

**Akademia Górniczo- Hutnicza
Im. Stanisława Staszica w Krakowie**



TURBINY PAROWE I GAZOWE

PROJEKT 1

Wyznaczenie charakterystyki profilu aerodynamicznego
(łopatkowego) z wykorzystaniem parametryzacji geometrii i
technik planowania eksperymentu numerycznego

Prowadzący:
Dr inż. Tomasz Siwek
siwek@agh.edu.pl

1. Pobieranie oraz konwersja danych (punktów tworzących profil łopatkki)

Wszystkie pliki niezbędne do wykonania ćwiczenia, wraz z pomocami dydaktycznymi znajdują się na serwerze <http://home.agh.edu.pl/~siwek/>.

W pliku „Dane do projektu” odnajdujemy symbol profilu przypisany do nazwiska.

Dane geometrii profilu dostępne są na stronie: <http://airfoiltools.com>

W wyszukiwarce serwisu należy wpisać nazwę profilu. Następnie należy pobrać zbiór punktów tworzących profil łopatkki z linku w rubryce Details -> Source Dat file:

Airfoil Tools
Search 1636 airfoils

You have 0 airfoils loaded.
Your Reynold number range is 50,000 to 1,000,000. (set)

Google Custom Search

Applications
Airfoil database search
My airfoils
Airfoil plotter
Airfoil comparison
Reynolds number calc
NACA 4 digit generator
NACA 5 digit generator

Information
Airfoil data
Lift/drag polars
Generated airfoil shapes

Searches
Symmetrical airfoils
NACA 4 digit airfoils
NACA 5 digit airfoils
NACA 6 series airfoils

Airfoils A to Z
A a18 to avistar (88)
B b29root to bw3 (22)
C c141a to curtisc72 (40)
D dae11 to du861372 (28)
E e1098 to esa40 (209)
F falcon to fxs21158 (121)

NACA 16-006 (naca16006-il)
NACA 16-006 - NACA 16-006 airfoil

Details
(naca16006-il) NACA 16-006
NACA 16-006 airfoil
Max thickness 6% at 50% chord.
Max camber 0% at 0% chord
Source [UIUC Airfoil Coordinates Database](#)
[Source dat file](#)
The dat file is in Selq format

Dat file
NACA 16-006
1. 0000 0.00060
0.9500 0.00707
0.9000 0.01259
0.8000 0.02099
0.7000 0.02635

Parser
No parser warnings

[Send to airfoil plotter](#)
[Add to comparison](#)
[Lednicer format dat file](#)
[Selq format dat file](#)

Similar airfoils
GOE 445 AIRFOIL
NACA 64-008A AIRFOIL
NACA 0008-34

[Preview](#) [Details](#)
[Preview](#) [Details](#)
[Preview](#) [Details](#)

Otwarty plik w nowej karcie przeglądarki internetowej należy zapisać, jako plik tekstowy klikając prawym przyciskiem myszy i wybierając funkcję Zapisz stronę jako.

Dokument należy otworzyć w np. Excelu, w celu sformatowania danych na potrzeb programu ANSYS.

Wyświetlone dane składają się z dwóch kolumn liczb, będących odpowiednio (w wierszu) współrzędnymi na płaszczyźnie XY.

Plik koordynacyjny tworzyć będzie 5 kolumn:

- W pierwszej należy umieścić cyfry 1 lub 2, które określać będą odpowiednio górną oraz dolną linię profilu; cyfrą 1 oznaczamy punkty w których wartość współrzędnej X zmienia się rosnąco w przedziale $<0 ; 1>$, pozostałe punkty zaliczamy do grupy 2,

- W kolumnie drugiej znajdować się będą liczby porządkowe tj. 1,2,3 itd. numerujące punkty dolnej oraz górnej linii profilu łopatki,
- Trzecia kolumna powinna zawierać współrzędne X, natomiast 4 współrzędne Y,
- W kolumnie nr 5 umieścić należy współrzędne Z, w tym wypadku analizowana jest geometria 2D, więc kolumnę tę tworzą same 0.

Tak zmodyfikowany plik należy zapisać przy użyciu kodowania ANSI w Notatniku. Następnie przy użyciu funkcji Znajdź/Zamień należy przerwy (tabulatory) pomiędzy kolumnami zastąpić spacjami. Gotowy plik koordynacyjny (rys. poniżej) należy ponownie zapisać.

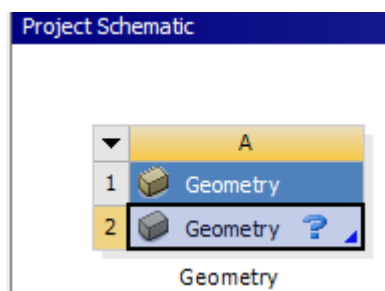
```
1 1 0.000000 0.000000 0
1 2 0.005000 0.008160 0
1 3 0.007500 0.009830 0
1 4 0.012500 0.012500 0
1 5 0.025000 0.017370 0
1 6 0.050000 0.024120 0
1 7 0.075000 0.029170 0
1 8 0.100000 0.033240 0
1 9 0.150000 0.039500 0
1 10 0.200000 0.044000 0
1 11 0.250000 0.047140 0
1 12 0.300000 0.049130 0
1 13 0.350000 0.049950 0
1 14 0.400000 0.049680 0
1 15 0.450000 0.048370 0
1 16 0.500000 0.046130 0
1 17 0.550000 0.043110 0
1 18 0.600000 0.039430 0
1 19 0.650000 0.035170 0
1 20 0.700000 0.030440 0
1 21 0.750000 0.025450 0
1 22 0.800000 0.020400 0
1 23 0.850000 0.015350 0
1 24 0.900000 0.010300 0
1 25 0.950000 0.005250 0
1 26 1.000000 0.000210 0
2 1 0.000000 0.000000 0
2 2 0.005000 -0.008160 0
2 3 0.007500 -0.009830 0
2 4 0.012500 -0.012500 0
2 5 0.025000 -0.017370 0
```

2. Tworzenie geometrii łopatki

W platformie ANSYS Workbench z zakładki **Toolbox->Component Systems** należy przeciągnąć komórkę **Geometry** do okna **Project Schematic**.

Uwaga: warto już na samym początku zapisać utworzony projekt oraz sukcesywnie zapisywać dokonywane zmiany. Pamiętać należy o wyeliminowaniu polskich znaków i symboli specjalnych ze ścieżki zapisu oraz z nazw plików.

Następnie w celu rozpoczęcia pracy nad geometrią należy dwukrotnie kliknąć na **Geometry** w komponencie A, domyślnie otworzy się **Design Modeler**, którym możesz konstruować oraz modyfikować geometrię.



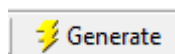
2.1. Tworzenie geometrii na podstawie pobranych danych profilu łopatk

- 1) Należy wybrać funkcję **Create → Point**

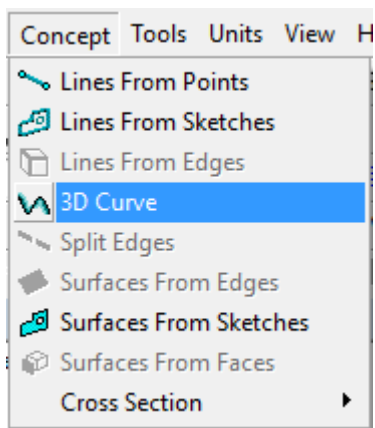
W zakładce ustawień jako **Coordination file** należy wybrać stworzony wcześniej plik tekstowy.

Details View	
Details of Point1	
Point	Point1
Type	Construction Point
Definition	From Coordinates File
Coordinates File	C:\Users\student\Desktop\Niemczyk\łopatka.txt
Coordinates Unit	Meter
Base Plane	XYPlane
Tolerance	Normal
Refresh	No
# Points generated	61
# Groups generated	2

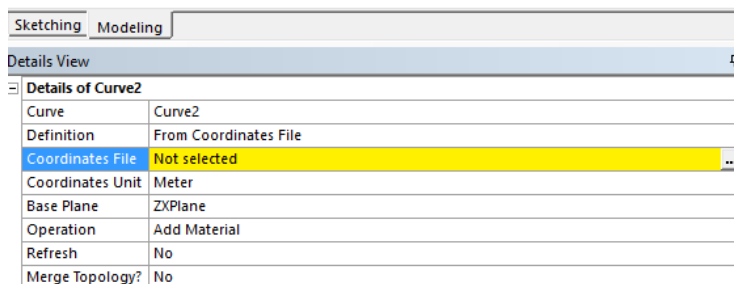
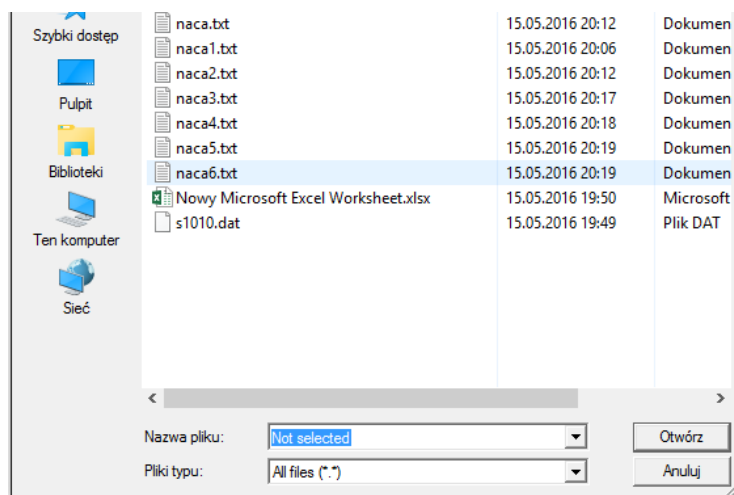
Po wykonaniu każdej czynności należy kliknąć na ikonę **Generate**



- 2) Następnie należy utworzyć krzywą, której zadaniem jest połączenie utworzonych punktów. W tym celu należy wybrać funkcję: **Concept → 3D Curve**.

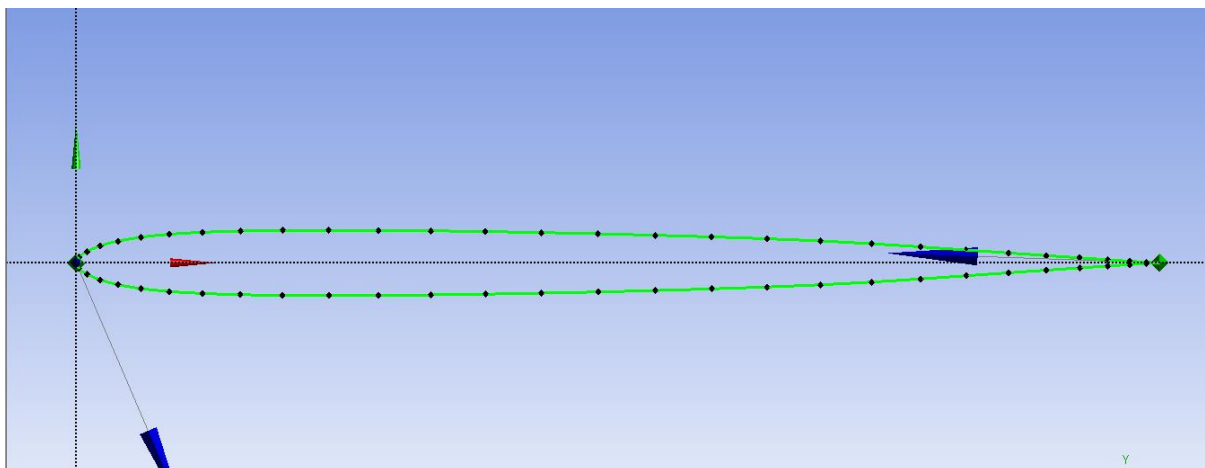


Następnie w zakładce ustawień, jako **Coordination file** należy wybrać stworzony wcześniej plik tekstowy.



