolotowego. Wymagane jest, aby znajdował się w przestrzeni ograniczonej przez płaszczyzny styczne do pałąka głównego (main hoop) i jednocześnie styczne do opon w widoku z boku (side view), a w widoku z tyłu (rear view) do krawędzi zewnętrznej. W ten sposób powstaje przestrzeń ograniczona powierzchniami (surface envelope), gdzie może zostać umieszczony kolektor dolotowy.



Rys. 2. Dopuszczalne umieszczenie kolektora dolotowego w bolidzie Formula Student [2015 Formula SAE xRules].

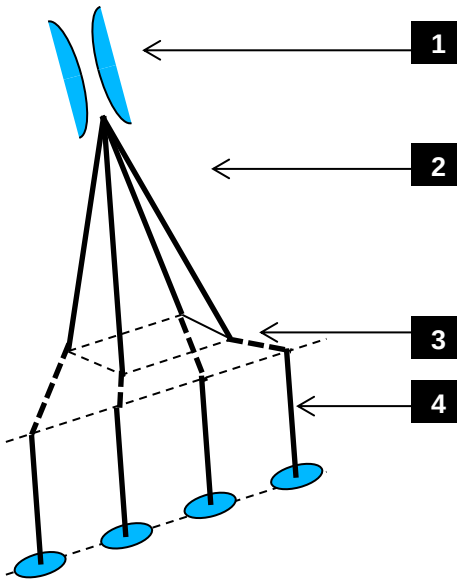
Kolektor dolotowy z racji swojej specyfiki oraz ograniczeń regulaminowych jest elementem, który musi zostać opracowany i zbudowany od podstaw. W związku z tym ustalono następujące założenia:

– zaprojektowanie kolektora dolotowego dla silnika Honda CBR 600 z 2011r.,
– silnik pracuje z kolejnością cylindrów 1-2-4-3
– wykorzystanie zwężki z przepustnicą firmy AT Power przeznaczona specjalnie do bolidów Formula Student,
– szyjka za przepustnicą,
– komora objętościowa (plenum) o objętości ok. 4,7l,
– droga przepływającego powietrza od wlotu przed przepustnicą do komory silnika o jednakowej długości i geometrii,
– średnica przekroju poprzecznego kanału 40mm, grubość ścianki 1-2mm
– zastosowanie wlotów do kanałów tzw. bellmouth,
– wymiary geometryczne szyjki na podstawie oprogramowania do symulacji pracy silnika.

Powyższe założenia projektowe mają na celu uzyskanie równomiernej pracy silnika. Do każdego cylindra powietrze powinno dostawać się w sposób podobny do siebie i możliwie z najmniejszymi stratami energii. Równa praca na każdym cylindrze przekłada się na przedłużenie żywotności silnika, a także poprawę parametrów mocy i momentu w całym zakresie jego pracy.

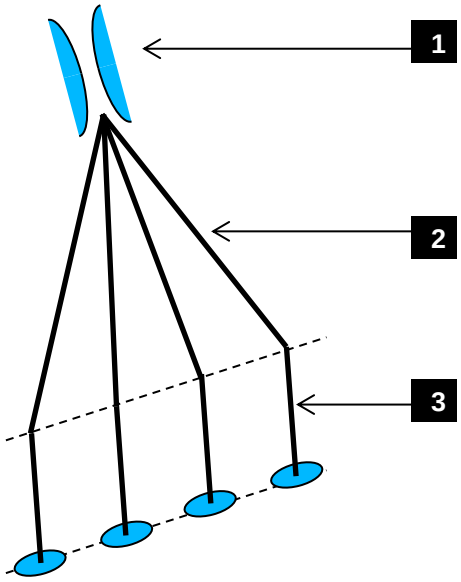
2.2. Koncepcja

Do uzyskania równej pracy silnika należy zaprojektować kolektor dolotowy w taki sposób, aby droga przepływającego powietrza począwszy od wlotu przed przepustnicą do końca każdego kanału była równa lub o bardzo zbliżonych wartościach. Schemat koncepcyjny (rysunek 3) ukazuje w jaki sposób można spełnić ten warunek. Z własności ostrosłupa wynika, że każda z krawędzi łącząca wierzchołek ostrosłupa z wierzchołkiem podstawy jest równej długości. Ten sam efekt można uzyskać, gdy ostrosłup zastąpi się stożkiem. Ta własność będzie wykorzystana do stworzenia plenum (rysunek 3, pkt. 2). Równoległe kanały o jednakowej geometrii (rysunek 3, pkt. 4) mają równą długość, o tyle linie kreskowe zaznaczone na rysunku 2 mają w takim układzie różne długości. Tworząc model w oprogramowaniu CAD należy ustawić plenum względem kanałów wykonując jej obrót.



Rys. 3. Schemat geometrii kolbowego kolektora dolotowego: 1 – zwężka, 2 – plenum, 3 – kanały o możliwie jednakowej długości i geometrii, 4 – równoległe kanały do cylindra o jednakowej geometrii. [opracowanie własne]

Częściej jednak spotyka się rozwiązania, gdzie wloty z plenum do kanałów prowadzących do cylindrów również są ustawione w rzędzie, a wlot powietrza ustawiony jest pionowo lub poziomo. Charakteryzują się one różną długością i geometrią drogi, którą musi przebyć powietrze do cylindra, co może powodować straty w dostarczaniu odpowiedniej ilości powietrza potrzebnego do spalenia paliwa. Jednakże to rozwiązanie cechuje się o wiele prostszą technologią wykonania ze względu na możliwe maksymalne uproszczenie geometrii poszczególnych elementów.



Rys. 4. Schemat geometrii rzędowego kolektora dolotowego z rzędowym ułożeniem wlotów: 1 – zwężka, 2 – plenum, 3 – równoległe kanały do cylindra o jednakowej geometrii i długości. [opracowanie własne]

2.3. Modele koncepcyjne

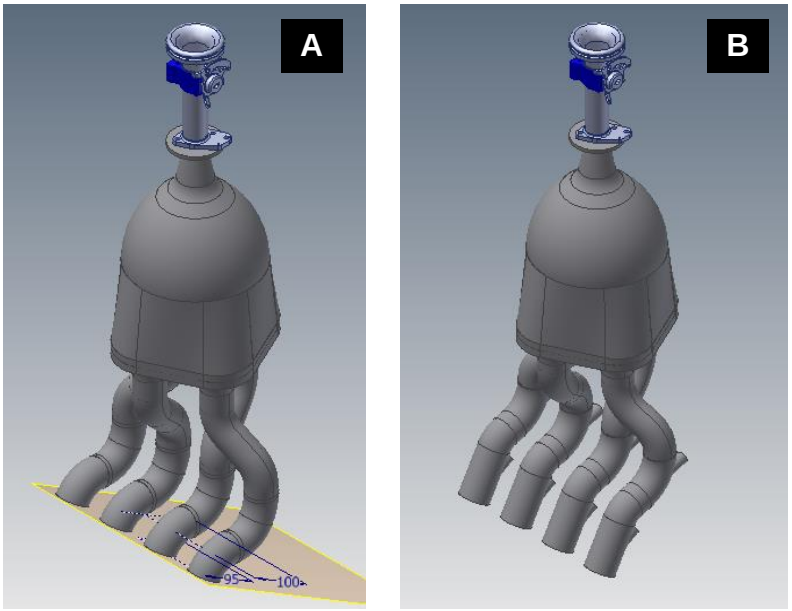
Modele koncepcyjne kolektora dolotowego zostały wykonane za pomocą oprogramowania Autodesk Inventor 2014. Powstały dwa warianty jednej koncepcji. Pierwszy obrazuje kierunek tworzenia poszczególnych elementów kolektora, gdzie uwzględniono wstępne parametry geometryczne wynikające z oprogramowania do symulacji silnika. Drugi zbiera wszystkie wyliczone dane zmieniając długość drogi od wlotu z plenum do końca kanału, co przekłada się na zmiany geometryczne tego fragmentu.

Wariant pierwszy:

– geometria plenum złożona z prostych kształtów,
– skrócona szyjka,
– objętość plenum zbliżona do 4,7 litra,
– za mało miejsca na gniazda wtrysków;

Wariant drugi:

– brak zmian plenum,
– zmieniona geometria kanałów dopływowych,
– zaznaczone miejsca gniazd wtrysków,
– długość kanałów dopływowych zbliżona do założeń projektowych



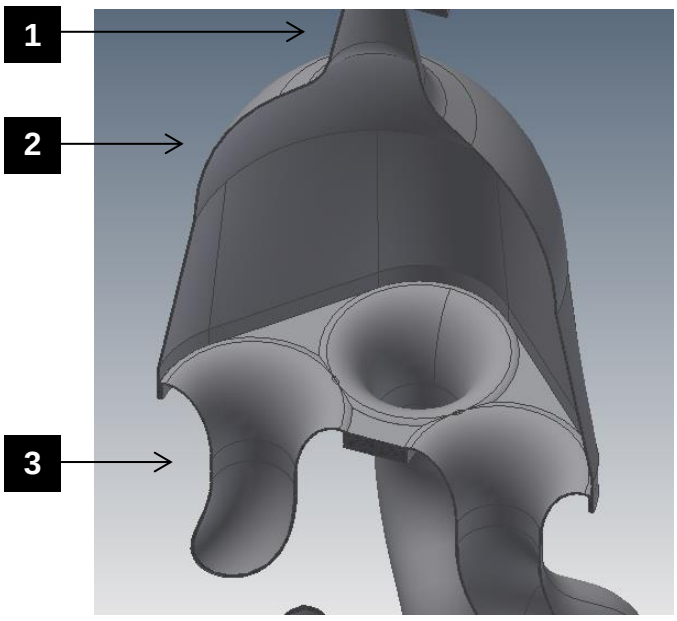
Rys. 5. Modele koncepcyjne kolektora dolotowego:
a) wariant pierwszy c) wariant drugi (model mieszczący się w założeniach projektowych). [opracowanie własne]

Tabela 1. Porównanie geometrii koncepcyjnych kolektora dolotowego.

	Pierwszy wariant	Drugi wariant
Objętość plenum [l]	4,79	4,79
Długość kanałów zewnętrznych (1,4) [mm]	291,929	303,861
Długość kanałów wewnętrznych (2,3) [mm]	292,155	304,094
Różnica długości między kanałami zewnętrznymi, a wewnętrznymi [mm]	0,226	0,233

Dla pierwszego wariantu długość kanałów miała być zbliżona do 300mm, natomiast dla drugiego do 310mm, niestety z racji ograniczeń regulaminowych i trudności z wyprofilowaniem kanałów są krótsze o ok. 8 mm dla pierwszego, a dla drugiego o ok. 6mm.

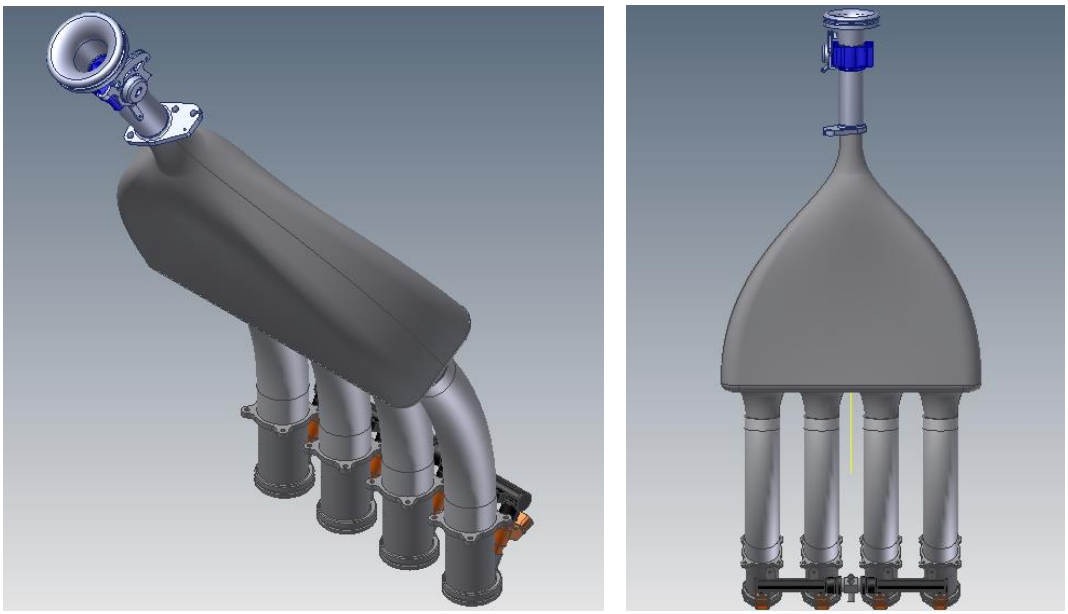
Wnętrze komory objętościowej nie przewiduje dodatkowych kierownic wpływających na zmianę kierunku przepływu do odpowiednich kanałów. Na dnie plenum znajdują się wloty typu bellmouth do kanałów doprowadzających powietrze do cylindrów.



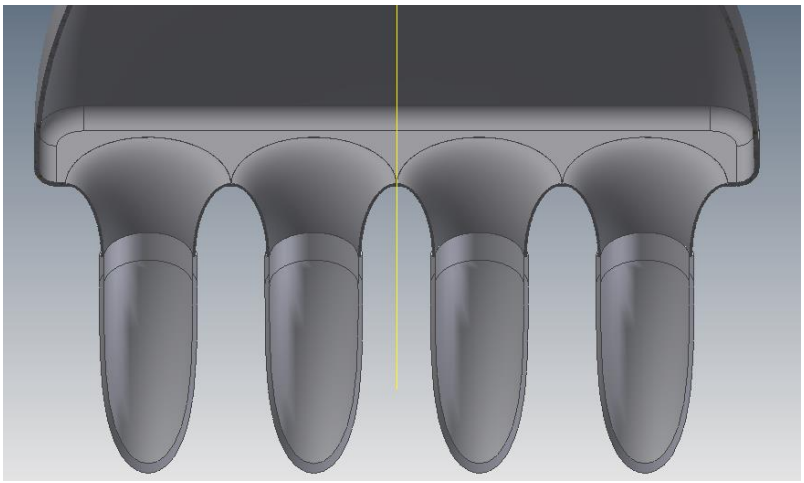
Rys. 6. Przekrój wzdłuż średnicy przeciwległych wlotów ukazujący wnętrze plenum. [opracowanie własne]

Do porównania został opracowany model z ułożeniem rzędowym wlotów w plenum. O możliwości prostszego wykonania świadczą kanały dolotowe, które są delikatnie wygiętymi okrągłymi rurami, a plenum (tutaj z zamiarem laminowania z włókna węglowego) można zastąpić elementem spawanym z blach aluminiowych uzyskując podobny efekt.

