



**AKADEMIA GÓRNICZO-HUTNICZA
IM. STANISŁAWA STASZICA W KRAKOWIE**

Modelowanie maszyn wirnikowych w środowisku ANSYS

mgr inż. Tomasz Siwek

Katedra Maszyn Ciepłych i Przepływowych

AGH w Krakowie

Materiały pomocnicze dla studentów wydziału Energetyki i Paliw AGH

Etapy symulacji numerycznej

Pre-procesor

- przygotowanie geometrii
- generowanie siatki
- definiowanie biblioteki materiałów
- definiowanie równań i warunków brzegowych

Solver

Równania transportu:

- masy
- pędu
- energii

Dodatkowe równania i zmienne:

- turbulencja
- konwekcja
- radiacja
- równania stanu itp.

Ustawienia solvera:

- inicjalizacja
- schematy interpolacyjne
- monitoring rozwiązania i kryteria zbieżności
- ustawienie zasobów jednostki obliczeniowej

Post-procesor

Opracowanie wyników:

- tabele wyników
- pola wektorowe
- izolinie, izo-powierzchnie
- linie prądu
- wykresy 2D/3D
- animacje

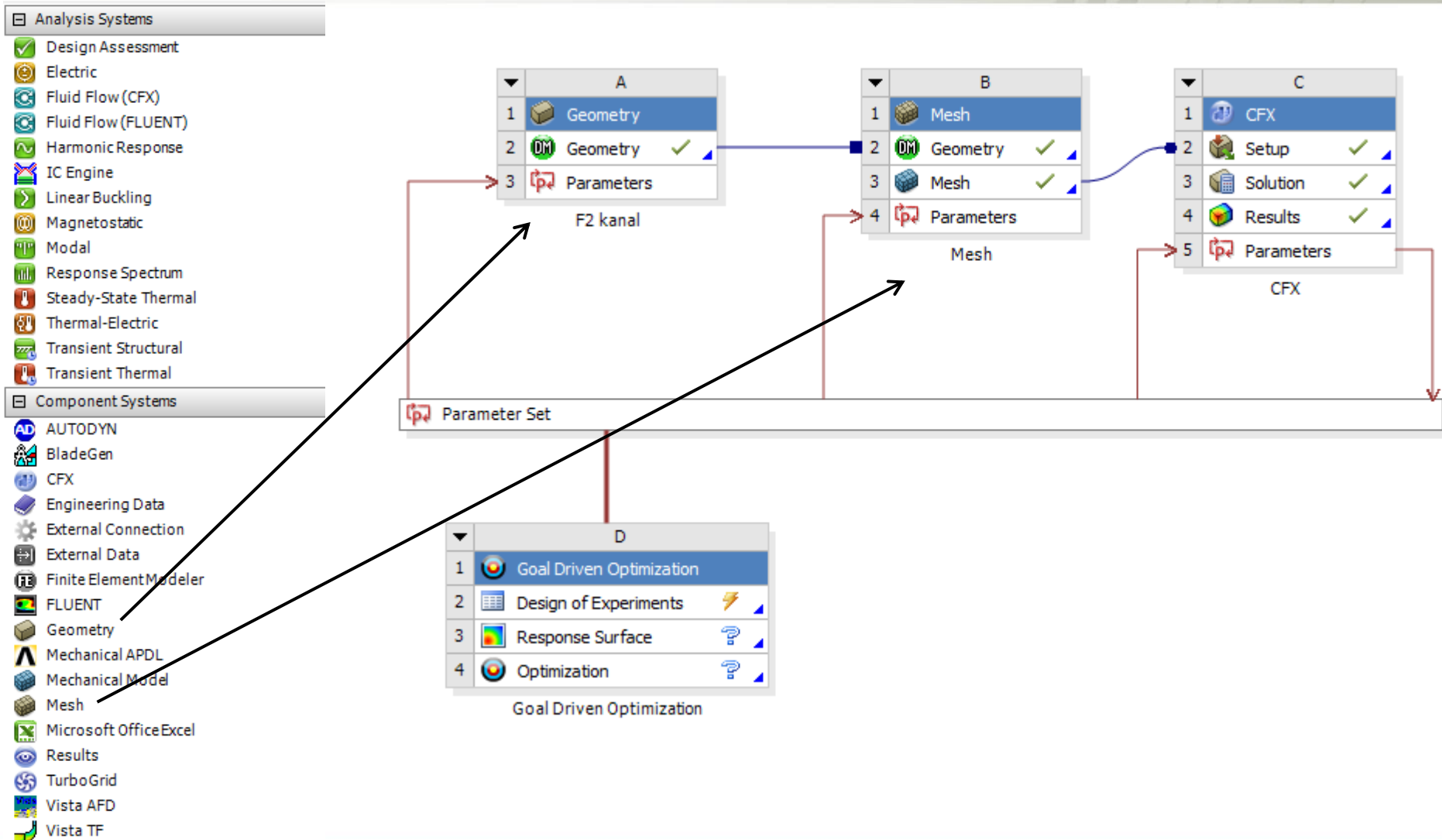
Kontrola eksperymentu

Zmiana parametrów modelu

Optymalizacja



Środowisko pracy „Workbench”



Geometria-oprogramowanie

Z pakietu ANSYS

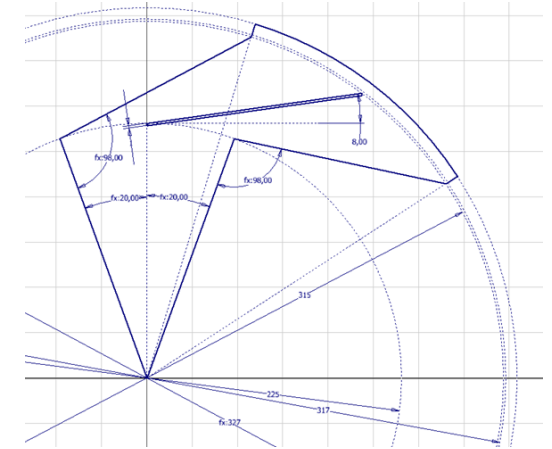
- **Design Modeler**
- Blade Gen
- Blade Editor

Inne geometrie
CAD

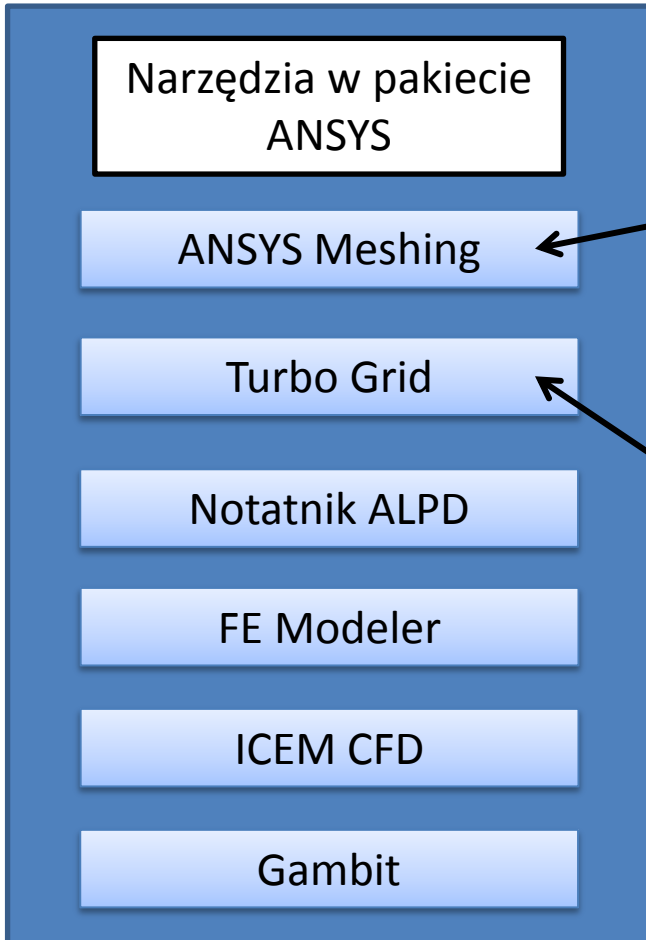
- Dołączanie aktywnej geometrii (np. Inventor, Catia)
- Importowanie zewnętrznej geometrii