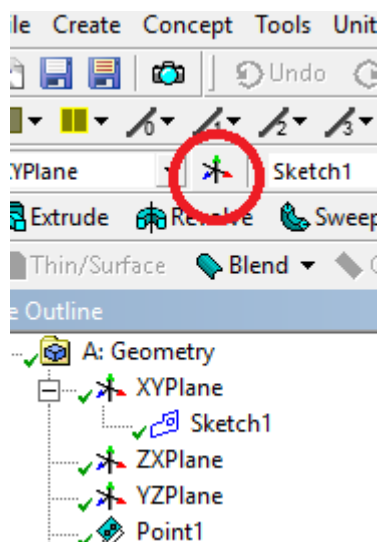
- Jeśli punkty znajdujące się przy wierzchołkach łopatki nie są połączone należy połączyć je ręcznie, np. dorysowując linię między odpowiednimi punktami **lub** dodanie brakującego punktu w pliku tekstowym.

Po wykonaniu powyższych czynności geometria powinna wyglądać następująco:



4) W kolejnym kroku przekształcamy krzywe w zamkniętą powierzchnię. W zakładce **Concept** wybieramy narzędzie **Surfaces From Edges**. Wskazujemy krzywe i generujemy powierzchnię odpowiadającą powierzchni przekroju profilu.

5) Aby móc manipulować kątem natarcia płata, konieczne jest stworzenie nowego układu współrzędnych poprzez wybranie opcji **New plane**. Położenie nowego układu będzie modyfikowane względem bazowego układu odniesienia (tzw. Układu bezwzględnego).



Nowy układ współrzędnych tworzymy w oparciu o układ bazowy tj. w oknie **Details View** w polu **Type** należy wpisać **From Plane**, w polu **Base Plane** zaznaczyć płaszczyznę **XYPlane**, a w polu **Transform** należy wpisać **Rotate about Z**.

Następnym krokiem jest parametryzacja układu współrzędnych (nadanie możliwości rotacji układu względem osi z). Rotacja będzie odpowiadać kątowi natarcia na profil.

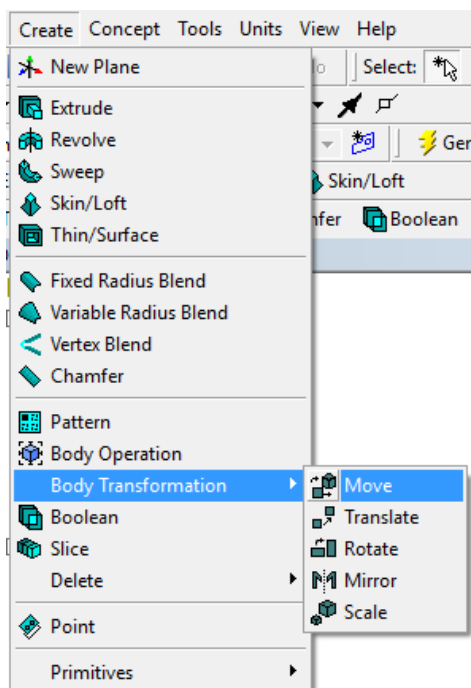
Details View	
Details of Plane4	
Plane	Plane4
Sketches	0
Type	From Plane
Base Plane	XYPlane
Transform 1 (RMB)	Rotate about Z
FD1, Value 1	10 °
Transform 2 (RMB)	None
Reverse Normal/Z-Axis?	No
Flip XY-Axes?	No
Export Coordinate System?	No

The screenshot shows the SolidWorks software interface. In the top toolbar, the 'Parameters' button is circled in red. Below the toolbar, the 'Parameter Editor' dialog box is open, displaying a table with the following data:

	Name	Value	Type	Comment
✓	katnatarcia	0°	Angle	

At the bottom of the dialog, there are 'Check' and 'Close' buttons.

- W tym celu należy kliknąć **Create** → **Body Transformation** → **Move**



W oknie **Details View** jako **Source Plane** należy wybrać płaszczyznę podstawową **XYPlane** natomiast jako docelową płaszczyznę nowoutworzoną np. **Plane4** (poprzez jej wybranie z listy operacji).

Details View	
Details of Move1	
Move	Move1
Move Type	By Plane
Preserve Bodies?	No
Source Plane	XYPlane
Destination Plane	Plane4
Bodies	1

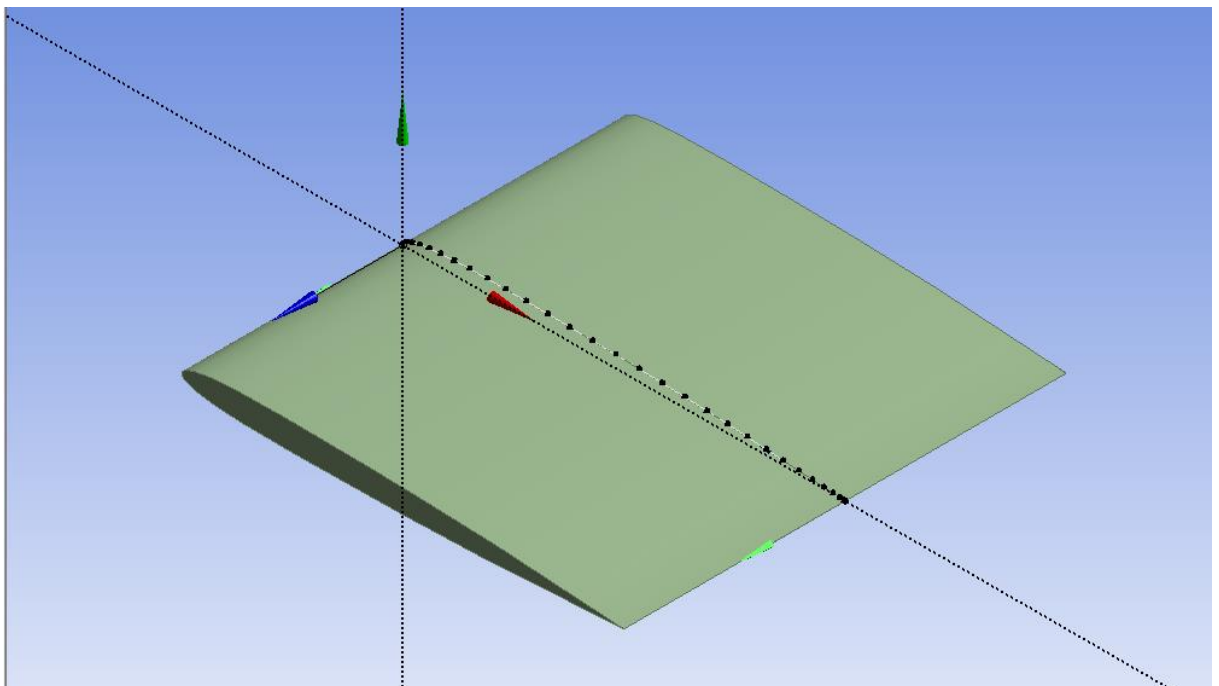
W oknie **Bodies** należy zaznaczyć powierzchnię profilu łopatk. Podczas wybierania powierzchni należy pamiętać aby w pasku narzędzi zaznaczone było pole , dzięki któremu domyślnie oznacza się powierzchnie.

Dzięki znajdującym się obok ikonkom można zaznaczać kolejno punkt, krawędź, powierzchnię lub bryłę. 

- 7) Kolejnym etapem będzie wyciągnięcie profilu łopatk, przy użyciu funkcji **Extrude**. Dla pól **Geometry** oraz **Direction Vector** należy zaznaczyć powierzchnię łopatk. Łopatkę należy wyciągnąć symetrycznie w obu kierunkach, a jej szerokość ma wynosić 0,5 m.

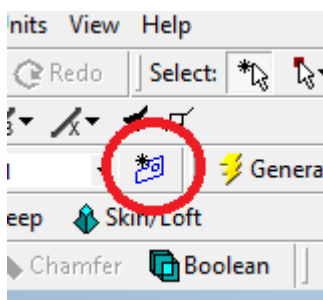
Details View	
Details of Extrude1	
Extrude	Extrude1
Geometry	1 Face
Operation	Add Material
Direction Vector	Face Normal
Direction	Both - Symmetric
Extent Type	Fixed
☐ FD1, Depth (> 0)	0,5 m
As Thin/Surface?	No
Merge Topology?	Yes
Geometry Selection: 1	
Face	1

Po wykonaniu powyższych operacji geometria powinna wyglądać następująco:

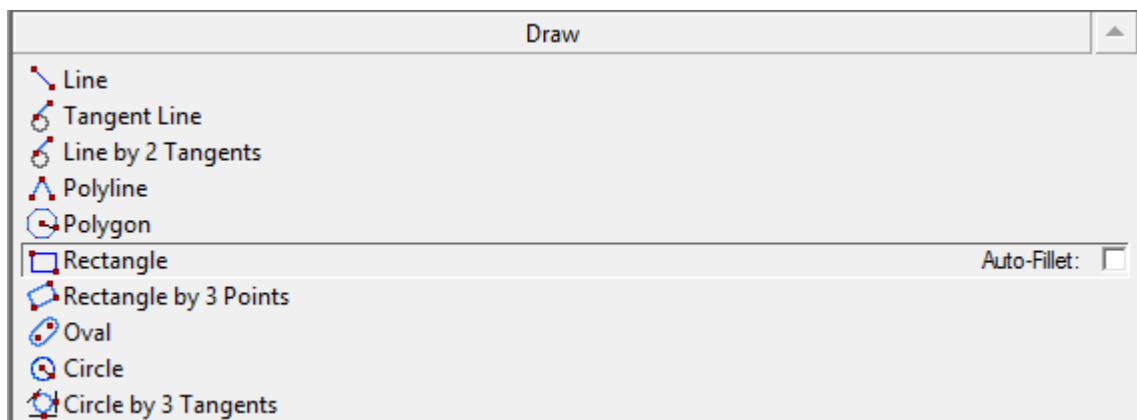


8) Następnym etapem będzie stworzenie płynu (powietrza) omywającego łopatkę.

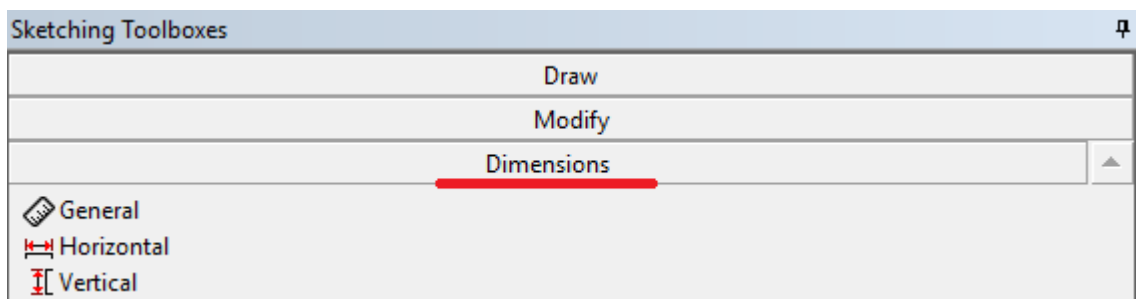
Należy wybrać płaszczyznę XY w drzewie projektu (**XYPlane**), a następnie utworzyć nowy szkic klikając na ikonę **New Sketch**.



- 9) Płyn ten będzie prostopadłościenną bryłą otaczającą łopatkę. W tym celu należy na utworzonym szkicu narysować prostopadłościan **Rectangle** dostępny w menu szkicowania **Sketching**.



Kolejnym etapem będzie zwymiarowanie narysowanego prostokąta. W tym celu należy przejść do zakładki **Dimensions** oraz przy użyciu wymiarów wertykalnych oraz horyzontalnych zwymiarować prostokąt, tak aby jego lewa krawędź znajdowała się 5 m przed łopatką, prawa krawędź 10 m za noskiem łopatki, natomiast górna oraz dolna 5 m od osi Z. Podczas wymiarowania należy najpierw zaznaczyć odpowiednią oś a następnie krawędź prostokąta i w okienku **Details View** wpisać odpowiednią wartość.