O ile długość kanałów z plenum do cylindrów jest identyczna pod względem długości (310,16mm) i geometrii, o tyle dla tego rodzaju kolektora dolotowego przestrzeń zasysanego powietrza jest zdecydowanie inna, a konieczność odchylania strużki wpadającego powietrza do zewnętrznych kanałów może powodować znaczne różnice na końcu poszczególnych kanałów.



Rys. 7. Model koncepcyjny kolektora dolotowego z rzędowym ułożeniem wlotów w plenum – wariant trzeci. [opracowanie własne]



Rys. 8. Przekrój pokazujący wnętrze plenum z wlotami bellmouth. [opracowanie własne]

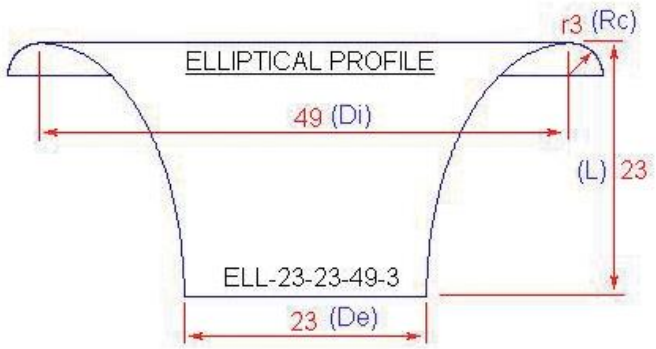
2.4. Wlot do kanału typu bellmouth

Konstrukcja wlotu przewodu wlotowego silnika spalinowego jest tematem, który nigdy nie zajmuje dużo miejsca w literaturze technicznej. Można dojść do wniosku, że nienaturalnym jest, aby temat nie miał jakiegokolwiek realnego znaczenia. Ten punkt widzenia, dobry lub zły, jest sprzeczny z działaniami podejmowanymi przez projektantów samolotowych turbin gazowych, którzy włożyli wiele wysiłku, eksperymentalnie i teoretycznie, do zaprojektowania krawędzi przepływu. [8]

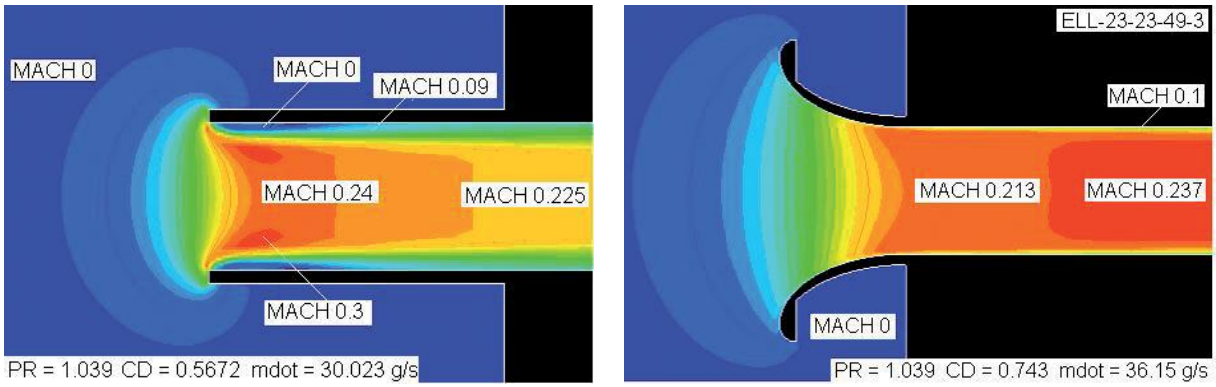
W konstrukcji kolektora dolotowego użyto wlotu o profilu eliptycznym, gdzie średnica kanału (De) jest równa wysokości wlotu (L), a średnica wlotu (Di) jest 2,13 razy większa od średnicy kanału. Półoś mała elipsy jest równa:

$$a = \frac{Di - De}{2} \tag{2.1}$$

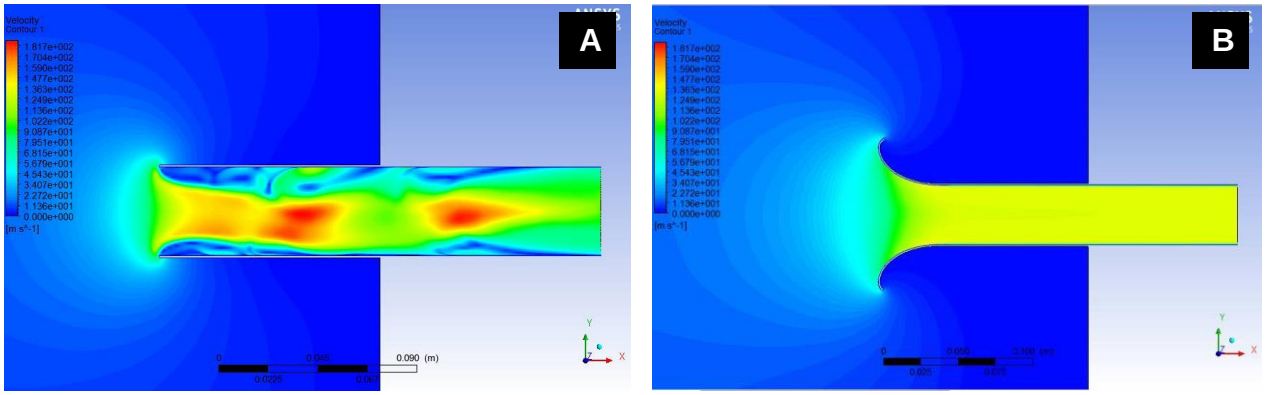
Półoś wielka elipsy jest równa długości L. Zaokrąglenie zewnętrzne (Rc) przyjmuje wartość 0,1 De, zaokrąglając w górę, jednak w konstrukcji kolektora to zaokrąglenie nie będzie wykonane.



Rys. 9. Rysunek przekroju wlotu typu bellmouth o profilu eliptycznym. [8]



Rys. 10. Porównanie rozkładu prędkości wlotów do kanału wg artykułu „Best bells” [8]



Rys. 11. Symulacja 2D zasysania powietrza przez kanał: a) kanał prosty, b) kanał z wlotem o przekroju eliptycznym; Różnica ciśnienia: 10 kPa (między otoczeniem, a końcem kanału)
Symulacja z użyciem bezpośredniego rozwiązywania równania Naviera-Stokesa (laminar), ANSYS FLUENT [opracowanie własne]

Projekt geometrii wlotu do kanału nie jest trudnym zadaniem do optymalizacji przepływu, a także nie jest rzeczą niezbędną przy dostarczaniu powietrza do silnika. Wlot eliptyczny pozwala na minimalizację strat energii wewnątrz kanału, co bezpośrednio przekłada się na mniejszą pracę potrzebną do zassania powietrza. Biorąc pod uwagę wszystkie czynniki wpływające na podwyższenie wartości mocy silnika, gdzie każdy koń mechaniczny w sporcie motorowym ma znaczenie wygranej lub porażki, warto rozważyć odpowiednie zaprojektowanie tego elementu.

3. OPIS ZJAWISK W PRZEPŁYWIE – PODSTAWY TEORETYCZNE

3.1. Przepływ

Encyklopedia Powszechna PWN opisuję turbulencję jako „zjawisko polegające na występowaniu w przepływie nieuporządkowanych, przypadkowych ruchów elementów płynu; pojawia się, gdy liczba Reynoldsa przekroczy wartość krytyczną, przy której przepływ laminarny traci stateczność i staje się przepływem turbulentnym". Większość przepływów ma charakter turbulentny. Zarówno opływ samolotu, samochodu, czy budynku powoduje powstawanie się charakterystycznych struktur tego przepływu: powstawaniem wirów i innych koherentnych struktur, oderwania się strugi, jak również zjawiska mieszania [1]. Przepływy wewnętrzne m.in. w silnikach czy turbinach są bardzo turbulentne.

Przepływ turbulentny charakteryzuje się:

– nieregularnością – (losowość, chaotyczność) w jego skład wchodzą różnej wielkości wiry, pochodzące od geometrii przepływu,

– dużą wartością liczby Reynoldsa,

– trójwymiarowością – przepływ turbulentny zawsze tworzy struktury trójwymiarowe, czasami przy równaniach uśrednionych w czasie można traktować przepływ jako dwuwymiarowy,

– rozpraszaniem się – energia kinetyczna w małych wirach jest przekształcana w wewnętrzną energię; większe wiry przekazują energię mniejszym (proces kaskadowy),

– posiadaniem ośrodka ciągłego (kontinuum) – małe skale turbulentne są nadal większe od skali molekularnej. [2]

3.2. Równania ciągłości i Naviera-Stokesa

Wykorzystując techniki komputerowe istnieje potrzeba odpowiedniego opisu z pozoru chaotycznego opływu ciał płynem lepkim, nieściśliwym. W tym celu wykorzystuje się równania ciągłości (2.1) oraz równania Naviera-Stokesa (2.2). Równania te pozwalają na wyznaczenie pola prędkości przepływu, a także rozkład ciśnienia.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial (\rho u_i)}{\partial x_i} = 0 \tag{3.1}$$

$$\frac{\partial (\rho u_i)}{\partial t} + \frac{\partial (\rho u_i u_j)}{\partial x_j} = -\frac{\partial \rho}{\partial x_i} + \mu \frac{\partial^2 u_i}{\partial x_j^2} + \rho b_i \,, \quad i,j = 1,2,3 \ldots \tag{3.2}$$

Bezpośrednie zastosowanie równań wiąże się z problemami wygenerowania bardzo gęstej siatki. Z hipotezy K41 Kołmogorowa wynika, że najmniejsze wiry występujące w przepływie mają wielkości rzędu 0,1-1,0 mm. Z tego powodu użycie równań Naviera-Stokesa ogranicza się do prostych konfiguracji i małych liczb Reynoldsa [2].

3.3. Równania uśrednione w czasie – RANS

Równania RANS (Reynolds-Averaged Navier-Stokes) to metoda modelowania turbulencji przepływu. Modele wyprowadzane są z równań Naviera-Stokesa dla przepływu nieściśliwego, przy wielkościach uśrednionych w czasie.

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} + \frac{\partial \bar{u}_i \bar{u}_j}{\partial x_j} = b_i + \frac{1}{\rho} \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} \,, \quad i,j = 1,2,3 \ldots \tag{3.3}$$

Największym problemem napotykanym przy rozwiązywaniu równań tą metodą jest występujący tensor τ_{ij}, powodujący powstanie równań niedomkniętych poprzez dodanie dodatkowych niewiadomych.

Uzupełnia się je równaniami wiążącymi tensor naprężeń z jego składowymi. Składowe tensora są naprężeniami turbulentnymi, zwanymi inaczej naprężeniami Reynoldsa, natomiast tensor naprężeń oznacza naprężenia występujące w płynie. Różnice między modelami są skutkiem dodawania różnych równań uzupełniających. [3]

3.3.1. Model Spallart-Allmaras

Model z jednym równaniem dodatkowym (pochodzący od modelu Prandtla) zaproponowali Spalart i Allmaras [4], gdzie współczynnik lepkości turbulentnej obliczany jest przez rozwiązanie dodatkowego równania różniczkowego (równanie transportu jest rozwiązywane dla zmiennej lepkości). Warunki brzegowe określone są przez określenie wartości lepkości (na ścianach wartość równa 0). Używany w aeronautyce.

3.3.2. Model k-ε

Jedną z najbardziej popularnych w praktyce inżynierskiej metod jest metoda k-ε. Jest to model z grupy RANS, w którym dodatkowymi równaniami różniczkowymi są równania bilansu energii kinetycznej i dyssypacji energii kinetycznej. Zaletą stosowania tej metody, a jednocześnie powodem, dla której metoda ta jest tak często stosowana, jest możliwość korzystania na komputerach jednoprocesorowych. Model ten służy do obliczania przepływów turbulentnych dla płynów nieściśliwych o małych prędkościach. Chou (1945), Davidov (1961) oraz Harlow i Nakayama (1968) jako pierwsi przyczynili się do powstania modelu k-ε. Ciągły rozwój doprowadził do powstania różnych odmian tego modelu, np. : Standard [5], RNG [6] i Realizable [7].

3.3.3. Model k-ω

Model k-ω opracowywali niezalenie Saffman (1970) i Kołmogorow (1942) [3], dalej rozwijał go Wilcox. Standardowy model k-ω jest empirycznym modelem opartym na równaniu transportu energii kinetycznej turbulencji (k) i wirowości (ω). Model SST k-ω ten zaproponowany został przez F.R. Mentera (1993). Początkiem dla rozwoju modelu SST była potrzeba dokładnego przewidywania lotniczych przepływów z silnymi przeciwnymi gradientami ciśnienia oraz oderwaniem. Przez dekady, dostępne modele turbulentne konsekwentnie nie potrafiły obliczać tych przepływów. W szczególności, popularny model k-ε nie był zdolny wychwycić odpowiednich zachowań turbulentnych warstwy przyściennej aż do oderwania. Model Johnson-King był pierwszym sformułowaniem, które pozwalało na dokładne przewidzenie oderwań w profilach lotniczych. Niestety, z powodu jego algebraicznego sformułowania, nie był on łatwo rozszerzalny dla nowoczesnego trójwymiarowego równania Naviera-Stokesa.

3.3.4. Metody wielkich wirów – LES

Symulacja dużych wirów (Large Eddy Simulation – LES) jest numeryczną metodą modelowania turbulencji wykorzystywana do rozwiązywania równań różniczkowych regulujących przepływ turbulentny płynu. Polega on na przestrzennym uśrednianiu pola przepływu. W metodzie tej równania dynamiki płynów Naviera-Stokesa służą jedynie do modelowania dużych wirów oddziaływujących na obiekt w skali globalnej, które zależą od konfiguracji badanego przepływu, warunków brzegowych. Mniejsze wiry, działające w sferze lokalnej są uwzględniane przez wprowadzenie odpowiednich submodeli (Sub-grid Scale – SGS), mniejszych niż przyjęta siatka dyskretyzacyjna. Badania nad tą metodą prowadził już w 1963 roku Joseph Smagorinsky [7]. Jego model zaczął być stosowany w komputerowych symulacjach przepływów turbulentnych począwszy od lat 70-tych.