Notatnik
(.dat, .txt)

- definiowanie krzywych opisujących np. profil lotniczy



Dyskretyzacja obszaru ciągłego



Domyślny , uniwersalny generator siatki dla ANSYSA, rekomendowany dla solverów CFX i Fluent. Wbudowane funkcje generowania siatki np.: przyścienne warstwy „inflacji”, siatka na powierzchniach periodycznych, zagęszczanie w określonym obszarze.

Tworzenie siatek strukturalnych dedykowanych do obliczeń maszyn przepływowych. Wymaga odpowiednio przygotowanej geometrii („BladeGen” lub „Blade Modeler”)

Tetrahedrons

Siatka oparta o elementy czterościenne, łatwa w generowaniu, zwykle mało wydajna.

Sweep

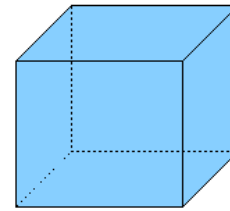
Elementy sześciennie lub pryzmatyczne (klinowe), stosowana tylko do określonej grupy geometrii (walce, sześciany)

Multi Zone

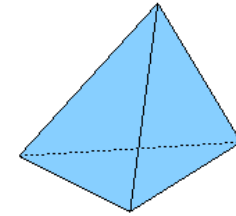
Elementy sześciennie, wymaga zdefiniowania kierunku generowania siatki, automatycznie dekomponuje złożone geometrie.

Hex Dominant

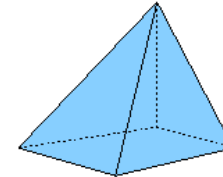
Dominują elementy sześciennie + wszystkie inne w celu uzupełnienia obszaru dyskretyzacji