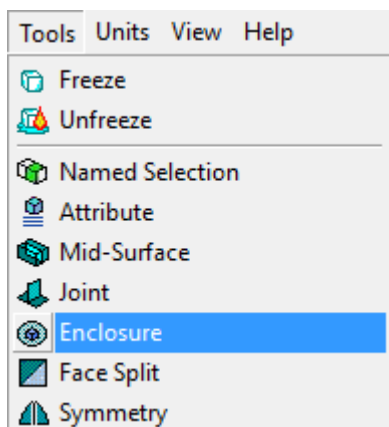




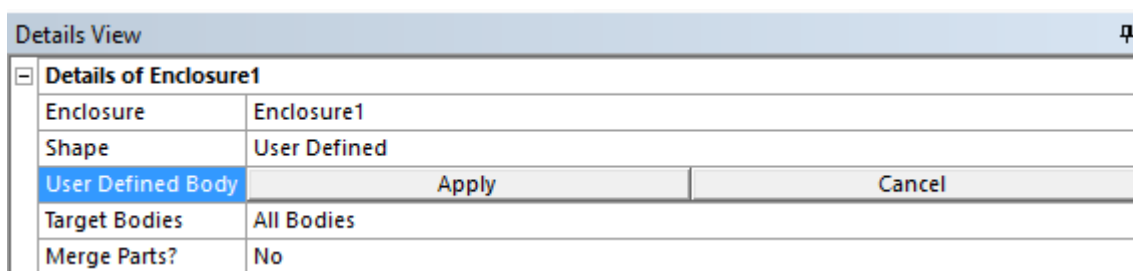
- 10) Następnym krokiem jest wyciągnięcie stworzonego prostokąta przy użyciu już wcześniej wykorzystanej funkcji **Extrude** → **Sketch**. W oknie **Details View** opcję **Add Material** należy zamienić na **Add Frozen**, a głębokość wyciągnięcia należy ustalić na 0,1 m. Głębokość wyciągnięcia należy również oznaczyć, jako parametr (zaznaczając pole ☐) i nadać mu nazwę np. gruboscpowietrza. Parametr ten będzie istotny w momencie generowania siatek o określonej grubości.

Details View		⌵
[-] Details of Extrude2		
Extrude	Extrude2	
Geometry	Sketch1	
Operation	Add Frozen	
Direction Vector	None (Normal)	
Direction	Normal	
Extent Type	Fixed	
☒ FD1, Depth (>0)	0,1 m	
As Thin/Surface?	No	
Merge Topology?	Yes	
[-] Geometry Selection: 1		
Sketch	Sketch1	

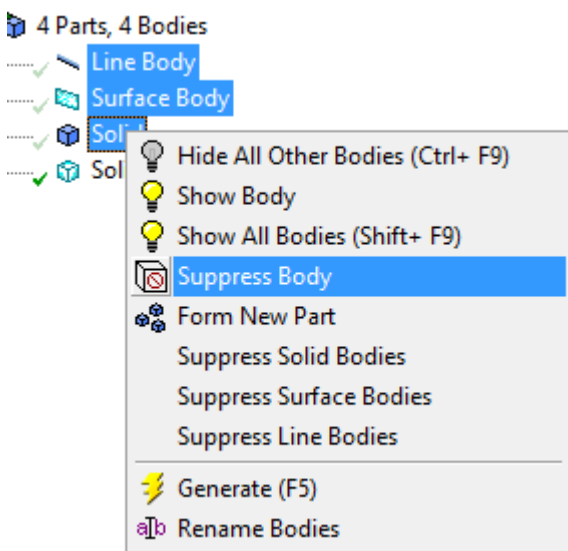
- 11) Kolejnym etapem tworzenia geometrii jest odjęcie od prostopadłościenną objętości zajmowanej przez powietrze objętości łopatki, tak aby w jej miejscu pozostała pustka. Dzięki temu w dalszej części projektu możliwe będzie określenie parametrów charakteryzujących płyn również na granicach powietrze – łopatka. W tym celu należy w pasku narzędzi wybrać opcję **Tools** → **Enclosure**.



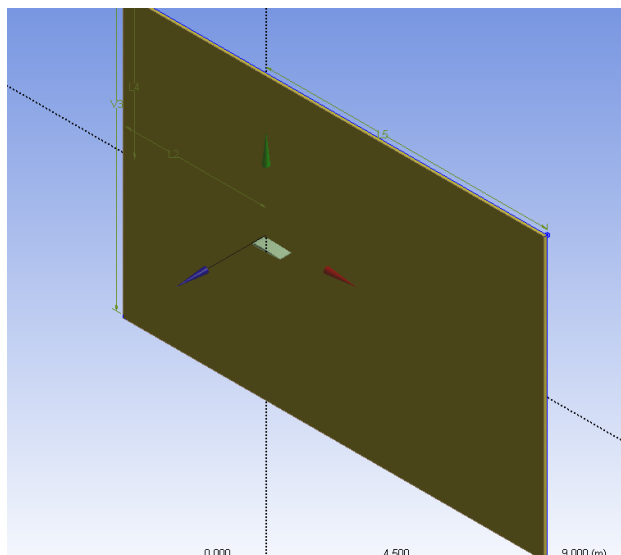
Następnie w oknie **Details View** w polu **Shape** należy wybrać opcję **User Defined** oraz zaznaczyć myszką prostopadłościan.



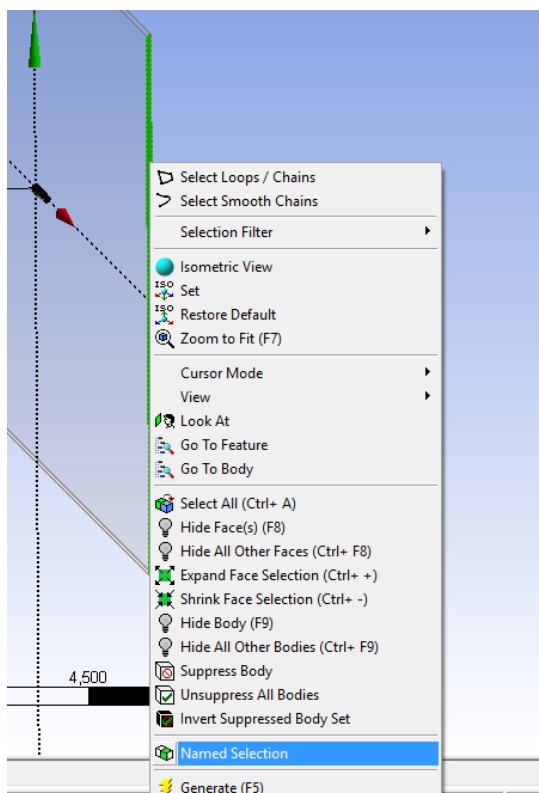
Przy skomplikowanych geometriach wybór odpowiednich powierzchni ułatwić może ukrycie części elementów znajdujących się na rysunku poprzez ich zaznaczenie i wybranie opcji **Suppress Body** po kliknięciu prawym przyciskiem myszy.



Po wykonaniu powyższych czynności geometria powinna wyglądać następująco:



- 12) Należy również zdefiniować poszczególne powierzchnie prostopadłościanu. W tym celu należy zaznaczyć powierzchnię, a następnie klikając prawym przyciskiem myszy wybrać polecenie **Named Selection**. Przedniej ścianie (od strony natarcia na łopatkę) należy nadać nazwę „wlot” (lub inlet), tylnej „wylot” (lub outlet), a pozostałym odpowiednio „symetriaA”, „symetriaB” (największe powierzchnie po obu stronach powietrza, „gorna” oraz „dolna” (małe, długie, ścianki powietrza na górze i dole bryły). Nazwę „płat” należy nadać ścianką stykającą się z płatem (ścianki wewnątrz wycięcia po płacie).



Zdefiniować należy również powierzchnie bezpośrednio stykające się z łopatką. W tym celu należy uaktywnić niewidoczne ścianki (poprzez polecenie **Unsuppress**) i nadać im nazwę np. plat.

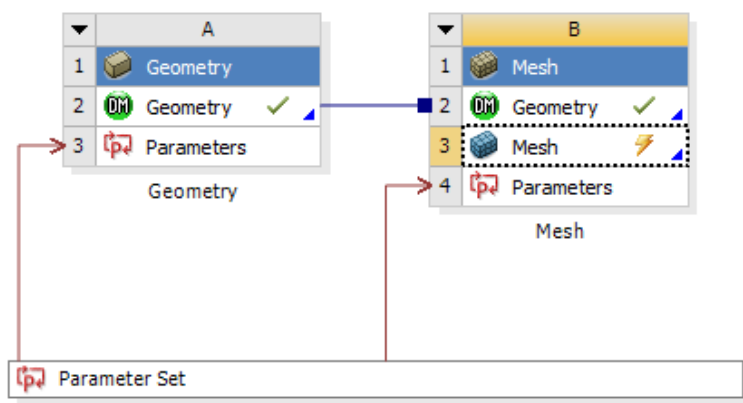
Geometria jest już gotowa!

Należy jeszcze tylko zmienić wartość parametru gruboscpowietrza na 5 mm.

Pamiętaj o zapisaniu dokonanych zmian w projekcie oraz odświeżeniu projektu w Workbench poprzez polecenie **Refresh Project!**

3. Tworzenie siatki

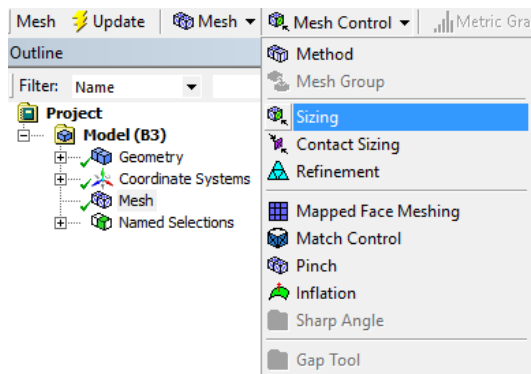
- 1) Dodajemy komponent **Mesh** do projektu (analogicznie do geometrii), który łączymy z komponentem **Geometry** oraz aktualizujemy projekt **Update Project**



- 2) Klikając dwukrotnie na Mesh przenosimy się do programu tworzącego siatkę
- 3) Klikając w drzewie operacji na **Mesh** w oknie **Defaults** jako **Physics Preference** wybieramy **CFD** natomiast jako **Solver Preference** opcję **CFX** oraz aktualizujemy siatkę. Mesh ⚡ Update

Defaults	
Physics Preference	CFD
Solver Preference	CFX
☐ Relevance	0

- 4) Następnie dobieramy parametry siatki: **Mesh control->Sizing**.