3.3.5. Metody hybrydowe – LES-RANS

Stosując metodę symulacji wielkich wirów możemy napotkać problemy w obszarach przyściennych. Wymusiło to opracowanie modeli które połączyłyby zalety metody LES oraz metody RANS w problematycznych obszarach. W ten sposób zrodziły się np. metody Detached-Eddy Simulations (DES) i Limited-Numerical Scales (LNS). Model DES opiera się na wykorzystani w warstwach przyściennych metody RANS oraz modelu turbulencji Spalart-Allmaras a resztę przepływu rozwiązuje metoda LES. Dzięki temu zmniejsza się zagęszczenie siatki w warstwie przyściennej.

3.4. Wybór modelu obliczeniowego

Przepływy turbulentne charakteryzują się fluktuacją pól prędkości. To mieszanina przypadkowych, nie dających się przewidzieć wahań wielkości takich jak pęd, energia i koncentracja poszczególnych wielkości. Wahania mogą mieć małą skalę i wysoką częstotliwość, więc są one zbyt kosztowne obliczeniowo w procesie symulacji bezpośredniej w praktycznych obliczeniach inżynierskich. Zamiast chwilowych (dokładnych) regulujących równań mogą być one uśrednione dla czasu, uśrednione w zestawie lub w inny sposób manipulowane w celu usunięcia małej skali, uzyskując zmodyfikowane równania, które obliczeniowo są mniej kosztowne do rozwiązania. Jednakże zmodyfikowane równania zawierają dodatkowe nieznane zmienne i potrzebne są modele turbulencji, w celu ustalenia tych zmiennych w kontekście znanych wartości. Program ANSYS Fluent pozwala na użycie modeli:

– Spalart-Allmaras (jedno równanie dopełniające),
– k-epsilon (dwa równania dopełniające)
– k-omega (dwa równania dopełniające),
– LES;

Aby dokonać odpowiedniego wyboru modelu dla konkretnego przypadku, trzeba poznać możliwości i ograniczenia w wielu aspektach. Wybór modelu turbulencji zależy bezpośrednio od: fizycznego aspektu przepływu, wymaganego poziomu dokładności, dostępnych zasobów obliczeniowych oraz czasu potrzebnego do symulacji. Na potrzeby badań przepływowych kolektora dolotowego wybrano najczęściej stosowane modele (również w przemyśle) dla przepływu wewnętrznego. Są to modele zawierające dwa równania dopełniające: k-epsilon, k-omega oraz k-omega SST. Ich porównanie przedstawia tabela 3.

Tabela 2. Porównanie modeli z dwoma równaniami dopełniającymi

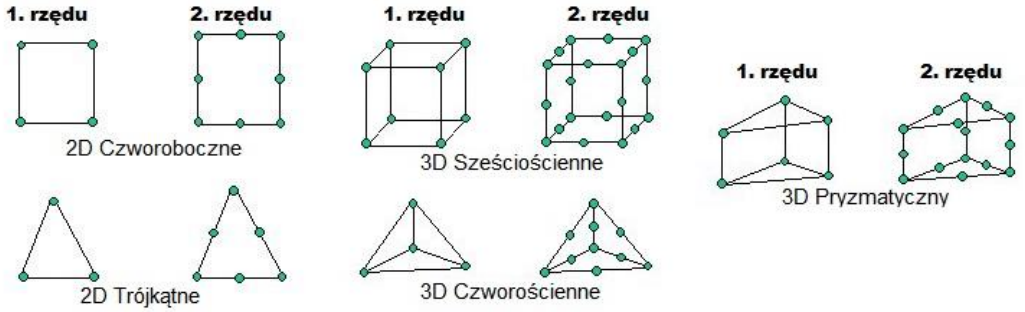
k-epsilon	**k-omega**	**k-omega SST**
k – energia kinetyczna turbulencji		
ε – skala turbulencji (dyssypacja)	ω – stosunek $\frac{k}{\varepsilon}$ (wirowość)	połączenie modeli k-ε i k-ω
przepływ w pełni turbulentny	przepływ laminarno-turbulentny	Przepływ laminarno-turbulentny

Do symulacji przepływu wybrano model k-omega SST, gdyż k-epsilon nie jest zdolny wychwycić odpowiednich zachowań turbulentnych warstwy przyściennej aż do oderwania. [12].

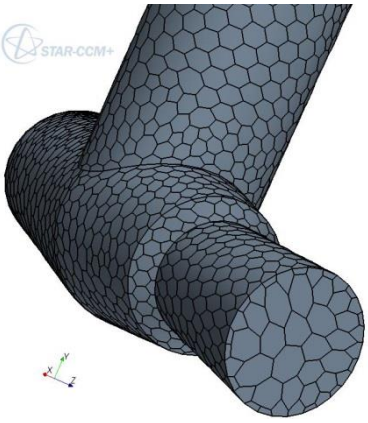
4. TEORIA PRZYGOTOWANIA MODELU DO OBLICZEŃ

4.1. Rodzaje elementów

Elementy dyskretyzacji przestrzeni przepływu można podzielić w zależności od rozpatrywanego przypadku na dwu- lub trójwymiarowe elementy, a także w zależności od ich rzędu (pierwszego lub drugiego). Rodzaje elementów 2D i 3D przedstawia rysunek 12. Z kolei rysunek 13 przedstawia elementy wielościenne (polyhedral) używane coraz częściej w badaniach przepływowych jak również w badaniach dotyczących własności samej siatki. Do wygenerowania siatki typu polyhedral potrzebna jest baza z elementów czworościennych.



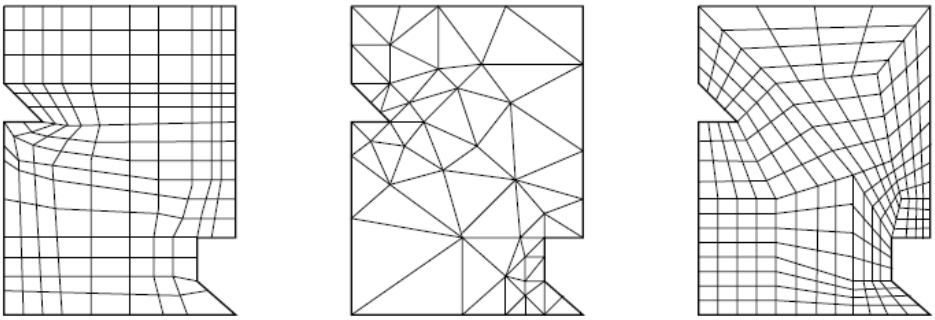
Rys. 12. Rodzaje elementów dyskretyzacji domeny. [esi-CFD.com]



Rys. 13. Siatka z elementami typu polyhedral. [STAR-CCM+]

4.2. Rodzaje siatek

Elementy dyskretne razem połączone tworzą siatkę. Są trzy główne rodzaje siatek: strukturalna, w której wewnętrzne wierzchołki są topologicznie podobne, niestrukturalna, w której wierzchołki mają dowolnych i różnych lokalnych sąsiadów, strukturalna regionami lub hybrydowa – zbudowana fragmentami za pomocą siatki strukturalnej, a całość można uznać jako siatkę niestrukturalną. [9]

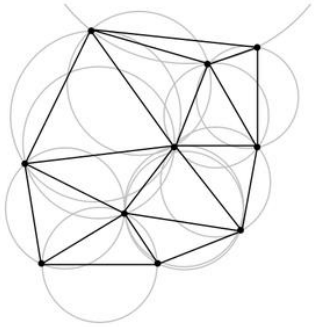


Rys. 14. Rodzaje siatek a) strukturalna, b) niestrukturalna, c) strukturalna regionami [9]

4.3. Metoda triangulacji Delaunay'a

Triangulacja Delaunay'a, zaproponowana przez Borysa Nikolaevicha Delone w 1934, jest strukturą geometryczną, którą inżynierowie używali dla siatek od początków ich generacji. W dwóch wymiarach ma miażdżącą przewagę: pośród wszystkich możliwych triangulacji dla stałego zbioru punktów uzyskuje najwyższe kryterium minimalnego kąta. Co więcej optymalizuje kilka innych geometrycznych kryteriów związanych z dokładnością interpolacji.

Triangulacja Delanuay'a, charakteryzuje się tym, że żaden z punktów z tego zbioru nie trafia do wnętrza okręgu opisanego na trójkącie jakiegokolwiek innego trójkąta powstałego podczas triangulacji (rys. 13).



Rys. 15. Zasada triangulacji Delaunay'a

Przykładowy algorytm triangulacji Delaunay'a:

1) Wśród podanych punktów poszukaj dwóch najbliżej położonych i traktuj je jako pierwszą prostą.
2) Pobierz trzeci punkt różny od tych dwóch łącząc je wyznacz pierwszy trójkąt.
3) Opisz okrąg na trójkącie tzn. znajdź jego środek oraz promień.
4) Sprawdź czy wewnątrz okręgu znajduje się jakiś punkt przez wyliczenie długości odcinka między danym punktem a środkiem okręgu.
   – Jeżeli długość jest mniejsza od promienia – obrany punkt leży wewnątrz okręgu i przyjmij go jako nowy wierzchołek trójkąta - wyznacz nowy środek okręgu i promień następnie skok do pkt. 4.

– Jeżeli nie ma punktów, dla których odcinek łączący dany punkt i środek okręgu jest mniejszy od promienia - skok do pkt. 5.

5) Zaznacz trójkąt określony wg. powyższych kryteriów.
6) Sprawdź czy istnieją nowo utworzone trójkąty:
   – Jeżeli tak to pobierz kolejno utworzone trójkąty w celu tworzenia kolejnych trójkątów przylegających do już utworzonych.
   – Jeżeli nie ma, skok do pkt. 7.
7) Zakończenie triangulacji.

Trójwymiarowa triangulacja nazywana jest tetrahedralizacją (czworościan, element typu tetra). Nie jest tak efektywna jak dwuwymiarowy odpowiednik do generowania dobrej jakości elementów, ale wykorzystuje się ją równie często. Tetrahedralizacja Delaunay'a nie uzyskuje maksimum kryterium minimalnego kąta (zarówno kąta płaskiego, jak również dwuściennego) [10].

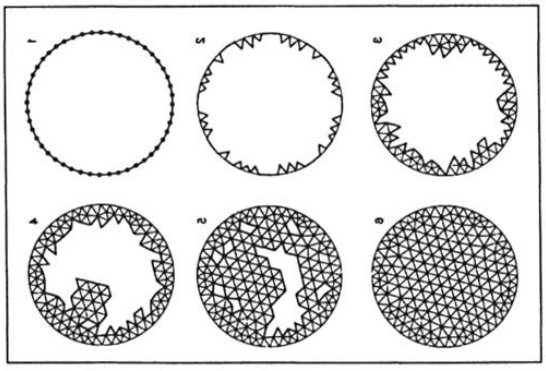
Rys. 16. Trzy przykłady wizualizacji tetrahedralizacji Delaunay'a [10]

4.4. Metoda postępującego frontu

Drugą równie popularną metodą triangulacji jest metoda postępującego frontu. Przygotowuje ona triangulację dla warunków brzegowych (powierzchni domeny), następnie łączy się poszczególne trójkąty tworząc czworościany zaczynając od powierzchni brzegowych. Dla trzech węzłów należących do trójkątnego elementu z frontu dodaje się kolejny węzeł lub łączy z istniejącym. Po utworzeniu czworościanu front zostaje zaktualizowany.

Front to dynamiczna strukturą danych, która stale się zmienia podczas procesu generacji siatki. Na początku procesu front składa się z sekwencji segmentów prostych linii połączonych kolejno z węzłami brzegowymi. W każdym momencie front posiada zbiór wszystkich elementów pozwalających na utworzenie trójkąta.

Gdy warunki brzegowe domeny pozostają niezmienne, generowany front zmienia się ciągle i musi zostać uaktualniony za każdym razem, gdy nowy element zostanie utworzony. Procedura trwa do momentu przyjęcia przez front wartości zero (zostanie wypełniona przestrzeń).

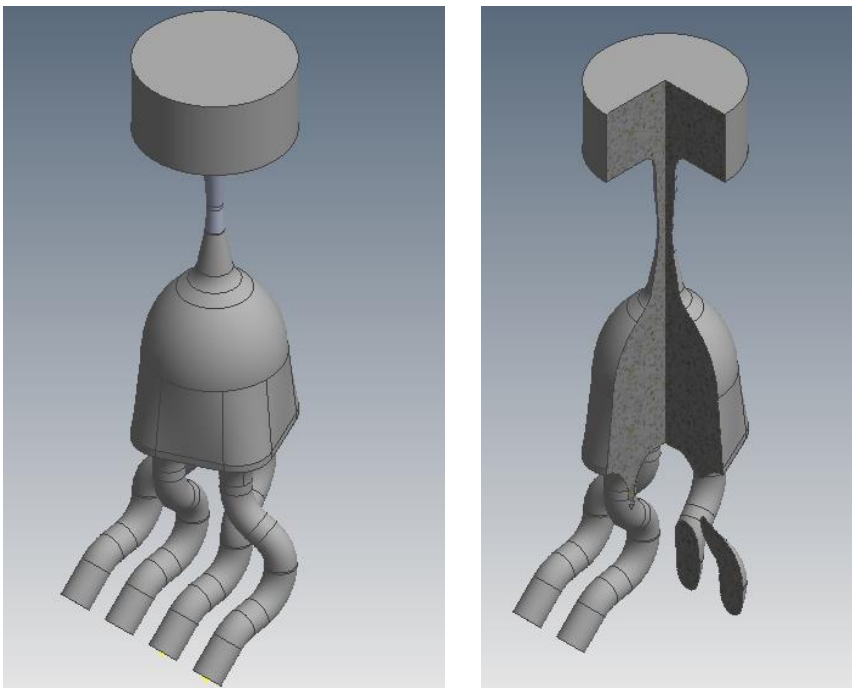


Rys. 17. Poszczególne etapy dwuwymiarowej metody postępującego frontu [10]

5. PRAKTYCZNE PRZYGOTOWANIE MODELU DO OBLICZEŃ

5.1. Model domeny obliczeniowej

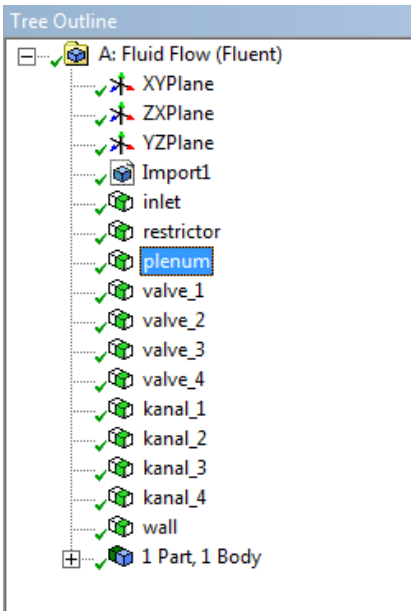
Przygotowanie modelu do obliczeń wymaga modyfikacji modelu koncepcyjnego do postaci modelu zawierającego objętość kolektora dolotowego. W tym celu wycięto z prostopadłościennego elementu model objętości. Dodatkowo na szczycie elementu wykonano dodatkową objętość, z której będzie zasysane powietrze do wnętrza. Taki model nazywany jest domeną obliczeniową i konieczne jest wykonanie jej dla każdego badania przepływowego.