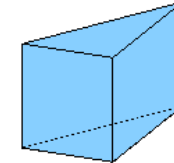
Hexahedral



Tetrahedral



Pyramidal



Prismatic

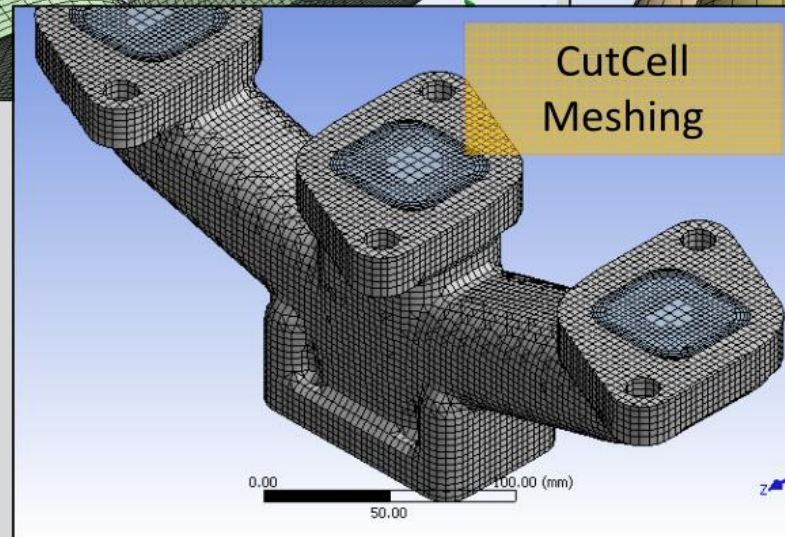
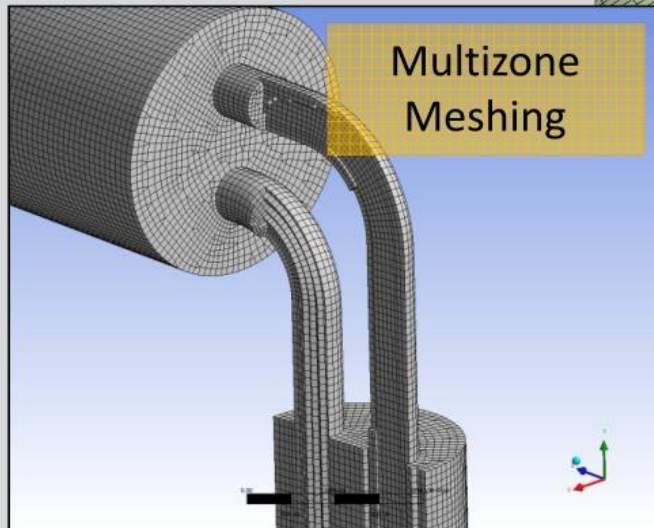
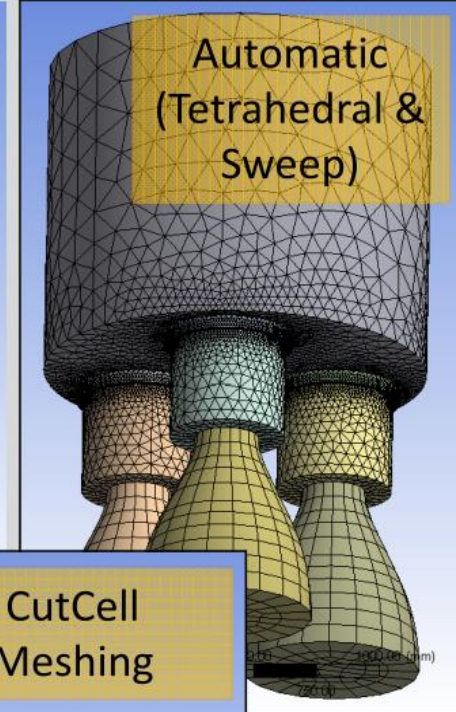
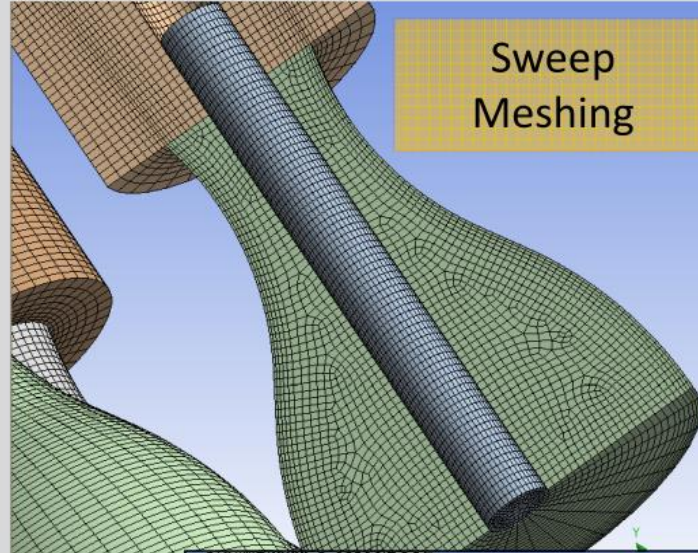
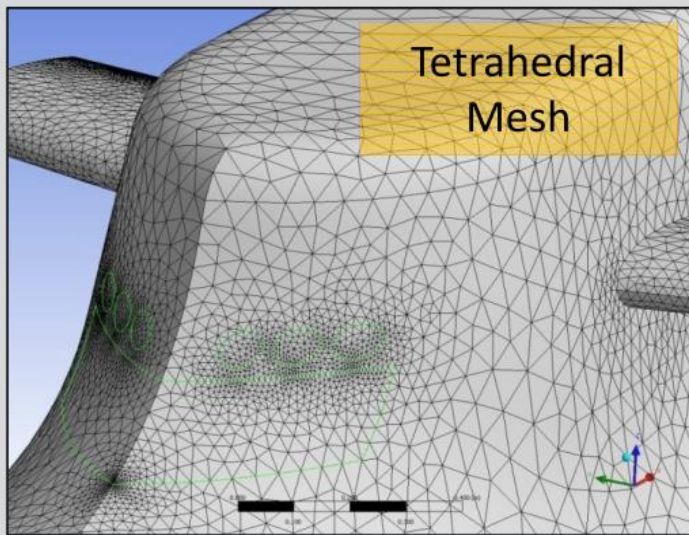
CutCell mesh