5) W detalach ustalamy:

Scoping method: Named selection

Named selection: plat

Type -> Element size

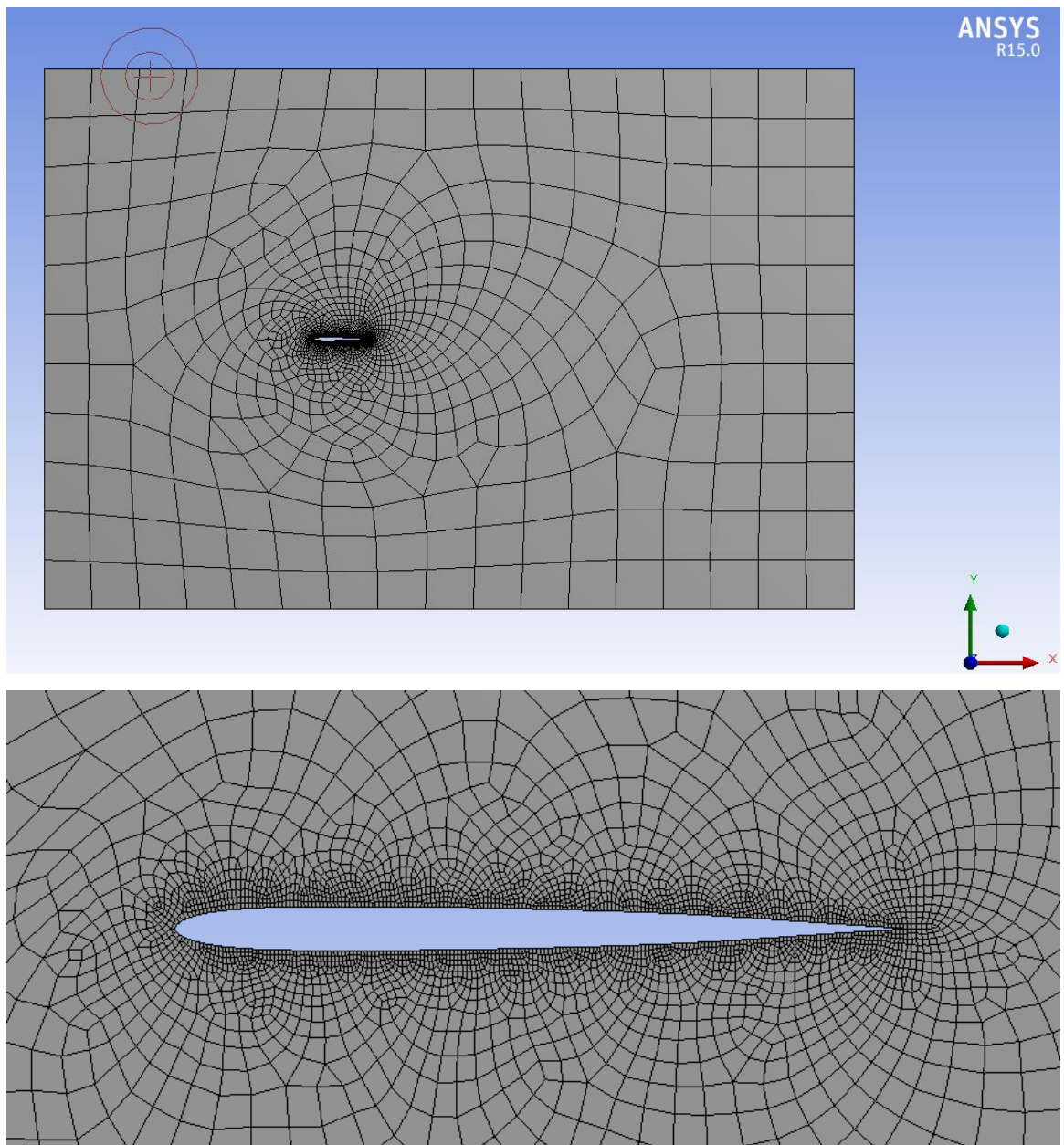
Element size -> 0,005 m

Local Min Size: Default

Details of "Face Sizing" - Sizing			
[-] Scope			
Scoping Method		Named Selection	
Named Selection		plat	
[-] Definition			
Suppressed		No	
Type		Element Size	
☐ Element Size		5,e-003 m	
Behavior		Soft	
☐ Curvature Normal Angle		Default	
☐ Growth Rate		Default	
☐ Local Min Size		Default (5,e-003 m)	

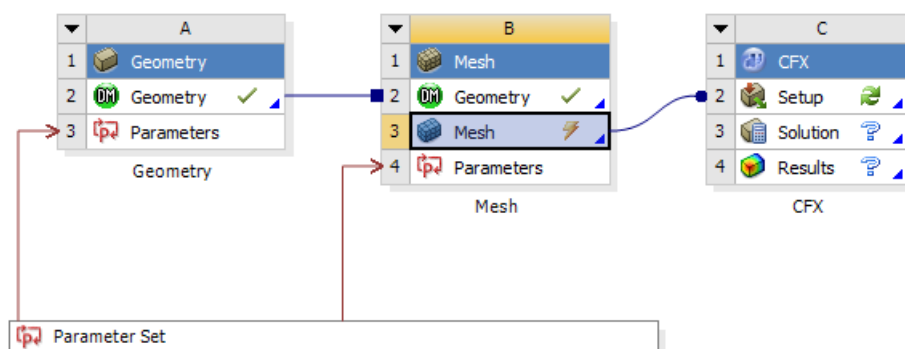
Następnie należy ponownie zaktualizować siatkę: Mesh Update

Przykładowy widok uzyskanej siatki przedstawiono poniżej:



4. Dodanie Solvera

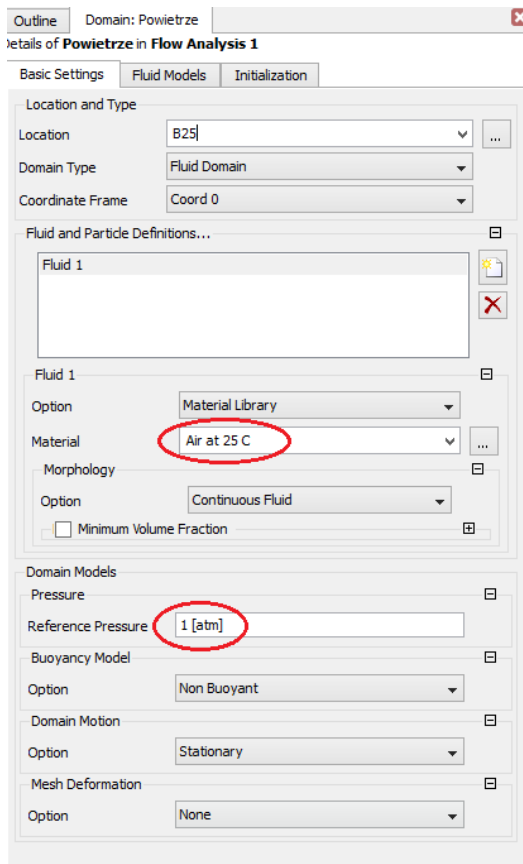
- 1) Dodajemy komponent **CFX** (z Component Systems po lewej stronie), a następnie łączymy go z komponentem **Mesh** wg poniższego rysunku:



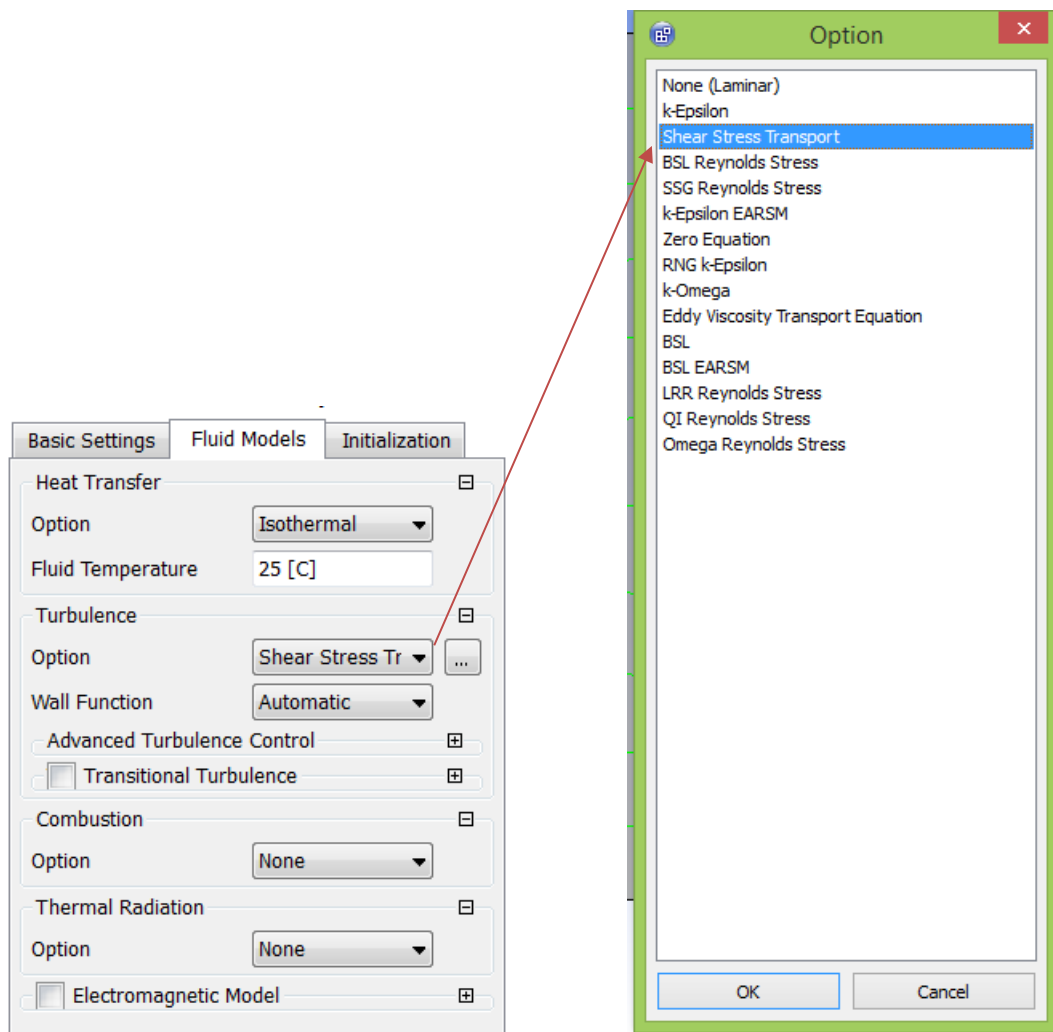
Po połączeniu klikamy **Update Project**.

- 2) Dwukrotnym kliknięciem otwieramy **Setup** i tworzymy nową domenę, klikając na ikonę: . Ponieważ nasz płat będzie otaczało powietrze, nazywamy domenę „powietrze”.

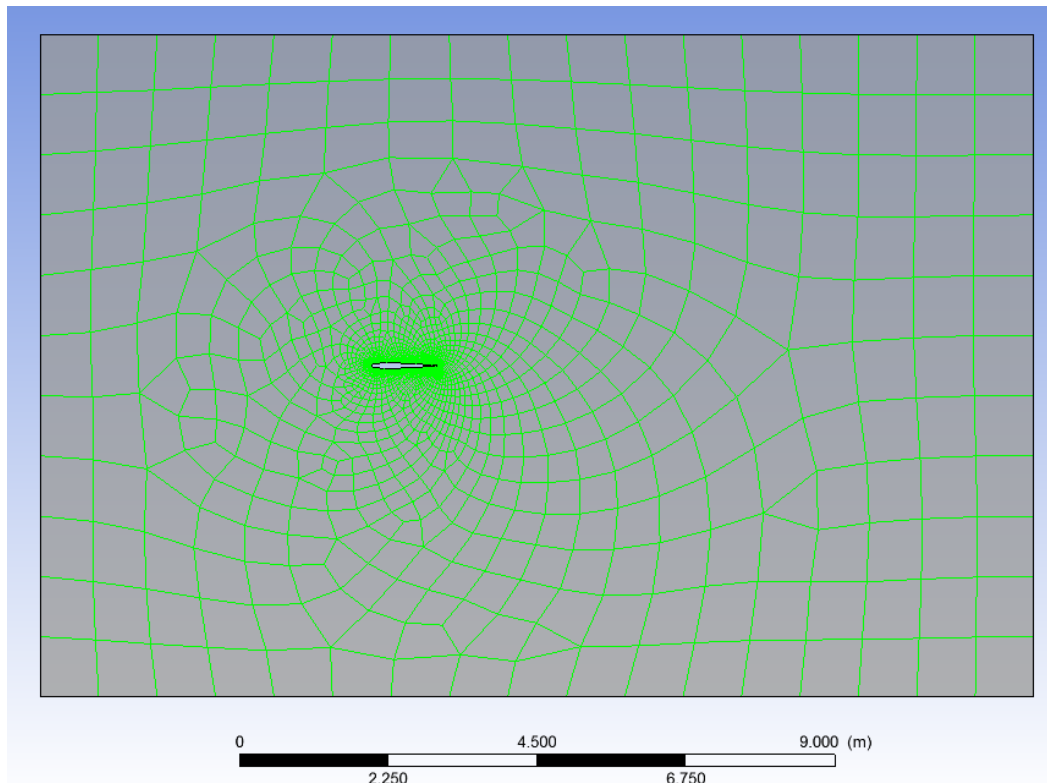
- 3) W zakładce **Basic Settings** wybieramy **Material** jako **Air at 25 C** oraz ustawiamy ciśnienie na 1atm.