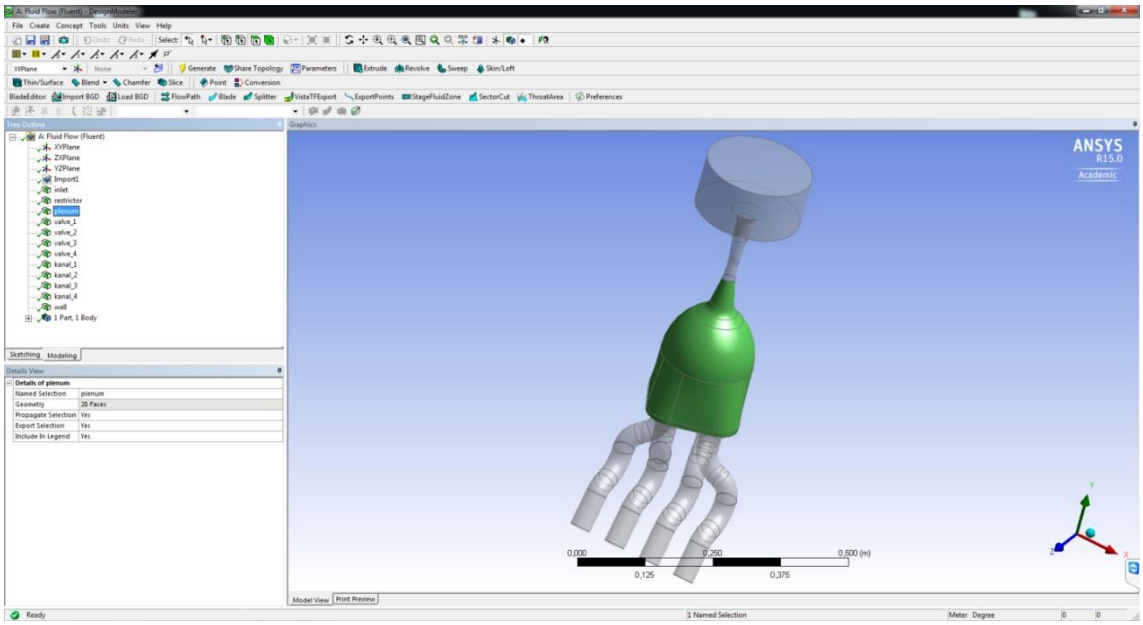
Rys. 18. Widok i przekrój domeny obliczeniowej, czyli model objętości kolektora dolotowego wraz z dodatkową objętością, z której będzie zasysane powietrze. [opracowanie własne]

5.2. Import geometrii do pakietu ANSYS

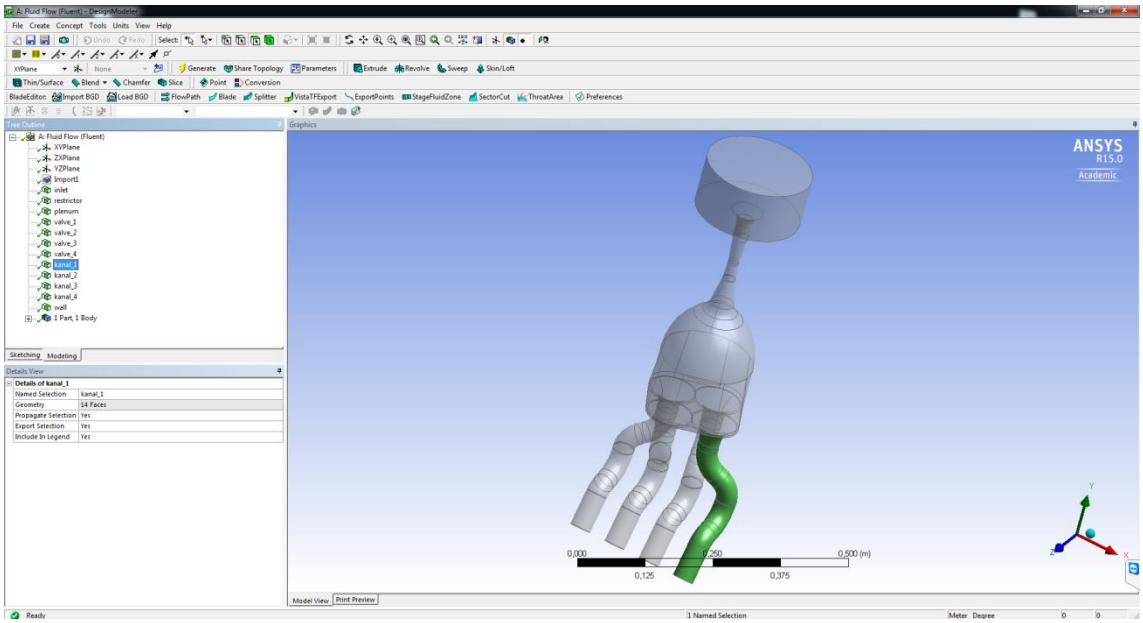
Pakiet obliczeniowy ANSYS w wersji 15 zawiera narzędzia potrzebne do nadania warunków brzegowych i generacji siatki. Z racji braku wsparcia dla natywnego formatu plików Autodesk Inventor model domeny obliczeniowej należy zapisać w formacie STEP 214 z wysoką dokładnością eksportu geometrii. Plik w formacie STEP importuje się do modułu ANSYS DesignModeler, wywoływanego z poziomu ANSYS Workbench, gdzie ustala się odpowiednie nazwy dla danych powierzchni i/lub krawędzi w zależności od konkretnego przypadku. Możliwa jest również prosta edycja oraz dodawanie dodatkowych elementów wpływających na ustalenie odpowiednich warunków brzegowych. Warunki brzegowe ustala się po zaznaczeniu odpowiednich powierzchni i/lub krawędzi przy pomocy operacji „Named Selection". W ten sposób tworzy się lista wygenerowanych zbiorów elementów (rysunek 19) ułatwiając tworzenie kolejnych zbiorów, np. poprzez ukrywanie innych, jak również pozwala na szybki dostęp do zaznaczenia wielu elementów (rysunek 20 i 21).



Rys. 19. Lista nazwanych powierzchni jako ustalenie warunków brzegowych. [opracowanie własne]



Rys. 20. Okno modułu ANSYS DesignModeler z listą nazwanych powierzchni odpowiadającym warunkom brzegowym z zaznaczonymi powierzchniami plenum. [opracowanie własne]

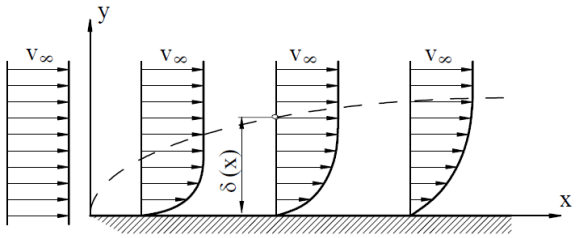


Rys. 21. Okno modułu ANSYS DesignModeler z listą nazwanych powierzchni odpowiadającym warunkom brzegowym z zaznaczonymi powierzchniami kanału nr 1. [opracowanie własne]

5.3. Generacja siatki obliczeniowej

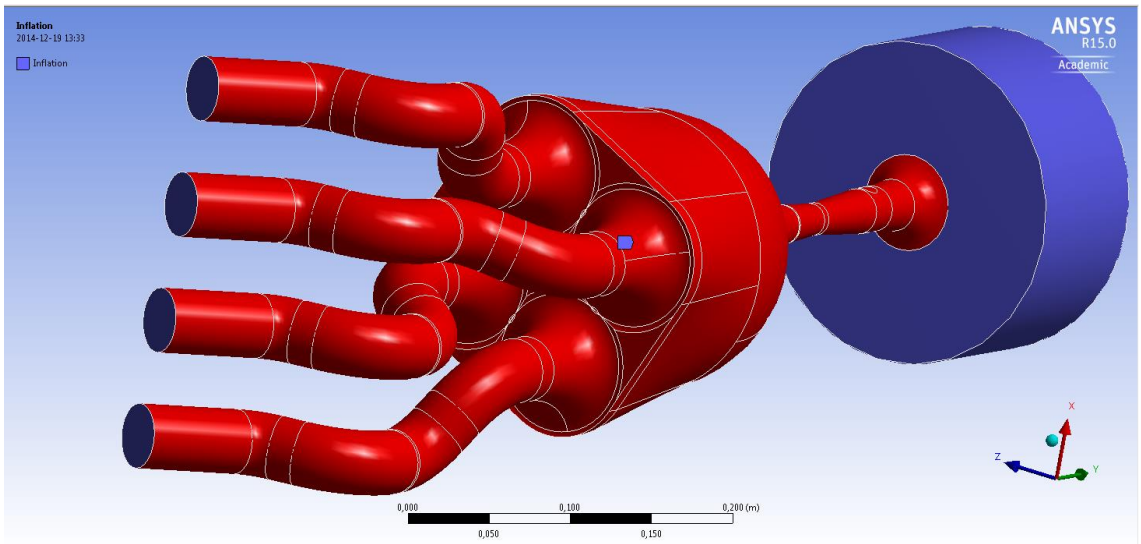
Ostatnim krokiem przygotowania modelu obliczeniowego, to wygenerowanie siatki obliczeniowej. Pakiet ANSYS oferuje kilka narzędzi do zaawansowanego tworzenia siatek, lecz na potrzeby obliczeń przepływu wewnętrznego wystarczy podstawowy moduł ANSYS MeshGenerator, również wywoływany z poziomu ANSYS Workbench po wykonaniu wszystkich wymaganych operacji w ANSYS DesignModeler. Proces tworzenia siatki lepkiej, czyli z warstwą przyścienną, dla przepływu wewnętrznego w ANSYS MeshGenerator jest zadaniem, którego stopień trudności zależy bezpośrednio od geometrii domeny obliczeniowej. Im bardziej skomplikowana geometria, tym bardziej wymagane są dodatkowe zagęszczenia lub ustrukturyzowania danych obszarów. W celu wprowadzenia dodatkowych warstw siatki dla odwzorowania warstw przyściennych korzysta się z polecenia Inflation znajdującego się w opcjach dodawania elementów siatki. Wyjaśnienie zjawisk zachodzących w warstwie przyściennej wyjaśnia opis z książki K. Jeżowiecka-Kabsch, H. Szewczyk „Mechanika Płynów":

„W odróżnieniu od płynu doskonałego (a więc nielepkiego), w którym tylko składowa normalna prędkości musi znikać na nieprzepuszczalnej ścianie, w płynie lepkim również składowe styczne prędkości znikają na tego rodzaju ścianie. Warunki te nie zależą od prędkości płynu w punktach odległych od granicy. Oznacza to, że podczas przepływu płynu pseudodoskonałego (tzn. z dużą prędkością) siły lepkości są dominujące w pobliżu ściany sztywnej (lub granicy różnych płynów), chociaż w głównej masie płynu dominują siły bezwładności. Rozwiązanie tego problemu polega na podzieleniu całego obszaru poruszającego się płynu na dwa nierówne podobszary i prowadzeniu rozważań osobno dla każdego z nich. Podział ten – zaproponowany przez Prandtla – polega na wprowadzeniu podobszaru, w którym siły lepkości są całkowicie pomijalne, oraz drugiego, w którym ich wpływ jest decydujący." [13]



Rys. 22. Obraz rozkładu prędkości warstwy przyściennej. [13]

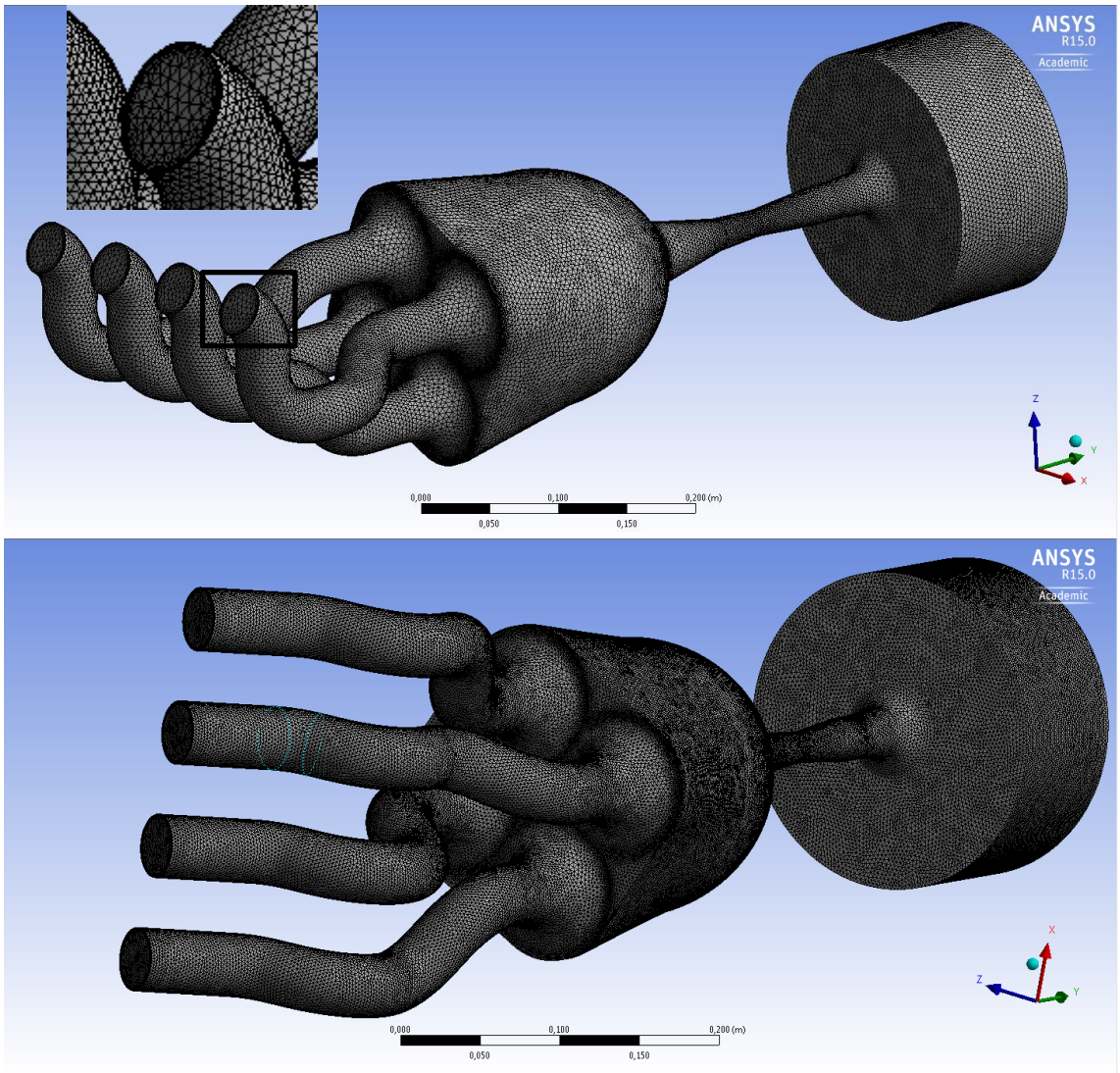
Siatka obliczeniowa w założeniu ma mieć ok. 1,2-1,5 mln elementów, podyktowane ograniczenie wynika z mocy obliczeniowej dysponowanego sprzętu, a także z harmonogramu badań. Po przeprowadzeniu symulacji i wyciągnięciu wniosków możliwe jest wygenerowanie siatki o 2- lub 3-krotnie większej ilości elementów w celu zwiększenia dokładności i wiarygodności obliczeń. Siatkę o danej ilości elementów uzyskuje się przez modyfikację parametrów podanych w pierwszych czterech wersach tabeli 2 aż do otrzymania pożądanych wartości ilości wierzchołków i elementów siatki.



Rys. 23. Powierzchnie dla których generowana jest dodatkowo warstwa przyścienna. [opracowanie własne]

Tabela 3. Porównanie wielkości wierzchołków i elementów siatki

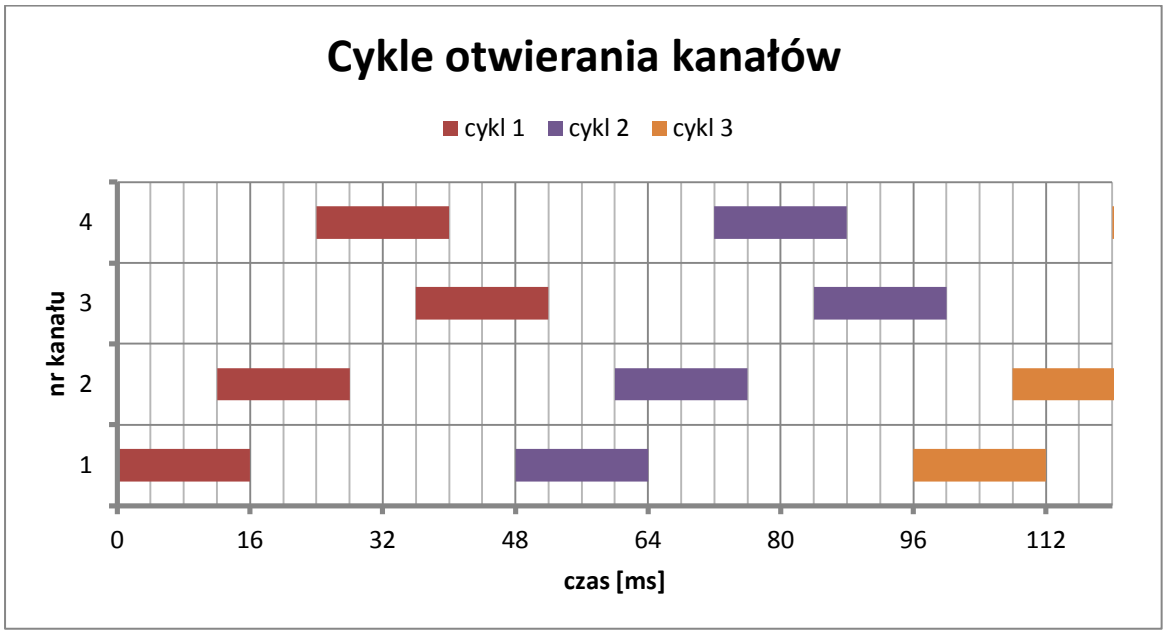
	Pierwszy wartiant	Drugi wariant	Trzeci wariant
Kąt dzielenia dla okręgów	10°	10°	10°
Minimalna wielkość elementu [mm]	0,1	0,1	0,1
Maksymalna wielkość powierzchni elementu [mm^2]	4	4	4
Maksymalna wielkość elementu [mm]	5	5	5
Ilość warstw przyściennych	5	5	5
Ilość wierzchołków	366 341	382 941	448 031
Ilość elementów	1 339 803	1 393 714	1 599 934



Rys. 24. Siatki dla wariantu pierwszego (z powiększeniem ukazującym warstwę przyścienną) i drugiego. [opracowanie własne]

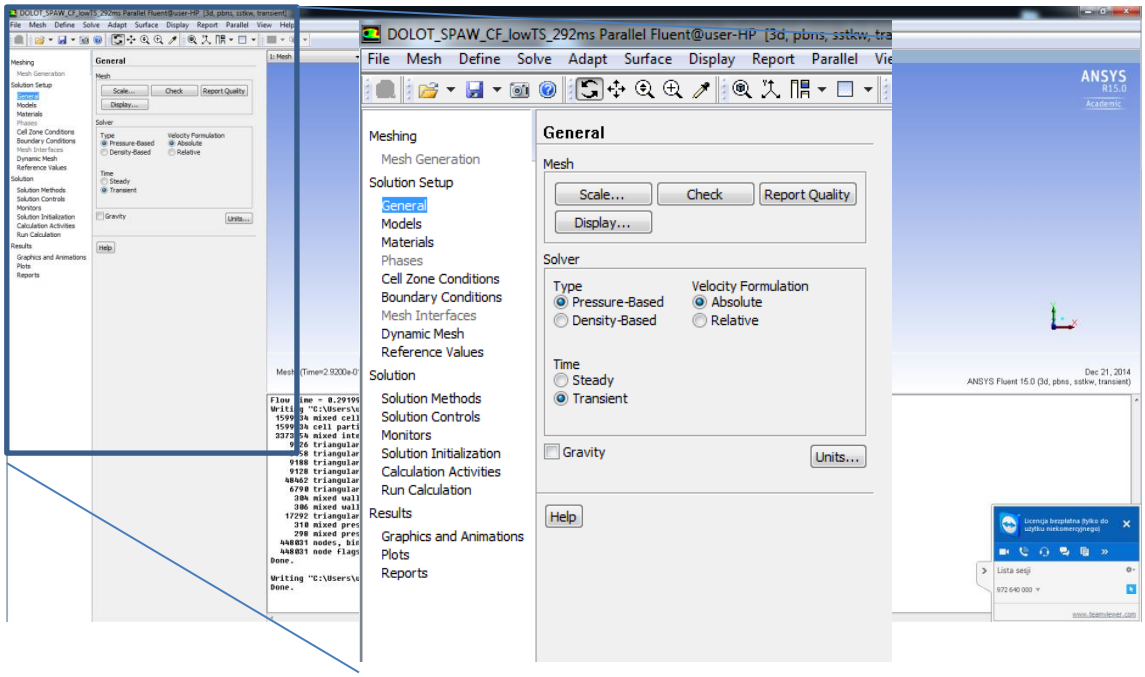
6. SYMULACJA PRZEPŁYWU W PROGRAMIE ANSYS FLUENT

Program ANSYS Fluent do obliczeń wymaga wczytania siatki domeny obliczeniowej, która została dla każdego modelu wygenerowana wcześniej przez odpowiedni moduł. Symulacja będzie prowadzona w dwóch etapach: symulacja przepływu ustalonego, a następnie przejście na obliczenia niestacjonarne z odwzorowaniem pracy silnika dla 5000 obr/min. Jest to prędkość obrotowa, przy której silnik będzie najczęściej pracować. Czas otwarcia poszczególnych kanałów trwa 16ms, a po 12ms od otwarcia kanału otwiera się kanał kolejny. Pełny cykl trwa od otwarcia kanału nr 1 do zamknięcia kanału nr 3. Przy czym w symulacji zostanie zaimplementowane uproszczenie związane z ciśnieniem na końcu każdego kanału. W rzeczywistości pracujący silnik powoduje zmienne ciśnienie zasysania, natomiast w obliczeniach zostanie przyjęte stałe ciśnienie ze względu na porównanie geometrii przy stałych warunkach. W miarę rozwoju projektu Formula Student przewiduje się wprowadzenie zmiennego ciśnienia na końcu kanału, aby lepiej odwzorować działający silnik. Dla każdego modelu zostało policzone sześć pełnych cykli. Pięć z nich z krokiem czasowym 0,5ms, a ostatni z krokiem 0,1ms. Celem symulacji jest sprawdzenie rozkładu prędkości na końcu kanałów oraz rozkładu ciśnienia na powierzchni ścianek, szczególnie w momencie zamknięcia kanału.



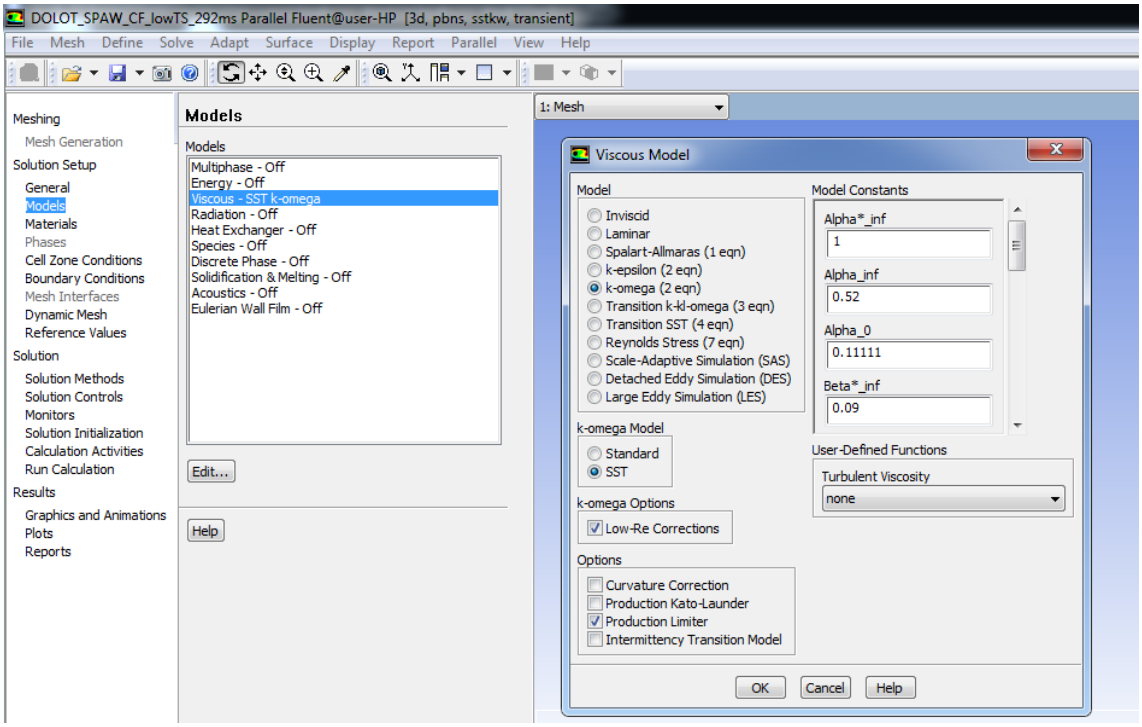
Rys. 25. Wykres przedstawiający czas otwarcia kanału w poszczególnym cyklu [opracowanie własne]

Zanim nastąpią obliczenia należy sprawdzić szereg ustawień i parametrów w odpowiednich zakładkach programu ANSYS Fluent. Pierwsze są ogólne ustawienia (General) symulacji, gdzie ustala się: typ symulacji bazujący na ciśnieniu (pressure-based) lub gęstości (density-based), formułowanie wartości prędkości – absolutne (absolute) lub relatywne (relative) oraz najważniejsze, czyli ustawienie czasu – ustalone (steady), czyli czas nie występuje w równaniu lub zmienne w czasie (transient). Dodatkowo istnieje opcja wprowadzenia siły grawitacji poprzez odpowiednie składowe.



Rys. 26. Zakładka „General” programu ANSYS FLUENT zawierająca podstawowe opcje dotyczące rodzaju symulacji [opracowanie własne]

Następnie w zakładce Models (rysunek 27) ustala się wszelkie parametry modelowania przepływu, m. in. model turbulencji. Dla przepływu wewnętrznego wybrany został model z grupy modeli z dwoma równaniami dopełniającymi. Modele z większą ilością równań dopełniających potrzebują dużo większej mocy obliczeniowej stacji roboczej.