- 4) Przechodzimy do zakładki **Fluid Models**. Nie uwzględniamy przepływu ciepła, dlatego w opcjach **Heat Transfer** wybieramy **Isothermal**, a temperaturę płynu 25 C. Jako model turbulencji wybieramy model SST (**Shear Stress Transport**) oraz ustawiamy **Automatic** w opcji **Wall Function**. Na koniec klikamy **Apply**.

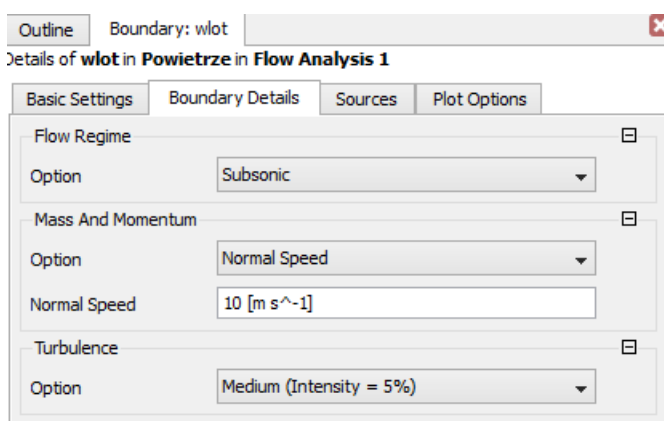


Przy tworzeniu domeny utworzona wcześniej siatka powinna podświetlić się na zielono, jak na rysunku poniżej:

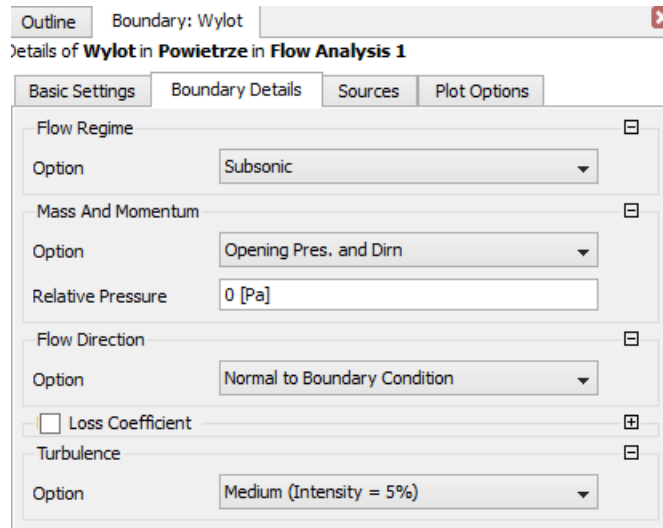
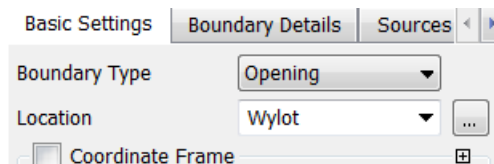


4.1. Dodawanie warunków brzegowych

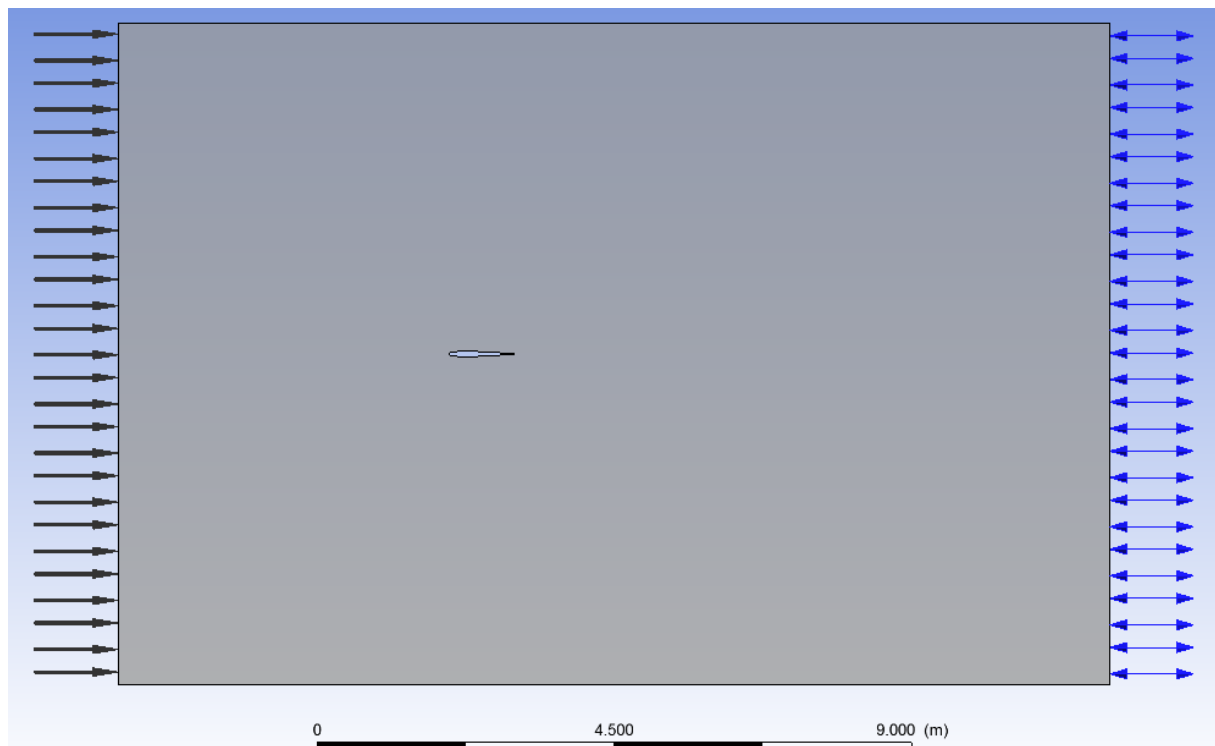
- 1) W kolejnym kroku należy określić warunki brzegowe dla obliczeń. W tym celu klikamy na ikonę  i tworzymy kolejno warunki brzegowe „wlot” i „wylot”. Dla warunku brzegowego nazwanego „wlot” ustawiamy prędkość początkową na 10 m/s. Klikamy **Apply**.



Dla warunku „wylot” w zakładce **Basic Settings** jako typ warunku brzegowego ustawiamy **Opening**, natomiast w zakładce **Boundary Details** ciśnienie relatywne przyjmujemy równe 0 Pa.

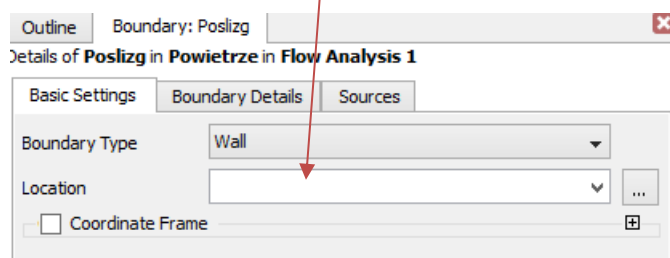


Klikamy **Apply**. Po dodaniu powyższych warunków brzegowych, po prawej i lewej stronie płaszczyzny powietrza powinny pojawić się strzałki:

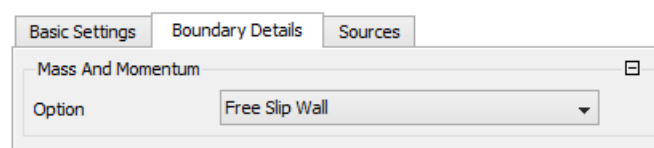


- 2) Na górnej i dolnej powierzchni tworzymy kolejny warunek brzegowy, klikając na ikonę **Boundary** (jak w punkcie 5). Ten warunek nazwiemy „poslizg”, jako typ warunku brzegowego wybieramy **Wall** w **Basic Settings**, a jako lokalizację

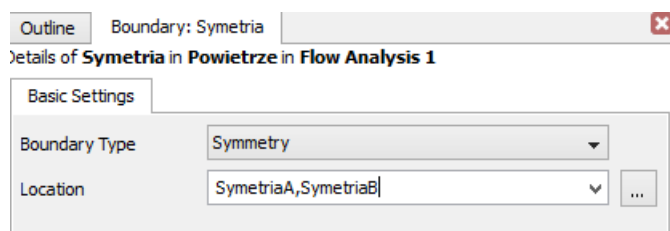
wskazujemy płaszczyzny górną oraz dolną (należy wybrać z listy nazwy płaszczyzn, które zostały im nadane podczas tworzenia geometrii łopatki – patrz punkt 4.1.).



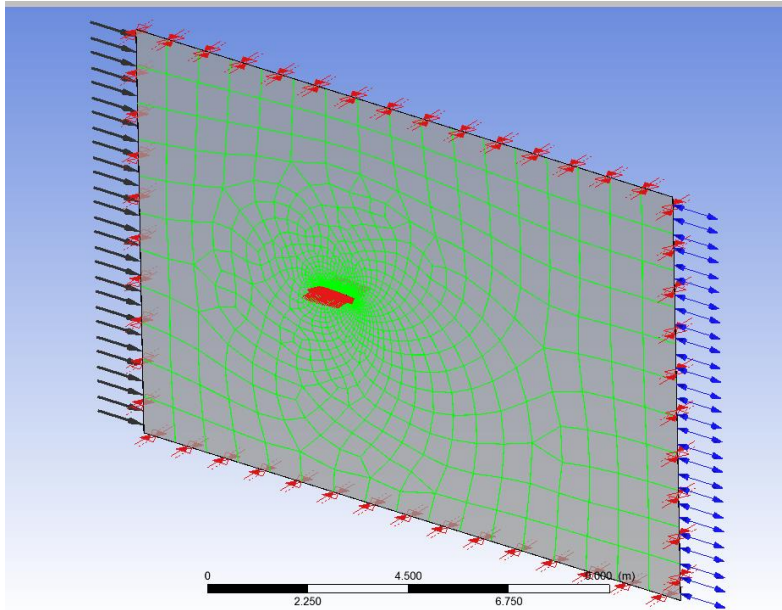
Następnie należy w zakładce **Boundary Details** wybrać opcję **Free Slip Wall**, która odzwierciedla poślizg (przepływ bez tarcia). Następnie, aby zapisać warunek brzegowy, klikamy **Apply**.



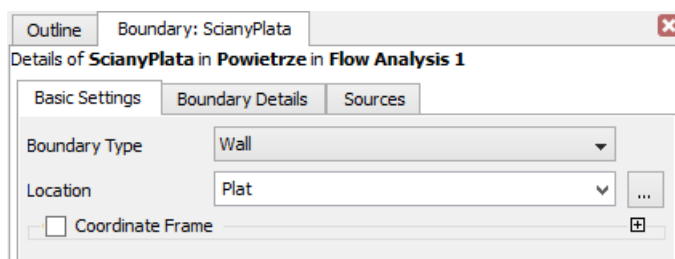
- 3) Kolejnym warunkiem brzegowym są warunki symetrii. Klikamy **Boundary** i nazywamy nowy warunek „symetria”. Jako typ warunku wybieramy **Symmetry** i wskazujemy wcześniej nazwane płaszczyzny „SymetriaA” oraz „SymetriaB”.



Klikamy **Apply**. Po dodaniu powyższych warunków brzegowych, projekt wygląda jak na poniższym rysunku:



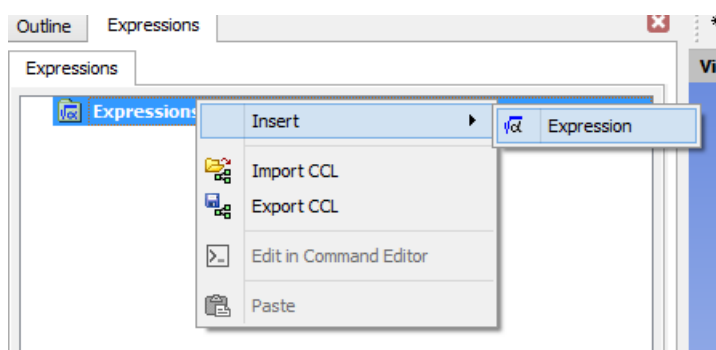
- 4) W celu utworzenia ostatniego warunku brzegowego, klikamy **Boundary** i nazywamy warunek brzegowy „ScianyPlata”. Jako typ wybieramy **Wall**, natomiast jako lokalizację wskazujemy wcześniej nazwaną płaszczyznę „Plat”.



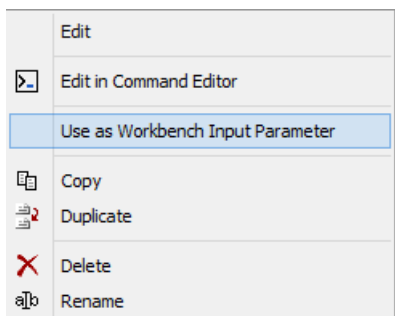
W zakładce **Boundary Details** wybieramy **No Slip Wall** i klikamy **Apply**.

4.2. Dodawanie równań opisujących siły działające na płat

- 1) W drzewie operacji po lewej stronie dwukrotnie klikamy **Expressions**, a następnie prawym przyciskiem myszy na **Expressions** i wskazujemy kolejno: **Insert >> Expression**.



Nazywamy równanie „PrędkoscNatarcia”, pamiętając, aby nie używać polskich znaków. Poniżej w polu **Definition** wpisujemy wartość prędkości natarcia powietrza na łopatkę. Początkowo wpisujemy wartość 10 [m/s] i kliknijmy **Apply**. Wartość ta będzie można edytować później z platformy Workbench. Aby było to możliwe na utworzone równanie należy kliknąć prawym przyciskiem myszy i zaznaczyć opcję **Use as Workbench Input Parameter**.

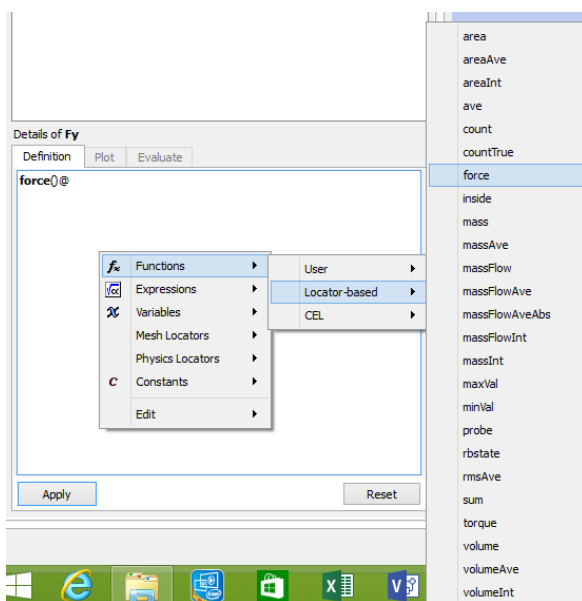


- 2) W kroku następnym ustalimy równania działających na płat sił. W tym celu, tak jak poprzednio, dodajemy nowe równanie, które nazywamy „Fy”. Równanie to będzie odzwierciedlało siłę nośną działającą wzdłuż osi y na nasz płat.

Ogólny schemat równania przedstawiono poniżej:

Funkcja_opcje(argument)@lokalizacja

Aby dodać funkcję opisującą daną siłę, można wpisać ją ręcznie lub wybrać odpowiednie jej komponenty, klikając prawym przyciskiem myszy w polu **Definition**. Aby opisać funkcję Fy, wybieramy następujące opcje: **Functions >> Locator-based >> force**. Za członem „force” dopisujemy „_y”, aby móc później rozróżnić siły działające wzdłuż osi y i wzdłuż osi x.

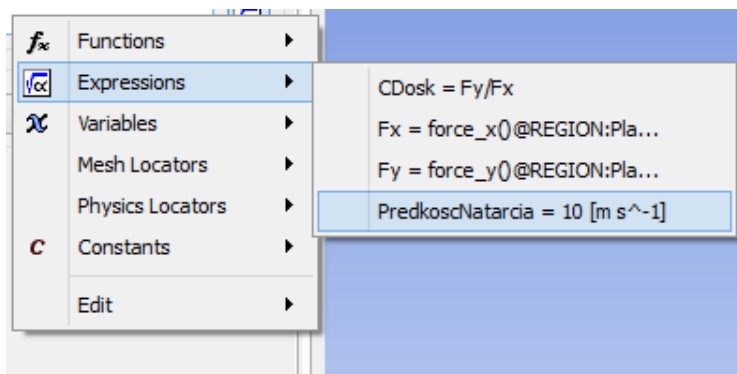


Aby określić lokalizację funkcji wybieramy: **Mesh Locators >> 2D >> Plat**. Klikamy **Apply**. Definicja funkcji wygląda następująco: $force_y()@REGION:Plat$

Dodajemy kolejną siłę, tym razem siłę oporu aerodynamicznego działającą wzdłuż osi x (nazywamy ją F_x). W tym celu powtarzamy kroki, które wykonaliśmy podczas dodawania siły F_y . Za członem $force$ dopisujemy „_x”, co sygnalizuje, że siła działa wzdłuż osi x. Tak samo, jak w przypadku F_y , jako lokalizację wybieramy Plat.

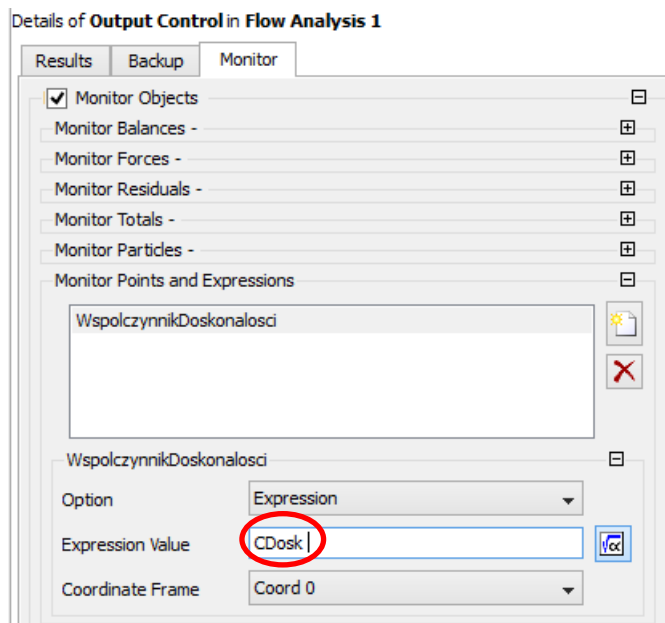
Dodajemy ostatnie już równanie, którym będzie Współczynnik Doskonałości. Nazywamy równanie „CDosk”, a w polu **Definition** wpisujemy zależność: F_y/F_x .

- 3) Przechodzimy do drzewa operacji po lewej stronie i wybieramy wcześniej utworzony warunek brzegowy „wlot”. W zakładce **Boundary Details** w oknie **Normal Speed** usuwamy poprzednio wpisaną wartość i po kliknięciu prawym przyciskiem myszy wybieramy **Expressions >> PredkoscNatarcia**. Aby było to możliwe musimy przełączyć okienko na możliwość wpisywania równań klikając po lewej stronie w symbol pierwiastka . W ten sposób prędkość będzie opisywana dodanym przez nas równaniem, a dzięki temu możliwe będzie edytowanie tej wartości bez otwierania CFX.

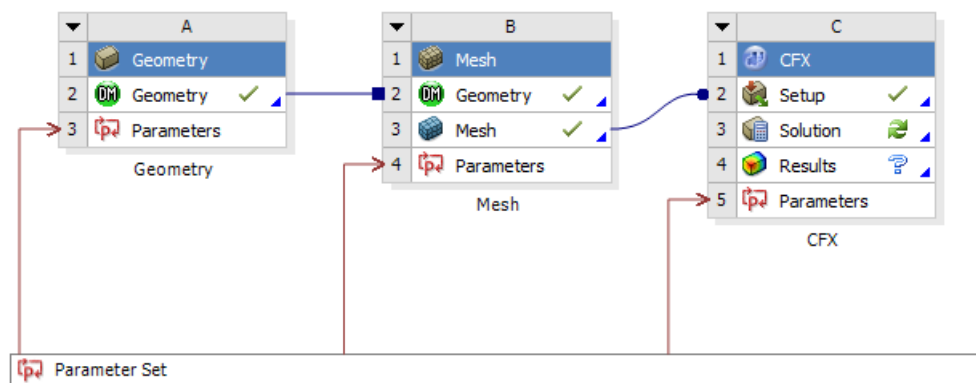


4.3. Dodawanie monitora

- 1) W drzewie operacji wybieramy opcję **Output Control**. Wchodzimy w zakładkę **Monitor**, a następnie zaznaczamy **Monitor Objects**, dodajemy nowy monitor, klikając na ikonę:  i nadajemy nazwę „WspolczynnikDoskonosci”. W polu **Expression Value** wybieramy „CDosk”. W ten sposób możliwe będzie kontrolowanie wartości współczynnika doskonałości.

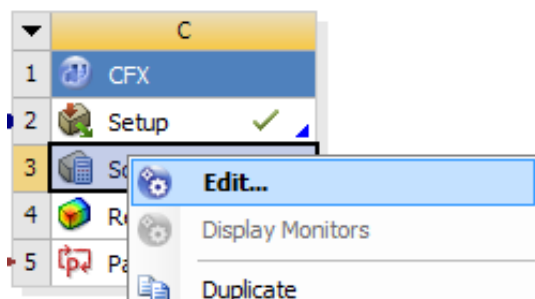


Akceptujemy zmiany, zamykamy CFX i zapisujemy projekt. Po powrocie do Workbench, schemat blokowy projektu wygląda następująco:



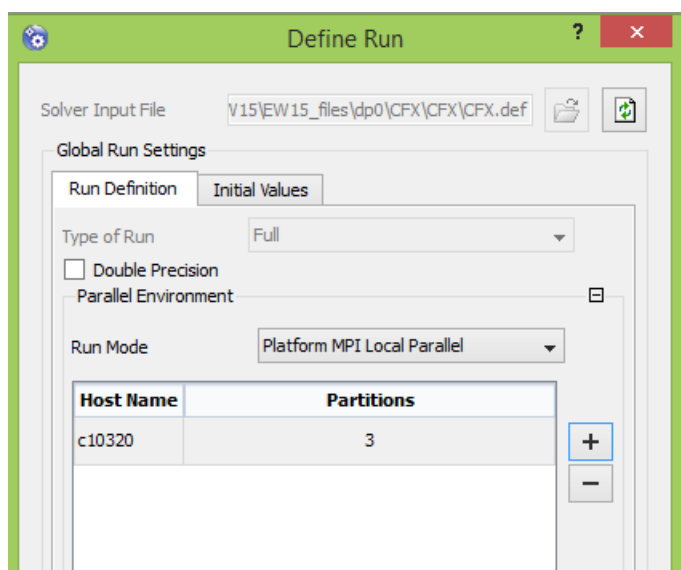
5. Rozwiązanie

- 1) W celu rozpoczęcia obliczeń, należy prawym przyciskiem myszy kliknąć **Solution** i wejść w opcję **Edit**.