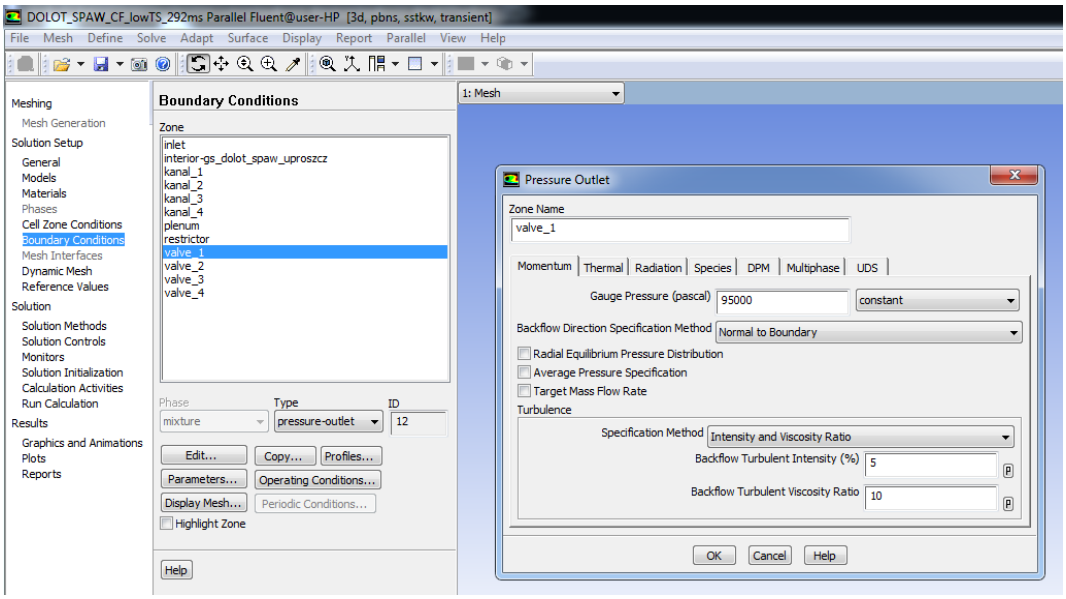


Rys. 27. Zakładka „Models” zawierająca opcje wyboru parametrów symulacji, takich jak: wybór modelu turbulencji (viscous model – w oknie), wymiana ciepła (heat exchange), czy akustyka (acoustics). [opracowanie własne]

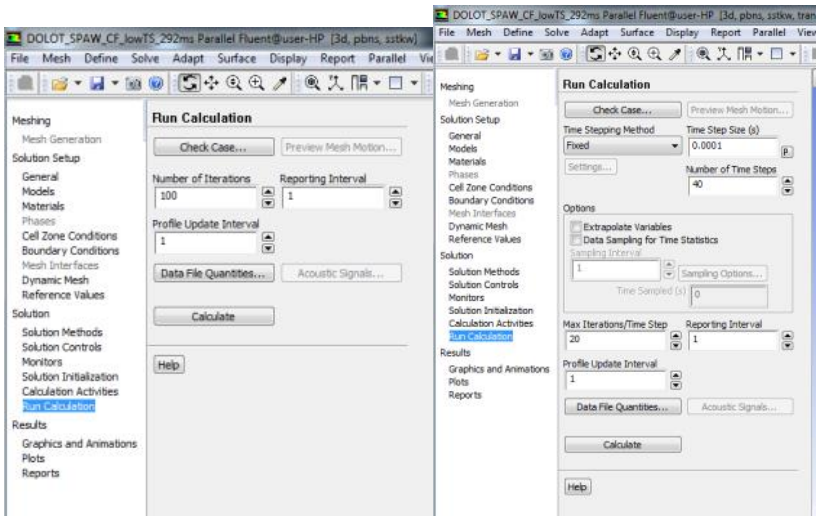
Po ustaleniu modelu symulacji, należy zdefiniować warunki brzegowe (Boundary Conditions – rysunek 28), które określają charakter danych powierzchni i/lub krawędzi. We wszystkich symulacjach warunki brzegowe były ustalane za każdym razem w identyczny sposób (nazwa, rodzaj, wartość):

– dopływ powietrza (inlet)	pressure-inlet	101300 Pa,
– wnętrze (interior)	interior	- ,
– końce kanałów (valve_1/2/3/4)	pressure-outlet (otwarty)	95000 Pa,
	wall (zamknięty)	-.
– pozostałe	wall	-.

Wykonanie symulacji przepływu ustalonego w postaci 100 iteracji pozwala na uzyskanie zbieżności wyników w krótszym czasie, a także jest to forma uzyskania pewnego rozwiązania od którego rozpocznie się obliczanie 6 cykli. Różnice w ustawieniach parametrów przed rozpoczęciem obliczeń przedstawia rysunek 29, gdzie dla wariantu „steady” parametrem jest liczba iteracji, natomiast dla wariantu „transient” wprowadza się odpowiednią wartość kroku czasowego oraz maksymalną ilość iteracji dla kroku czasowego.



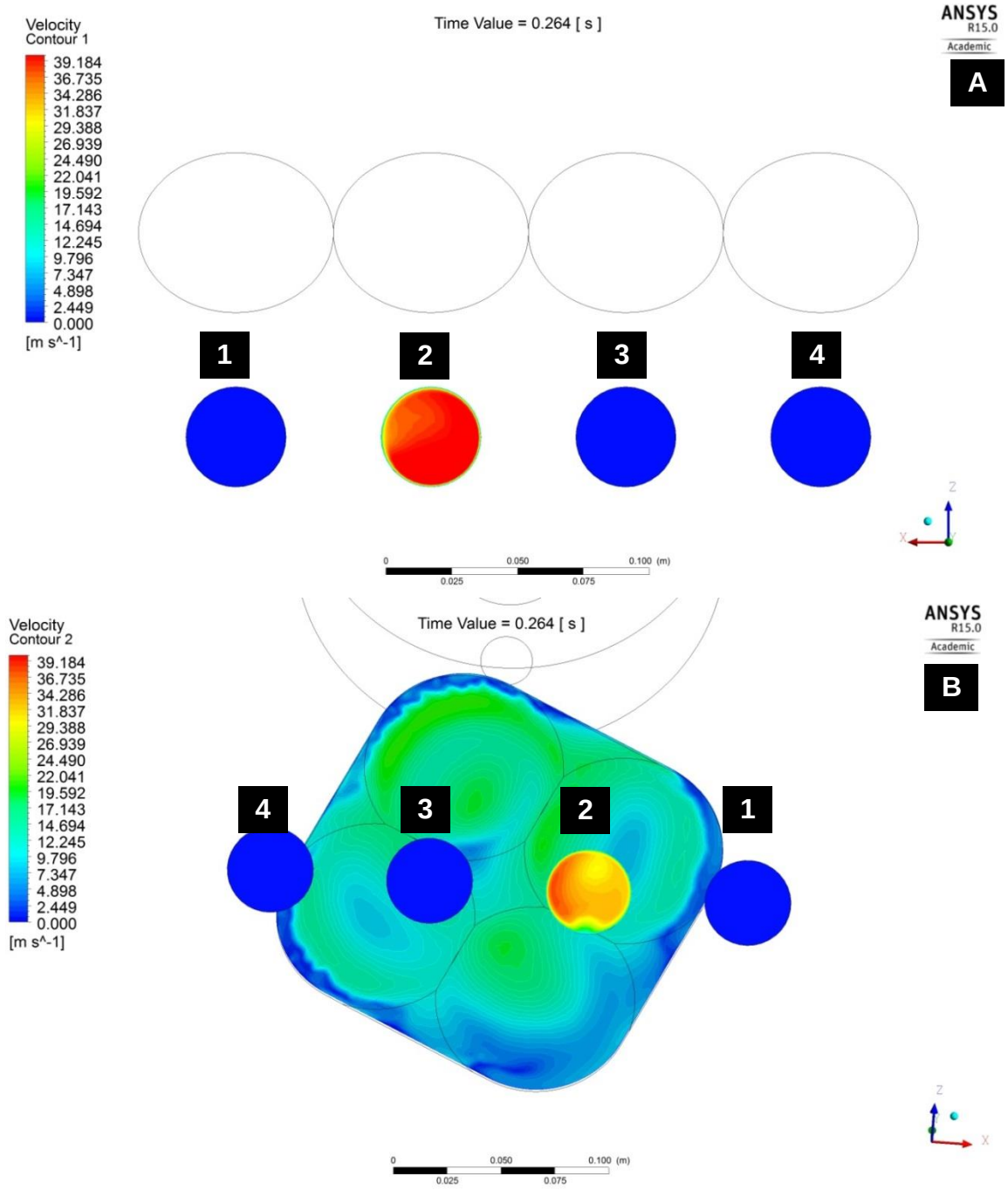
Rys. 28. Zakładka „Boundary Conditions” zawierająca listę opisanych powierzchni i/lub krawędzi jako warunki brzegowe, wraz z otwartymi opcjami dla końca kanału nr 1 (valve_1), gdy jest otwarty (pressure-outlet). [opracowanie własne]



Rys. 29. Zakładka „Run Calculation” z ustawieniami dla przepływu ustalonego (steady) z lewej, dla przepływu niestacjonarnego (transient) z prawej; przycisk „Calculate” – oblicz – służy do uruchomienia obliczeń przepływu. [opracowanie własne]

7. WYNIKI

Z przeprowadzonych symulacji wyniki zostały zwizualizowane w module CFD-Post pakietu ANSYS. Po zaimportowaniu danych możliwe jest przedstawienie danego rozkładu ciśnienia lub prędkości na powierzchni badanego modelu, na odpowiednich przekrojach, a także wyznaczenie torów poruszania się powietrza wewnątrz kolektora dolotowego za pomocą linii lub wektorów. Celem symulacji jest sprawdzenie rozkładu ciśnienia na powierzchni kanału dolotowego, a także porównanie rozkładu prędkości na końcu kanałów doprowadzających powietrze do silnika dla poszczególnych wariantów.



Rys. 30. Rysunki przedstawiające przykładowy rozkład prędkości na końcu kanałów z oznaczeniem ich numeracji dla: a) wariant trzeci, b) wariant drugi (i pierwszy) [opracowanie własne]

Tabela 4. Rozkład prędkości na powierzchni końca kanału na moment przed otwarciem kanału kolejnego.

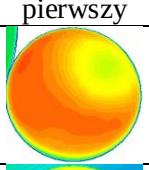
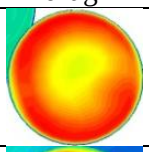
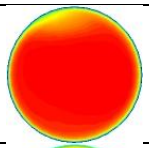
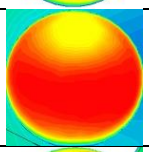
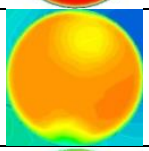
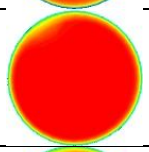
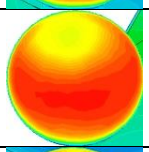
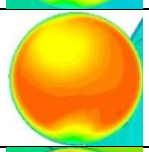
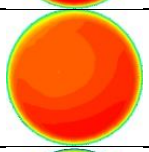
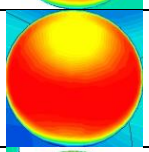
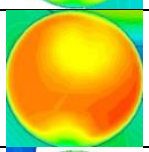
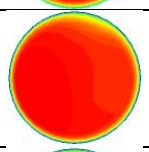
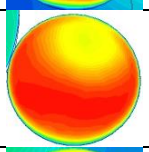
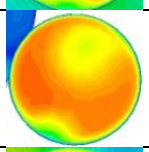
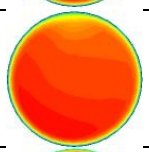
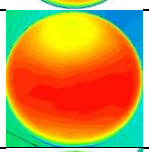
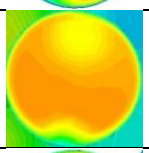
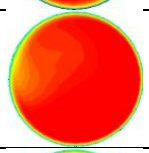
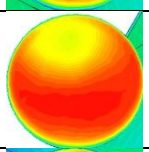
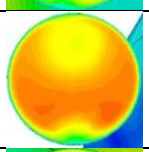
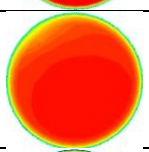
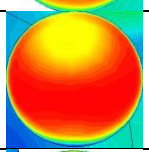
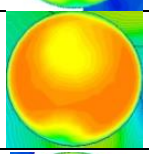
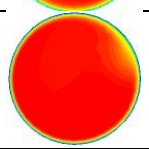
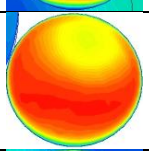
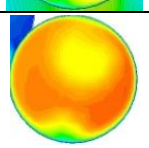
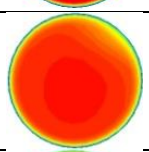
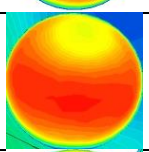
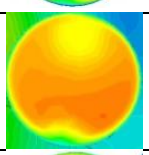
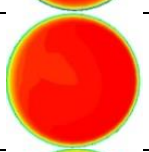
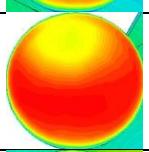
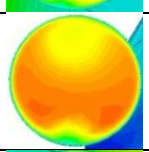
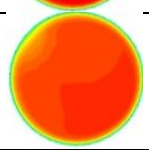
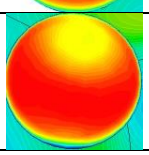
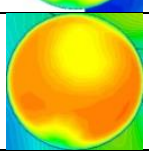
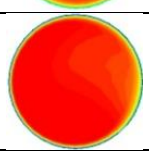
nr cyklu	czas [s]	nr kanału	wariant pierwszy	wariant drugi	wariant trzeci	legenda
1	0,012	1				
	0,024	2				
	0,036	4				
	0,048	3				
2	0,060	1				
	0,072	2				
	0,084	4				
	0,096	3				
3	0,108	1				
	0,120	2				
	0,132	4				
	0,144	3				

Tabela 4. Ciąg dalszy

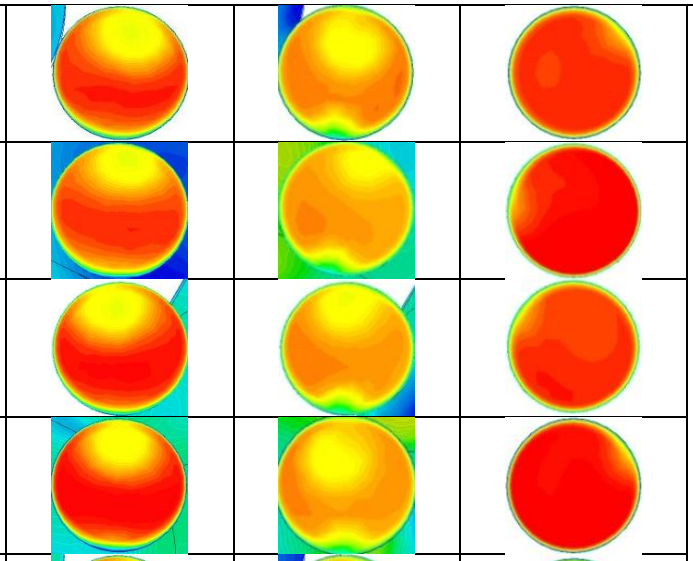
4	0,156	1				
	0,168	2				
	0,180	4				
	0,192	3				
5	0,204	1				
	0,216	2				
	0,228	4				
	0,240	3				
6	0,252	1				
	0,264	2				
	0,276	4				
	0,288	3				

Tabela 5. Rozkład prędkości otwartego kanału nr 1 podczas cyklu nr 5 i 6.