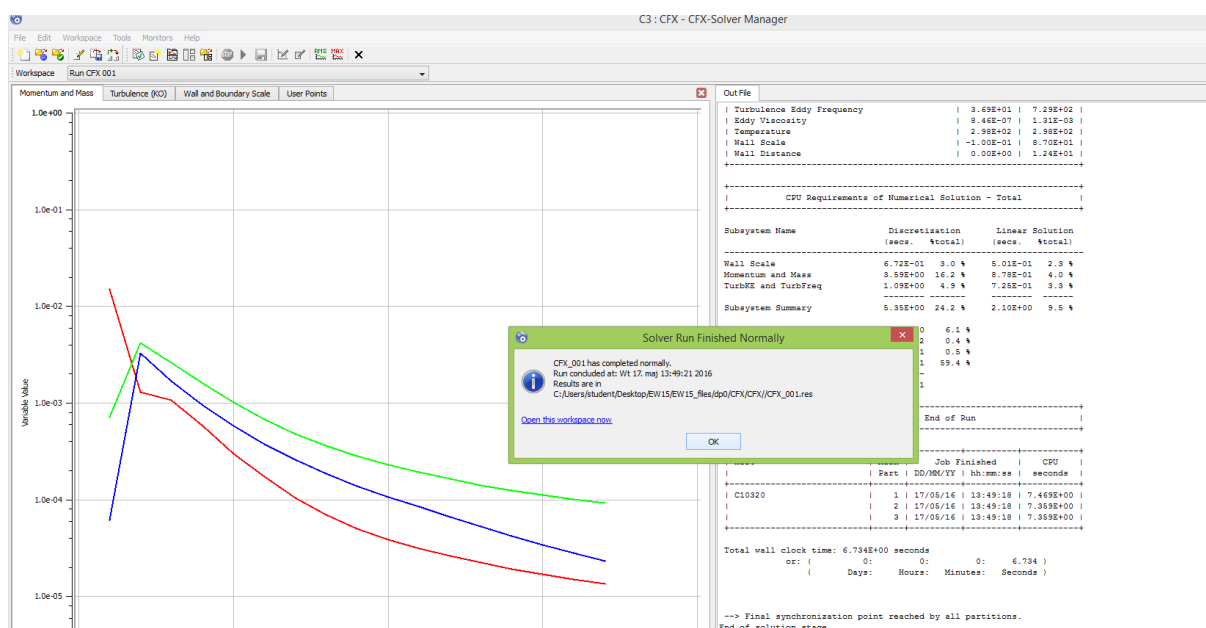


- 2) Pojawi się okno, w którym musimy zdefiniować parametry obliczeniowe, biorąc pod uwagę możliwości naszego komputera (zastosowane ustawienia w instrukcji dotyczą

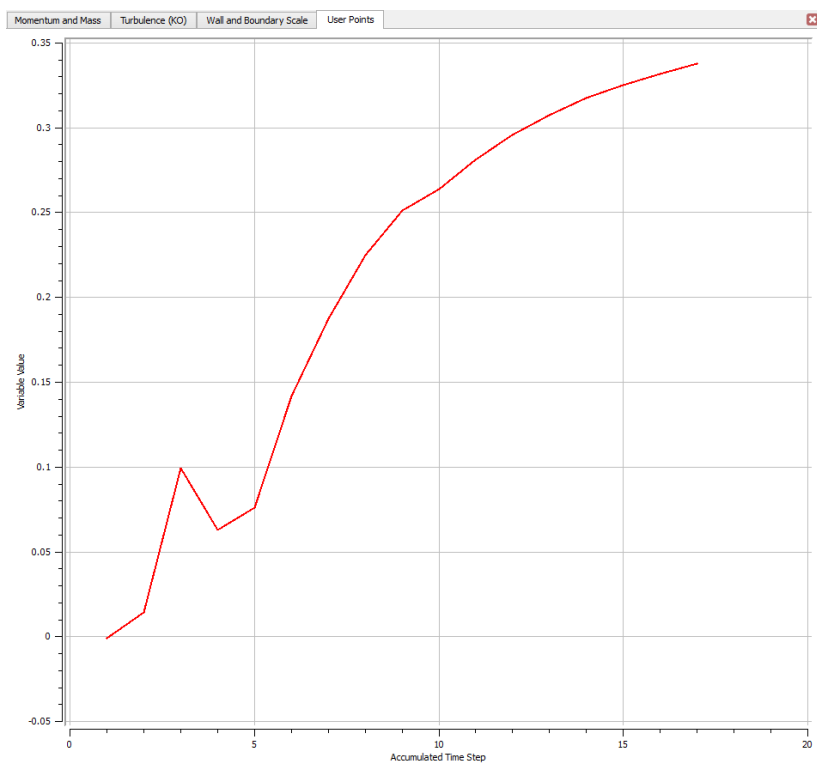
komputerów w Centrum Energetyki, C6, sala 103). W opcji **Run Mode** wybieramy **Platform MPI Local Parallel** (związane z wielowątkowym wykonywaniem obliczeń). Ilość rdzeni ustawiamy na 3. Następnie klikamy **Start Run**.



3) Obliczenia mogą potrwać do kilku minut. Po zakończeniu otrzymujemy następujący rezultat:



Zauważyć można, że rezydua zbiegły się, lecz zagadnienie nie zostało rozwiązane. W zakładce **User Points** widać, że wykres funkcji odpowiadający współczynnikowi doskonałości aerodynamicznej nie ustabilizował się.

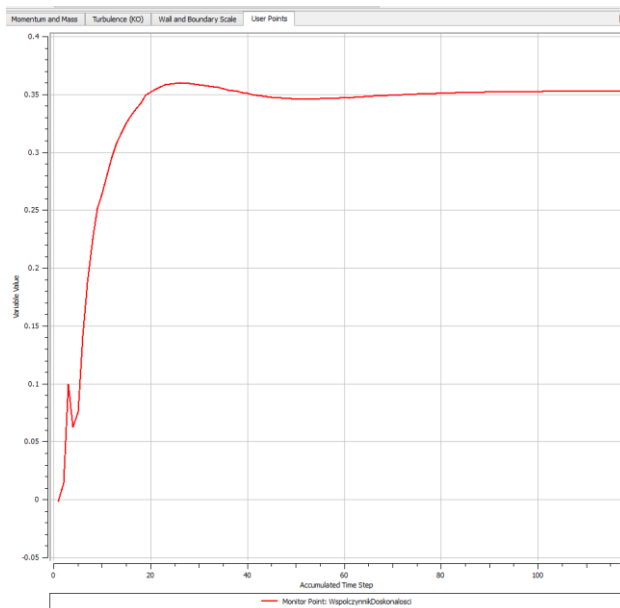


Aby uzyskać rozwiązanie zagadnienia, należy wymusić większą liczbę iteracji. Zamykamy obliczenia i wchodzimy w **Setup**, dwukrotnie klikając. Wybieramy z drzewa operacji **Solver Control**. W zakładce **Basic Settings** w polach minimalna i maksymalna ilość iteracji wpisujemy wartości 100 i 300.

Basic Settings	
Advection Scheme	
Option	High Resolution
Turbulence Numerics	
Option	First Order
Convergence Control	
Min. Iterations	100
Max. Iterations	300
Fluid Timescale Control	

Klikamy **Apply**, zamykamy **Setup** i włączamy jeszcze raz obliczenia, klikając prawym przyciskiem myszy na **Solution** i **Edit**, a następnie ustawiając te same opcje dotyczące komputera.

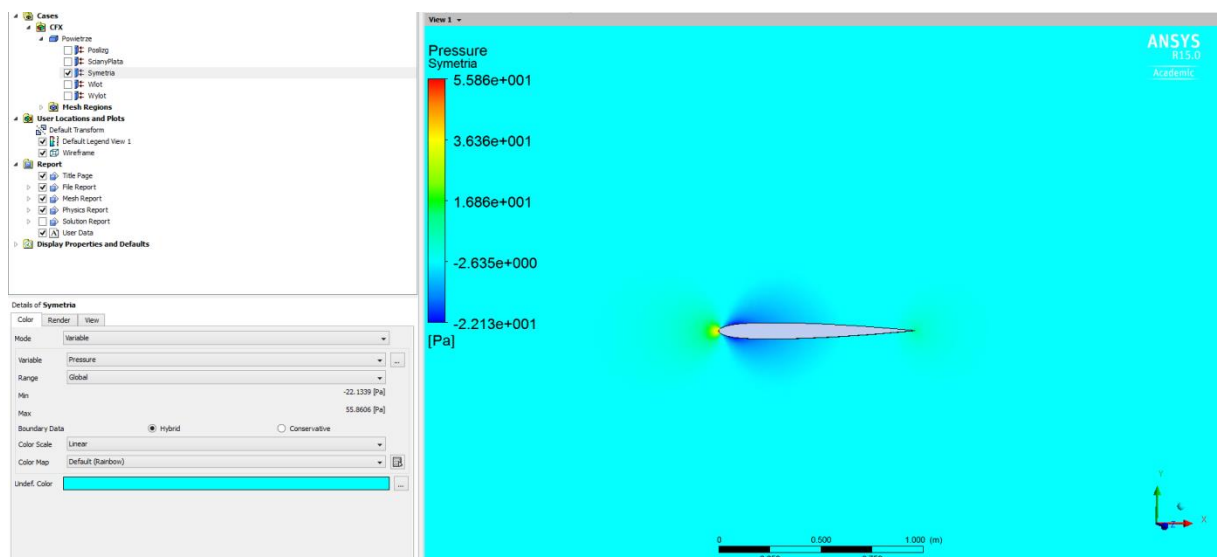
Po wykonaniu obliczeń, na wykresie funkcji ustalił się stały obszar.



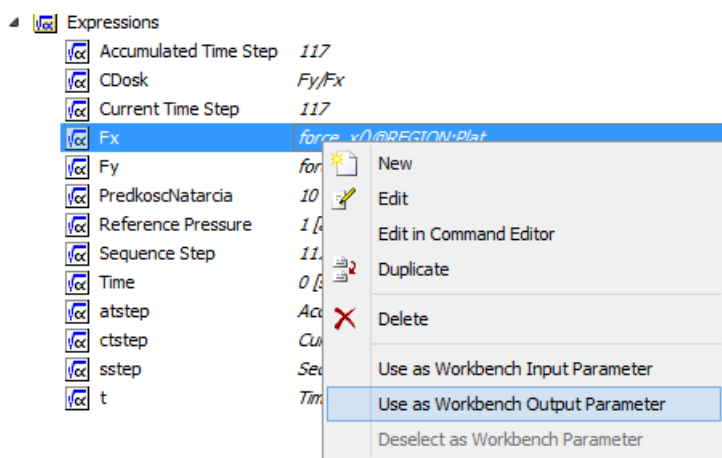
* W zależności od danych wejściowych wykres ten może mieć dowolny przebieg. Jednak warunkiem rozwiązania jest jego asymptotyczny przebieg (asymptota pozioma). Powyższy rysunek jest rysunkiem przykładowym.

Zamykamy okno z obliczeniami.

- 4) Wchodzimy w **Post-CFX**, klikając dwukrotnie **Results**. Klikamy warunek brzegowy **Symetria** i zaznaczamy okienko obok. W ten sposób możemy zobaczyć wyniki obliczeń: poprzez dodanie konturów możemy obserwować rozkład wybranych parametrów fizycznych.



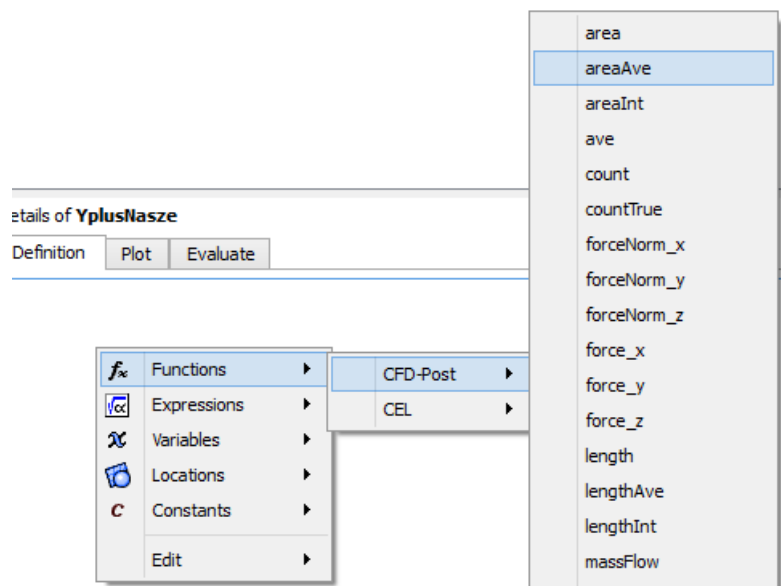
- 5) Klikamy w zakładkę **Expressions**. Dla równań F_x , F_y oraz CD_{osk} prawym przyciskiem myszy klikamy na **Use as Workbench Output Parameter**. W ten sposób będzie możliwe podglądanie i użycie równań z pozycji Workbench.