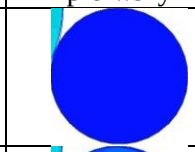
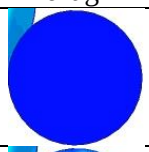
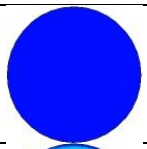
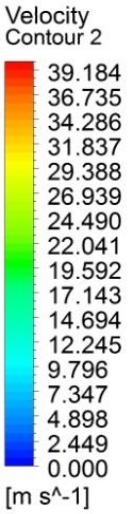
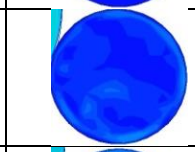
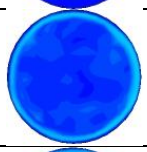
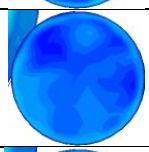
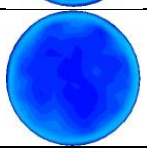
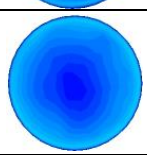
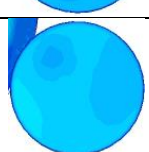
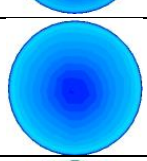
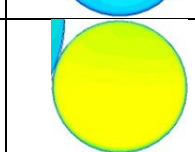
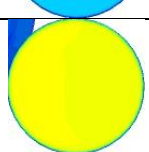
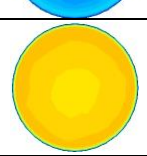
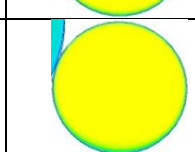
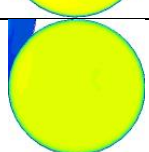
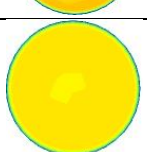
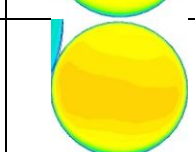
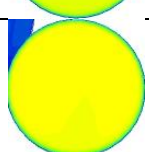
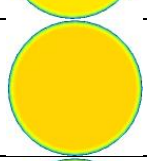
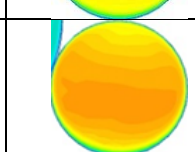
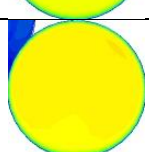
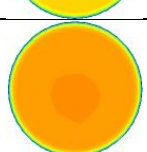
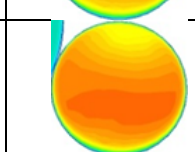
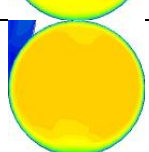
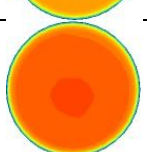
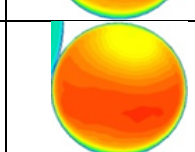
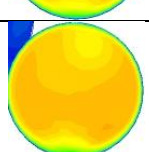
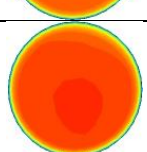
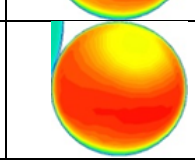
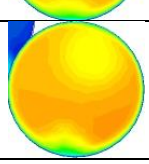
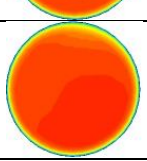
nr cyklu	czas [s]	wariant pierwszy	wariant drugi	wariant trzeci	legenda
5	0,192				
	0,193				
	0,194				
	0,195				
	0,196				
	0,197				
	0,198				
	0,199				
	0,200				
	0,201				
	0,202				
	0,203				

Tabela 5. Ciąg dalszy.

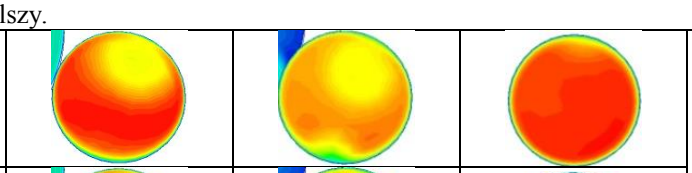
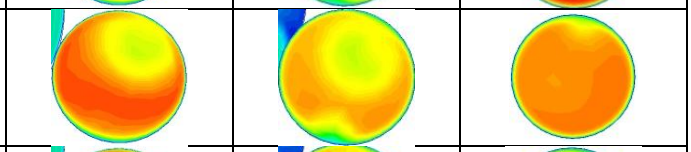
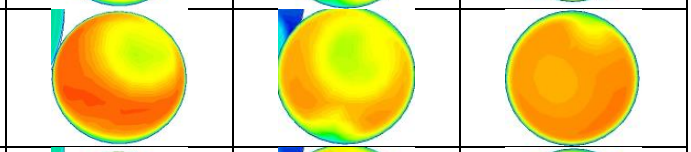
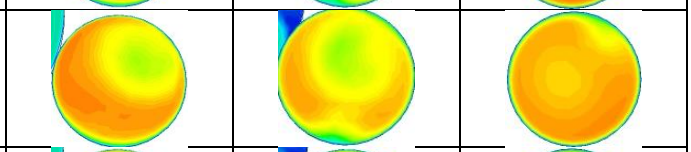
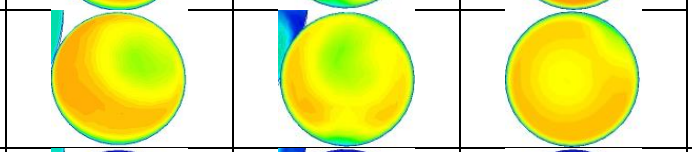
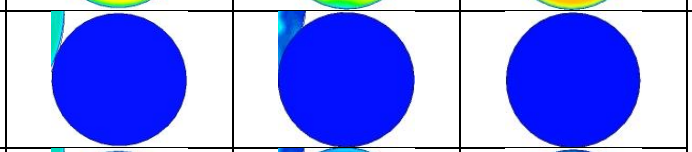
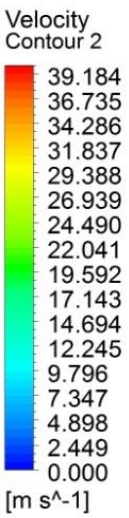
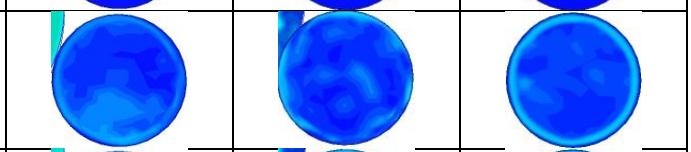
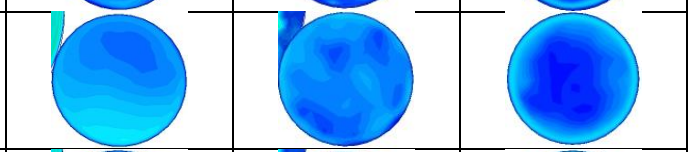
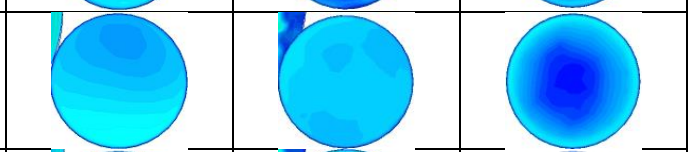
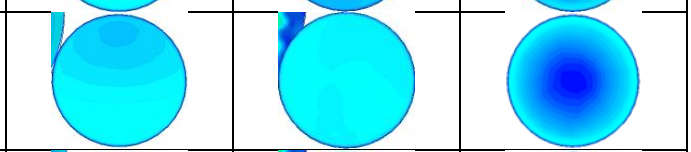
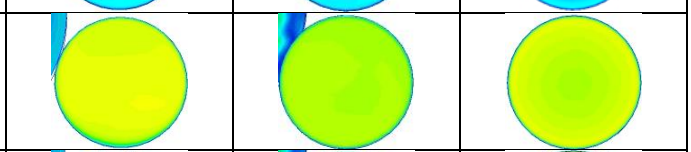
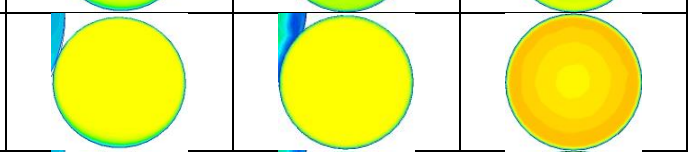
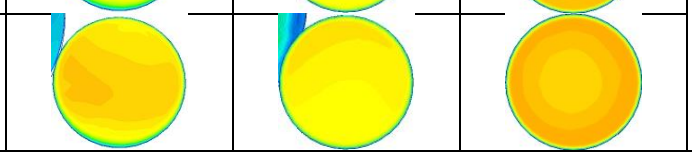
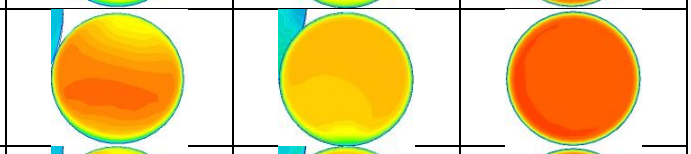
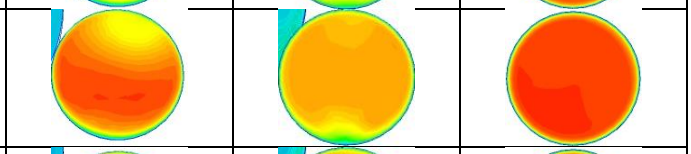
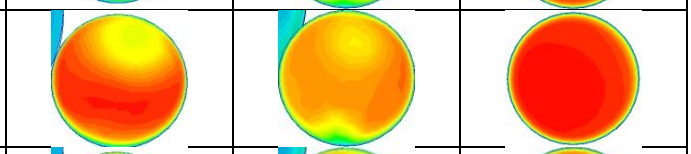
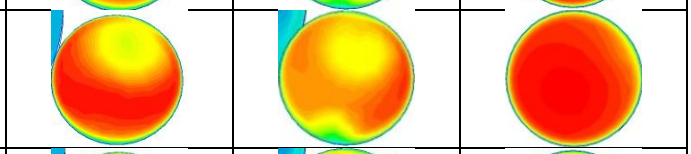
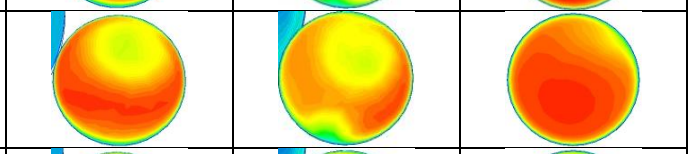
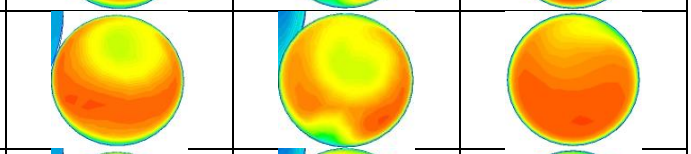
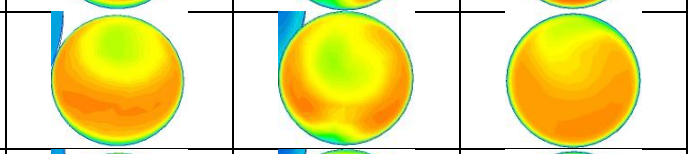
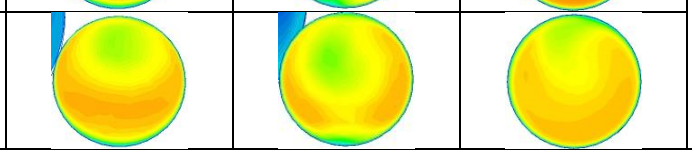
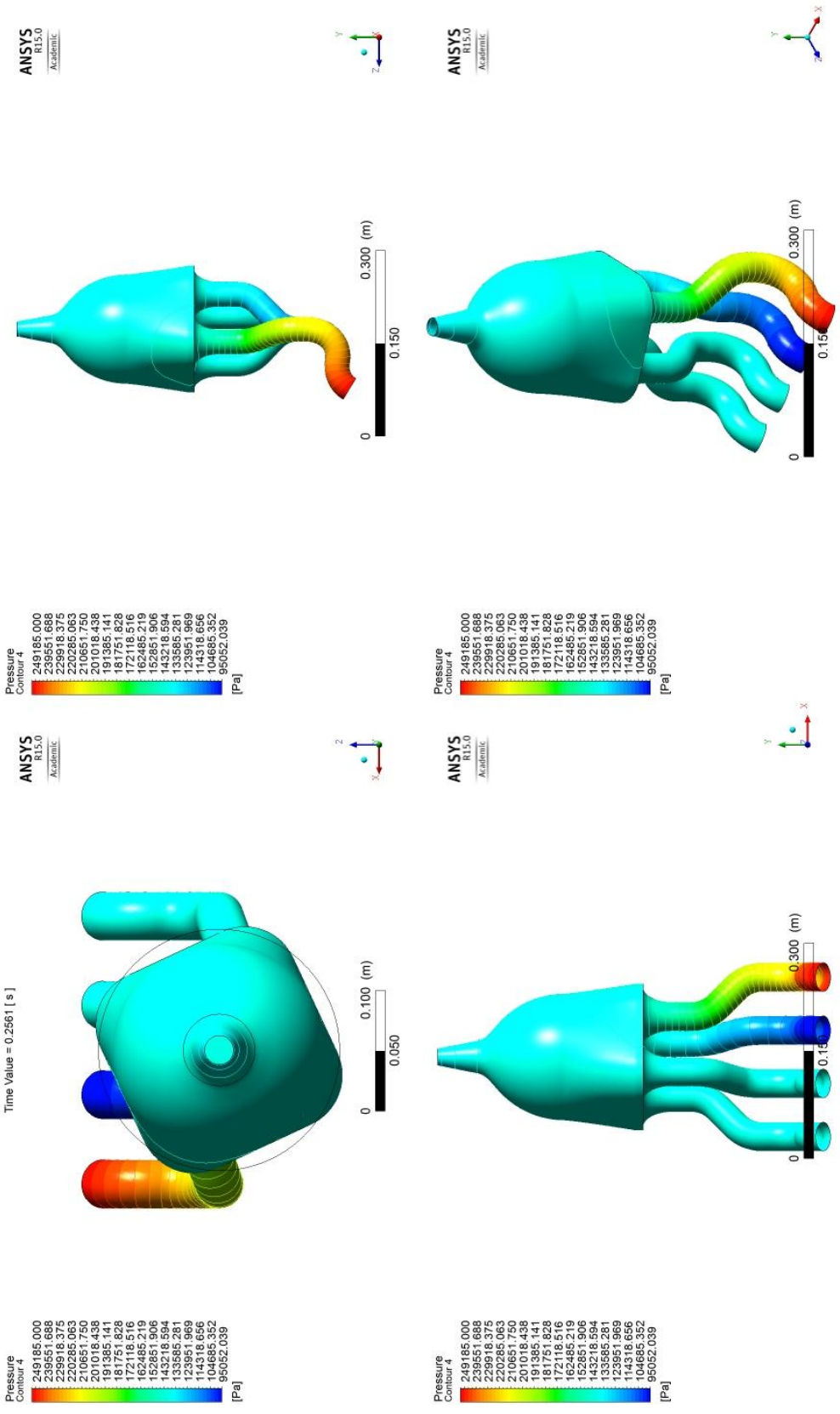
	0,204				
	0,205				
	0,206				
	0,207				
	0,208				
6	0,240				
	0,241				
	0,242				
	0,243				
	0,244				
	0,245				
	0,246				
	0,247				