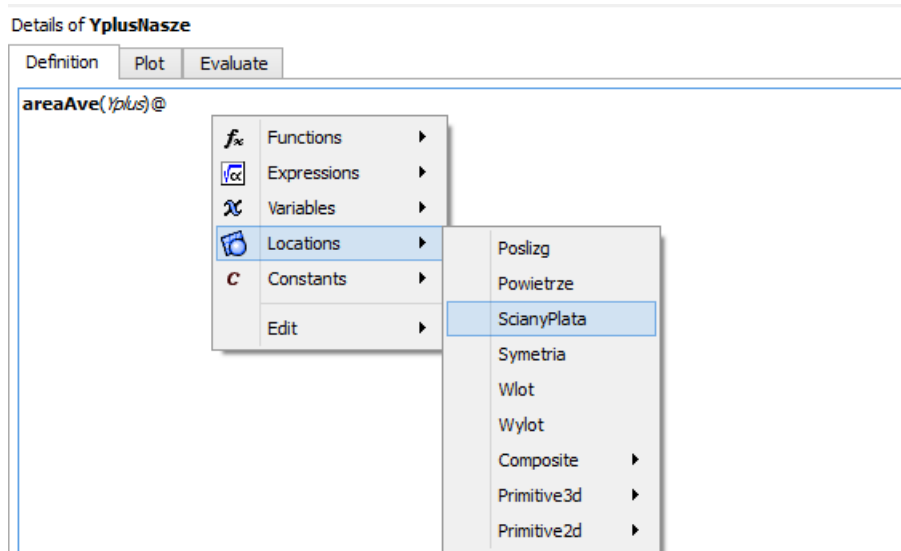
6. Definiowanie y_p^+

Parametr y_p^+ jest liczbą kryterialną, bezwymiarową odległością od ściany, ma zastosowanie w definiowaniu sposobu rozwiązania przepływu w warstwie przyściennej. Parametr ten jest ściśle związany z definicją modelu turbulencji przepływu w obszarach przyściennych. Dla modelu turbulencji SST zakres y_p^+ przyjmuje się pomiędzy 30 a 300 (warstwa przyścienna przybliżana za pomocą funkcji logarytmicznych) lub blisko 1 (modelowanie oderwań i przepływów powrotnych). Wartość y_p^+ zależy od prędkości względnej na danej płaszczyźnie oraz wielkości siatki (wysokości pierwszego elementu). Aby zmniejszyć wartość y_p^+ należy zwiększyć zagęszczenie siatki na płaszczyźnie. Więcej o modelach turbulencji i związanych z nimi zagadnieniach w pliku „Turbulencja” na serwerze.

W **Post-CFX** wybieramy nowe równanie i nazywamy go „YPlusNasze”. W polu **Definition** wybieramy poprzez kliknięcie prawym przyciskiem myszy: **Functions >> CFD-Post >> areaAve**.



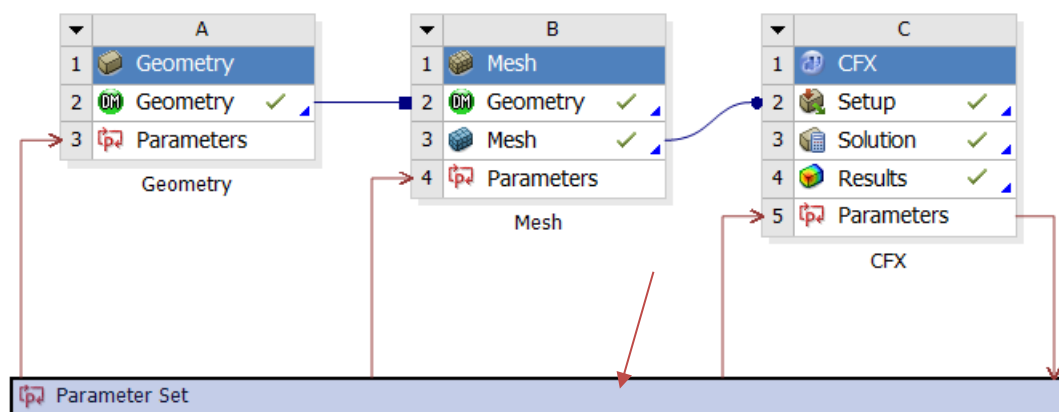
Jako argument wpisujemy Yplus, a jako lokalizację wybieramy ScianyPlata.



Następnie klikamy **Apply** oraz ustawiamy nową funkcję jako parametr wyjściowy dla Workbench (kliknięcie prawym przyciskiem myszy **Use as Workbench Output Parameter**).

7. Przeprowadzenie końcowych obliczeń.

- 1) Wracamy do platformy Workbench. W celu utworzenia macierzy parametrów, klikamy dwukrotnie na szynę parametrów.



	A	B	C	D
1	ID	Parameter Name	Value	Unit
2	Input Parameters			
3	Geometry (A1)			
4	P1	KatNatarcia	0	degree
5	P2	GruboscPowietrza	0,005	m
6	CFX (C1)			
7	P3	PredkosciNatarcia	10	m s ⁻¹
8	New input parameter	New name	New expression	
9	Output Parameters			
10	CFX (C1)			
11	P4	Fx	0,0024075	N
12	P5	Fy	0,00084926	N
13	P6	CDosk	0,35275	
14	P7	YplusNasze	156,98	
15	New output parameter	New name	New expression	
16	Charts			

	A	B	C	D	E	F	G	H
1	Name	P1 - KatNatarcia	P2 - GruboscPowietrza	P3 - PredkosciNatarcia	P4 - Fx	P5 - Fy	P6 - CDosk	P7 - YplusNasze
2	Units	degree	m	m s ⁻¹	N	N		
3	Current	0	0,005	10	0,0024075	0,00084926	0,35275	156,98
4	DP 1	5	0,005	10				
5	*	10						

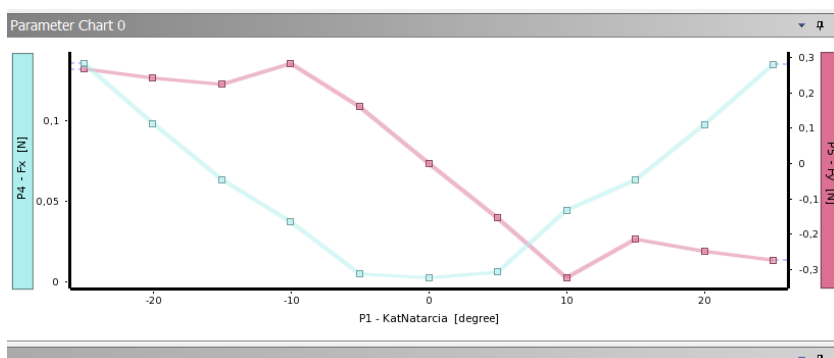
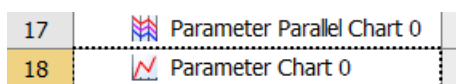
- 2) Symulacja zostanie wykonana co 5 stopni kąta natarcia na łopatkę w zakresie od -25 do 25 (lub innym obejmującym kąty krytyczne dla obu kierunków kąta natarcia). W celu dodania punktów do obliczeń wpisujemy punkty w arkuszu w kolumnie **P1 – KatNatarcia**.

	A	B	C	D	E	F	G
1	Name	P1 - KatNatarcia	P2 - GruboscPowietrza	P3 - PredkosciNatarcia	P4 - Fx	P5 - Fy	P6 - CDosk
2	Units	degree	m	m s ⁻¹	N	N	
3	Current	0	0,005	10	0,0024075	0,00084926	0,35275
4	DP 1	5	0,005	10			
5	*	10					

- 3) Aby obliczenia zostały wyeksportowane na dysk twardy komputera, należy w kolumnie I zaznaczyć opcję **Exported**. W przeciwnym razie zostanie uzupełniona i zachowana tylko tabela eksperymentu, bez możliwości podglądu wyników w CFD-Post.



- 4) Aby wykonać obliczenia dla zadanych parametrów, należy kliknąć **Update All Design Points**  **Update All Design Points**.
- 5) Po wykonaniu obliczeń (może to zająć kilkanaście minut) w zakładce **Outline of All Parameters** poprzez kliknięcie na **Parameter Chart** można zobaczyć wykres utworzony z wygenerowanych obliczeń.



DODATKOWO:

- 6) Należy pamiętać o kontroli Y^+ . Aby dostać wiarygodne rozwiązanie student powinien przeprowadzić modyfikację siatki i/lub geometrii powietrza otaczającego płat (grubość warstwy po „z”). Dla uzyskania wiarygodnego rozwiązania należy zbliżyć się do jedności ($Y^+ < 3$).
- 7) Prezentowane wykresy w punkcie 7.5. są w formie wymiarowej tzn. siły działające na płat są wyrażone w Niutonach. Zgodnie z teorią opływu płata należy, przeliczyć wielkości na odpowiednie współczynniki tj. współczynnik siły nośnej i siły oporu aerodynamicznego oraz doskonałości aerodynamicznej (liczony bezpośrednio w

solverze). Obliczone wielkości porównać z danymi z atlasu profili na stronie <http://airfoiltools.com/> . Uwaga! Porównując należy pamiętać o zachowaniu podobieństwa przepływu wynikającego z liczby Reynoldsa.

ZALICZENIE:

1. Student wykonuje projekt samodzielnie lub w zespole dwu osobowym. Zakres rozwiązania projektu ma wpływ na ocenę końcową. Student może ograniczyć zakres decydując się na następujące kryterium:

Ocena 3,0 – opracowanie sparametryzowanej geometrii profilu (instrukcja punkty od 1 do 2.12),

Ocena 4,0 – obliczenie charakterystyki aerodynamicznej profilu na podstawowych ustawieniach (cała instrukcja za wyjątkiem punktów opisanych jako dodatkowe, tj: 7.6 i 7.7).

Ocena 5,0 – pełne obliczenia, z poprawą jakości siatki i porównaniem wyników (instrukcja z punktami dodatkowymi).

2. Z wykonanego projektu należy przygotować sprawozdanie w formie drukowanej. Do sprawozdania dołączyć płytę CD z plikami projektu, rozwiązania i sprawozdania w formacie pdf..

Sprawozdanie ma zawierać:

- a. Tabelę informacyjną (dostępna na serwerze).
- b. Wskazać nr danych, symbol profilu i jego współrzędne po sformatowaniu do pliku koordynującego.
- c. Geometrię profilu i geometrie odwrotną wraz ze wskazaniem parametrów i nazw powierzchni.

Ocena 3,0

- d. Siatkę numeryczną – statystyka siatki, rodzaj, sposób zagęszczania
- e. Model numeryczny – CFX Pre
 - Warunki brzegowe
 - Domeny
 - Model turbulencji
 - Równania dodatkowe
- f. Plan eksperymentu

g. Wyniki obliczeń

- Charakterystyki aerodynamiczne ($F_y, F_x, C_{dosk} = f(\alpha)$) wygenerowana z obliczeń numerycznych (załączyć zrzut ekranu z Workbench),
- Rozkłady ciśnień i prędkości w przekroju poprzecznym profilu dla różnych kątów natarcia,

Ocena 4,0

- h. Dodatkowe informacje na temat zagęszczenia siatki, wymiary elementów na ściankach profilu i odpowiadająca im wielkość parametru Y^+ .
- i. Charakterystyki aerodynamiczne w formie współczynników ($C_y, C_x, C_{dosk} = f(\alpha)$) porównane z danymi ze strony <http://airfoiltools.com/>.
- j. Uwagi końcowe.

Ocena 5,0

3. Ocena zostanie wystawiona po osobistym oddaniu sprawozdania i odpowiedzi ustnej (poza oceną 3,0 - wystawianą na podstawie sprawozdania).
4. Termin zaliczenia ustalić poprzez starostę.