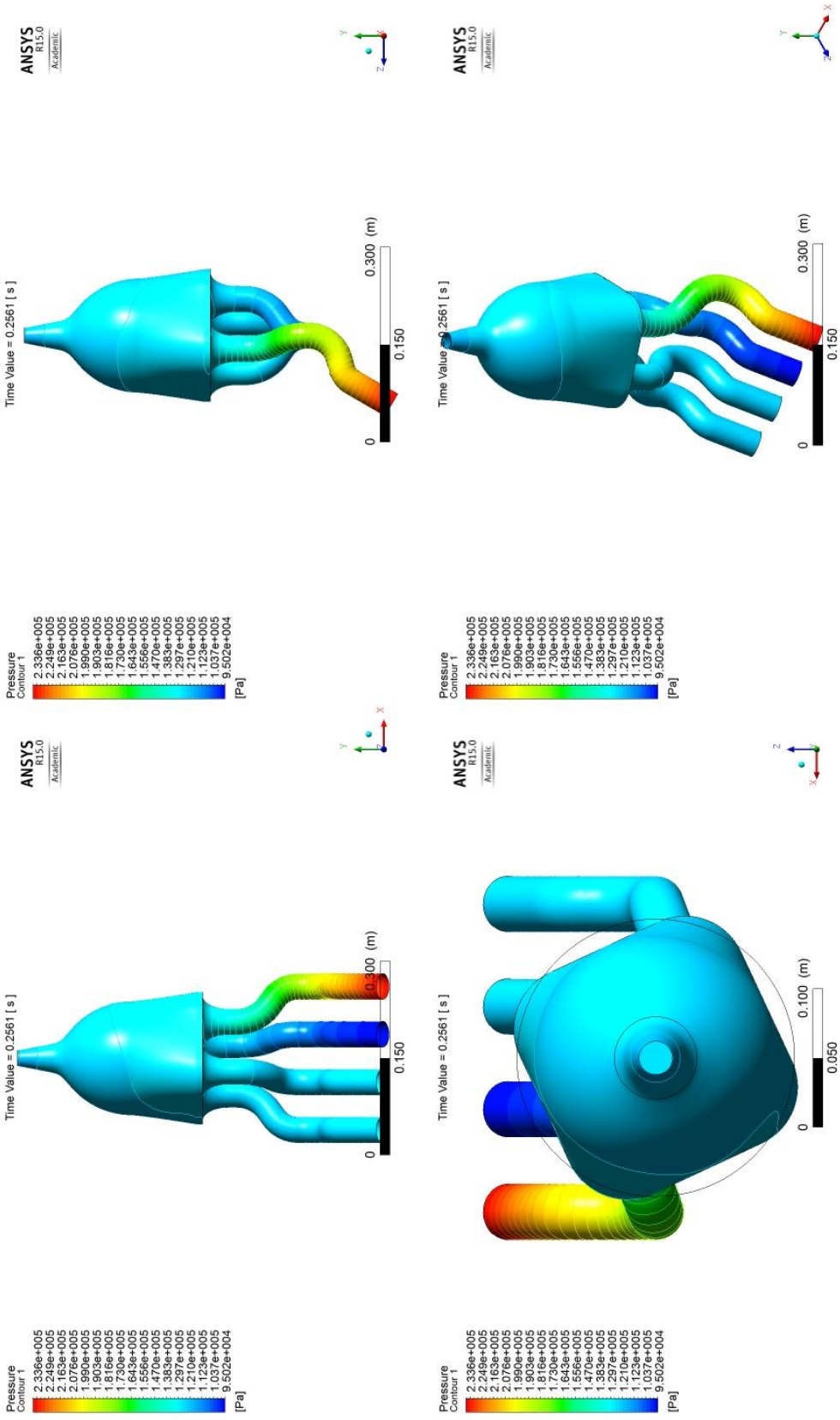
Tabela 5. Ciąg dalszy.

	0,248				
	0,249				
	0,250				
	0,251				
	0,252				
	0,253				
	0,254				
	0,255				
	0,256				

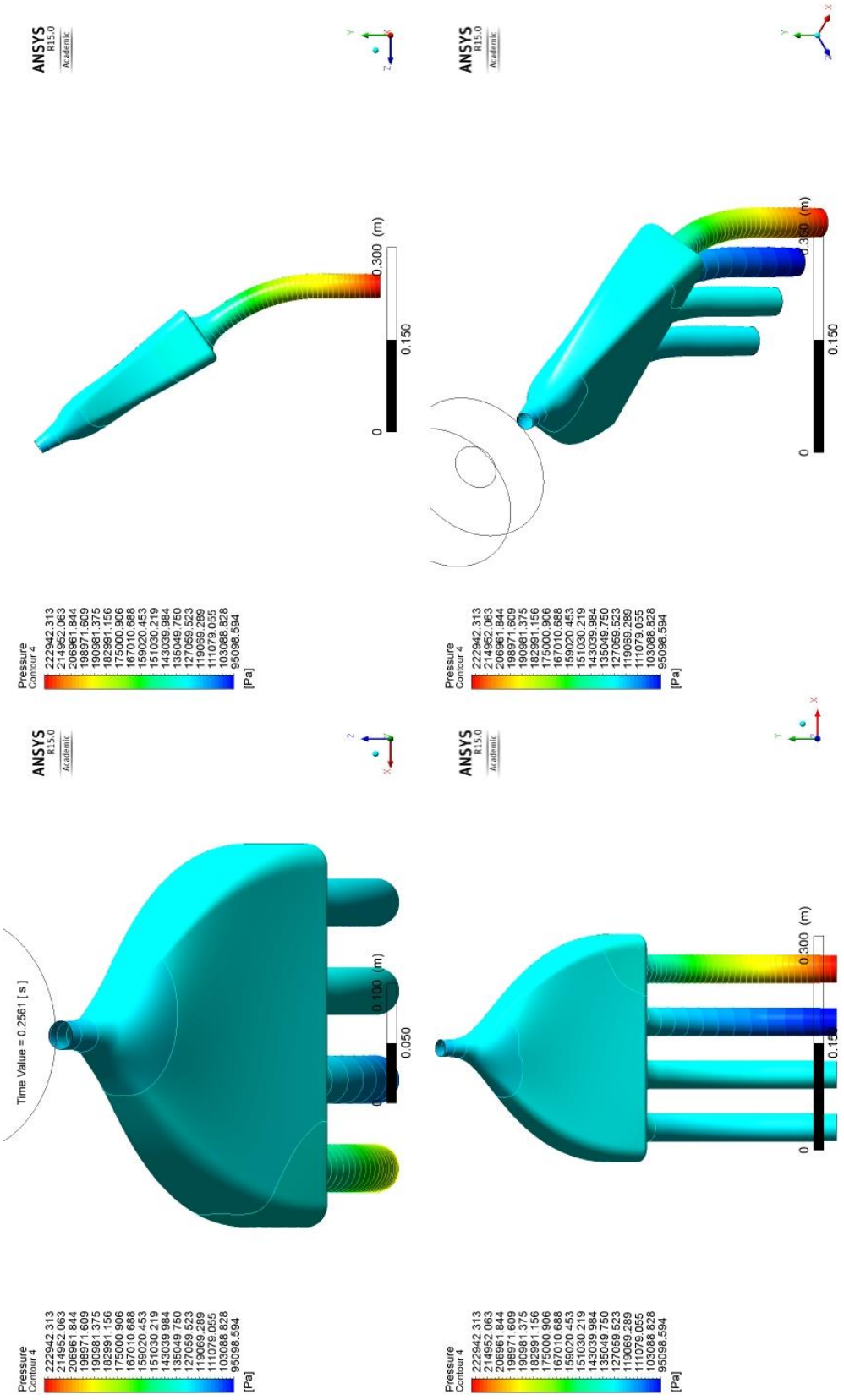
Z powyższych tabel wynika, że w każdym cyklu, dla wariantu pierwszego i drugiego (pomijając rozwiązanie dla kanału nr 1, ze względu na uzyskanie rozwiązania z symulacji uśrednionej w czasie), rozkład prędkości na końcu odpowiedniego kanału jest zbliżony do siebie. W wariancie trzecim w każdym cyklu na końcu każdego kanału rozkład jest bardziej równomierny niż w wariancie pierwszym i drugim, jednak za każdym razem różni się dość znacząco od rozkładu danego kanału w cyklu poprzednim. Co więcej: w przeciągu czasu od otwarcia do zamknięcia kanału (16ms) dla wariantu trzeciego uzyskuje się równomierny rozkład, ale za każdym razem w różny sposób, natomiast dla wariantu pierwszego oraz drugiego poszczególne struktury powstają w bardzo podobny do siebie sposób.



Rys. 31. Rozkład ciśnienia na powierzchni kolektora dolotowego w momencie zamknięcia kanału 1 dla wariantu pierwszego [opracowanie własne]



Rys. 32. Rozkład ciśnienia na powierzchni kolektora dolotowego w momencie zamknięcia kanału 1 dla wariantu drugiego [opracowanie własne]



Rys. 33. Rozkład ciśnienia na powierzchni kolektora dolotowego w momencie zamknięcia kanału 1 dla wariantu trzeciego. [opracowanie własne]

W kwestii rozkładu ciśnienia największą nie wiadomą był rząd wielkości ciśnienia znajdujący się w pobliżu końca kanału w momencie jego zamknięcia. Z przeprowadzonych obliczeń wynika, że wartość tego ciśnienia znajduje się w przedziale od około 2,2 do 2,5 bar w zależności od geometrii samego kanału, a także wartość ciśnienia na powierzchni komory objętościowej wzrasta do wartości rzędu 1,2 bar (rysunki 31, 32, 33). W pozostałym przeciągu czasu na powierzchni tej komory wartość ciśnienia jest rzędu 0,96 bar. Należy zaznaczyć, że wartości te powtarzają się cyklicznie dla każdego kanału w każdym wariancie w chwili zamknięcia kanału. Znając rząd wielkości ciśnienia w tej konkretnej chwili pracy kolektora można odpowiednio dobrać współczynnik bezpieczeństwa przy projektowaniu gniazda pod wtryskiwacze, a także sposób odpowiedniego mocowania do silnika.

8. PODSUMOWANIE

Podczas prac nad kolektorem dolotowym wyłoniono dwie koncepcje, dla których przeprowadzono symulacje przepływowe. Cele pracy zostały zrealizowane, a także sprawdzone zostały własności eliptycznego wlotu do kanału w porównaniu do prostego wlotu podczas zasysania w symulacji dwuwymiarowej. Pewne jest, że wykorzystanie wlotu eliptycznego pozwala na uporządkowanie zasysanego powietrza i jego równomierny rozkład prędkości w przekroju poprzecznym minimalizując straty energii w postaci wirów praktycznie do zera. Obliczenia przepływu dla przedstawionych wariantów wykazały, że przy stałym ciśnieniu zasysania na końcu kanału za rozkład prędkości na przekroju poprzecznym odpowiada bezpośrednio geometria kanału, natomiast powtarzalność pojawiających się struktur dla danego kanału uzyskuje się poprzez zaprojektowanie podobnego otoczenia zasysania dla każdego z kanałów. Rozkład ciśnienia wzrasta do poziomu 2 bar w momencie zamknięcia kanału, a następnie się stabilizuje w okolicach 0,9 bar. Koncepcja wykorzystująca rozmieszczenie wlotów do kanałów w wierzchołkach kwadratów została tymczasowo odrzucona w projekcie ze względu na skomplikowaną technologię wykonania i związane z tym wysokie koszty produkcji. Trzeci wariant kolektora dolotowego z wlotami ustawionymi rzędowo pozwala na duże uproszczenia geometrii. Trzeba zaznaczyć, że uproszczenia objęły również sposób symulacji przepływu. Uwzględniono stałe ciśnienie zamiast zmiennego w czasie, a także zaślepiono kanał pod wtryskiem paliwa, który też będzie mieć znaczący wpływ na strukturę rozkładu prędkości. Konstrukcja kolektora dolotowego powinna łączyć łatwość technologicznego wytworzenia, możliwie najprostsze kanały doprowadzające powietrze do silnika, a także zapewnienie podobnego otoczenia zasysania, czyli umiejscowienie wlotów do kanałów w wierzchołkach kwadratu.

Literatura

[1] Encyklopedia Powszechna PWN
[2] J. W. Elsner „Turbulencja przepływów", PWN, 1987 Warszawa
[3] D. C. Wilcox „Turbulence Modeling for CFD", DCW Industries, Inc., La Canada, CA, 1993
[4] P. R. Spalart, S. R. Allmaras "A One-Equation Turbulence Model for Aerodynamic Flows", AIAA Paper 92-0439, 1992.
[5] B. E. Launder, D. B. Spalding "Lectures in Mathematical Models of Turbulence.", Academic Press, London, England, 1972.
[6] D. Choudhury "Introduction to the Renormalization Group Method and Turbulence Modeling", Fluent Inc. Technical Memorandum TM-107, 1993.
[7] T.-H. Shih, W. W. Liou, A. Shabbir, Z. Yang, J. Zhu "A New k-ε Eddy- Viscosity Model for High Reynolds Number Turbulent Flows - Model Development and Validation", Computers Fluids, 24(3):227-238, 1995.
[8] G. P. Blair, W. M. Cahoon "Best bell", Race Car Engineering, 2006
[9] M. Bern, P. Plassmann „Mesh Generation", EECS Berkeley
[10] J. R. Shewchuk „Lecture Notes on Delaunay Mesh Generation", University of California, Berkeley, 2012
[11] J. Mysłowski „Doładowanie silników", Wyd. Komunikacji i Łączności, 2006
[12] FLUENT User's Guide
[13] K. Jeżowiecka-Kabsch, H. Szewczyk „Mechanika Płynów", Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 2001