Generator siatki wyłącznie dla ANSYS Fluent, elementy sześciennie w układzie kartezjańskim we wnętrzu objętości, na zewnątrz pozostałe.

Automatic

łączy różne metody generowania siatki, w praktyce efekt zbliżony do Tetrahedrons (przydatna po zdekomponowaniu geometrii)

Przykładowe użycie siatek



Kontrola jakości siatki

Zarówno CFX jak i Flunt Solver wymagają określonej jakości siatki ! Przy inicjacji obliczeń kontrolowane są najważniejsze parametry siatki tj.:

- Mesh Orthogonality
- Aspect Ratio
- Expansion Factor (tylko CFX)

```

+-----+
|                               |
|                               |
+-----+
|                               |
|                               |
| Domain Name: Air Duct        |
|   Minimum Orthogonality Angle [degrees] = 20.4 ok |
|   Maximum Aspect Ratio      = 13.5 OK |
|   Maximum Mesh Expansion Factor = 700.4 ! |
| Domain Name: Water Pipe     |
|   Minimum Orthogonality Angle [degrees] = 32.8 ok |
|   Maximum Aspect Ratio      = 6.4 OK |
|   Maximum Mesh Expansion Factor = 73.5 ! |
| Global Mesh Quality Statistics : |
|   Minimum Orthogonality Angle [degrees] = 20.4 ok |
|   Maximum Aspect Ratio      = 13.5 OK |
|   Maximum Mesh Expansion Factor = 700.4 ! |

```

Dobra (OK)

Akceptowalna (ok)

Wątpliwa (!)

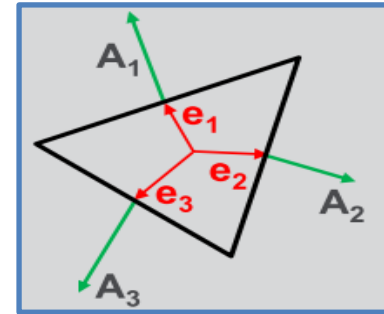
Parametry oceny siatki

Orthogonal Quality:

$$\frac{A_i \cdot e_i}{|\vec{A}_i| |\vec{e}_i|}$$

A_i - wektor normalny do krawędzi „ i ”,

e_i - wektor łączący środek ciężkości elementu i środek krawędzi.



Aspect Ratio:

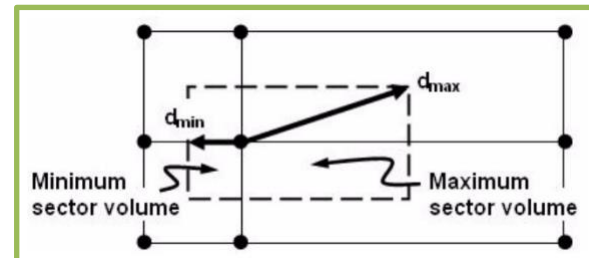
2-D stosunek: najdłuższy bok/najkrótszy bok

3-D stosunek: promień kuli opisanej/wpisanej w element



Expansion Factor:

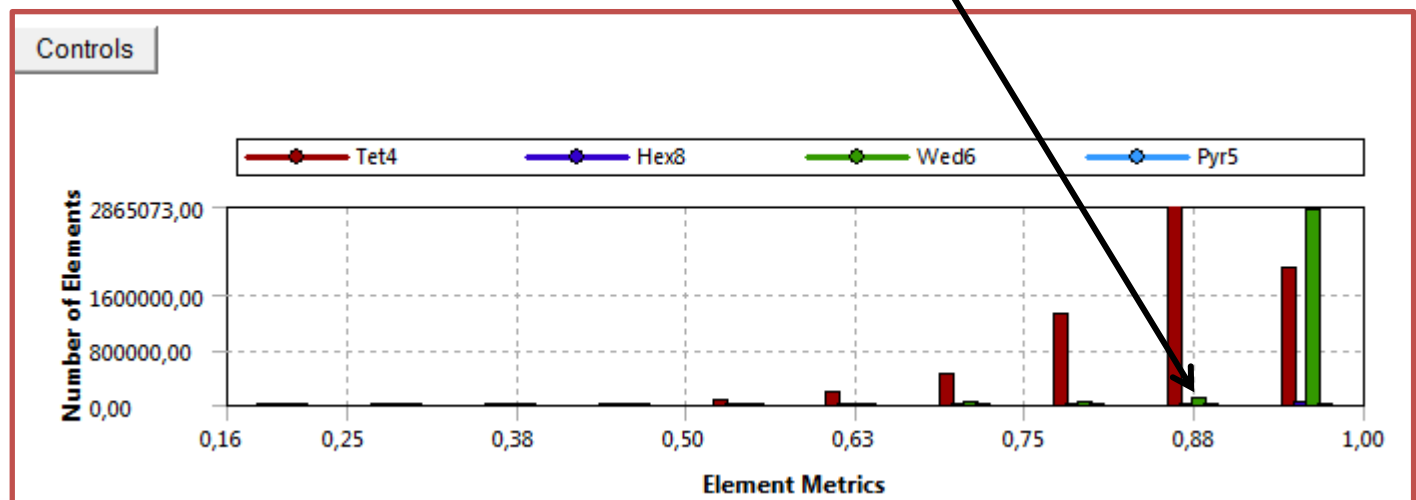
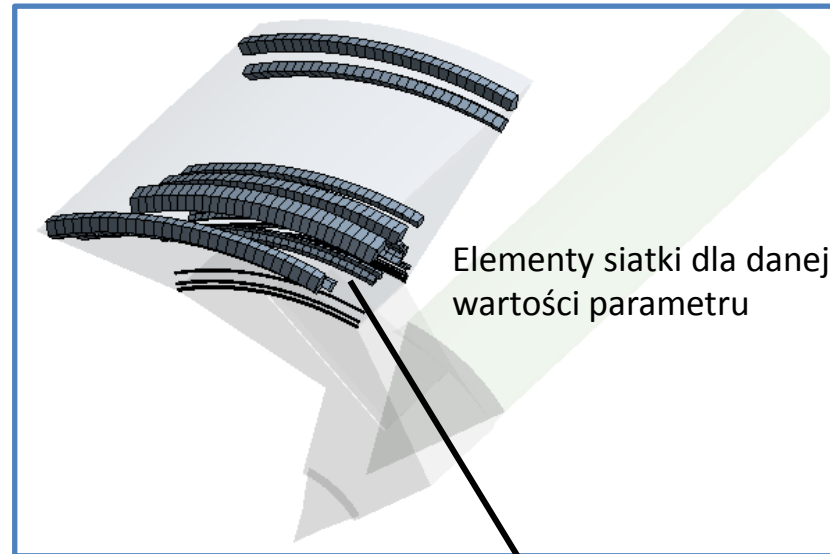
Stosunek maksymalnej do minimalnej objętości elementów otaczających węzeł



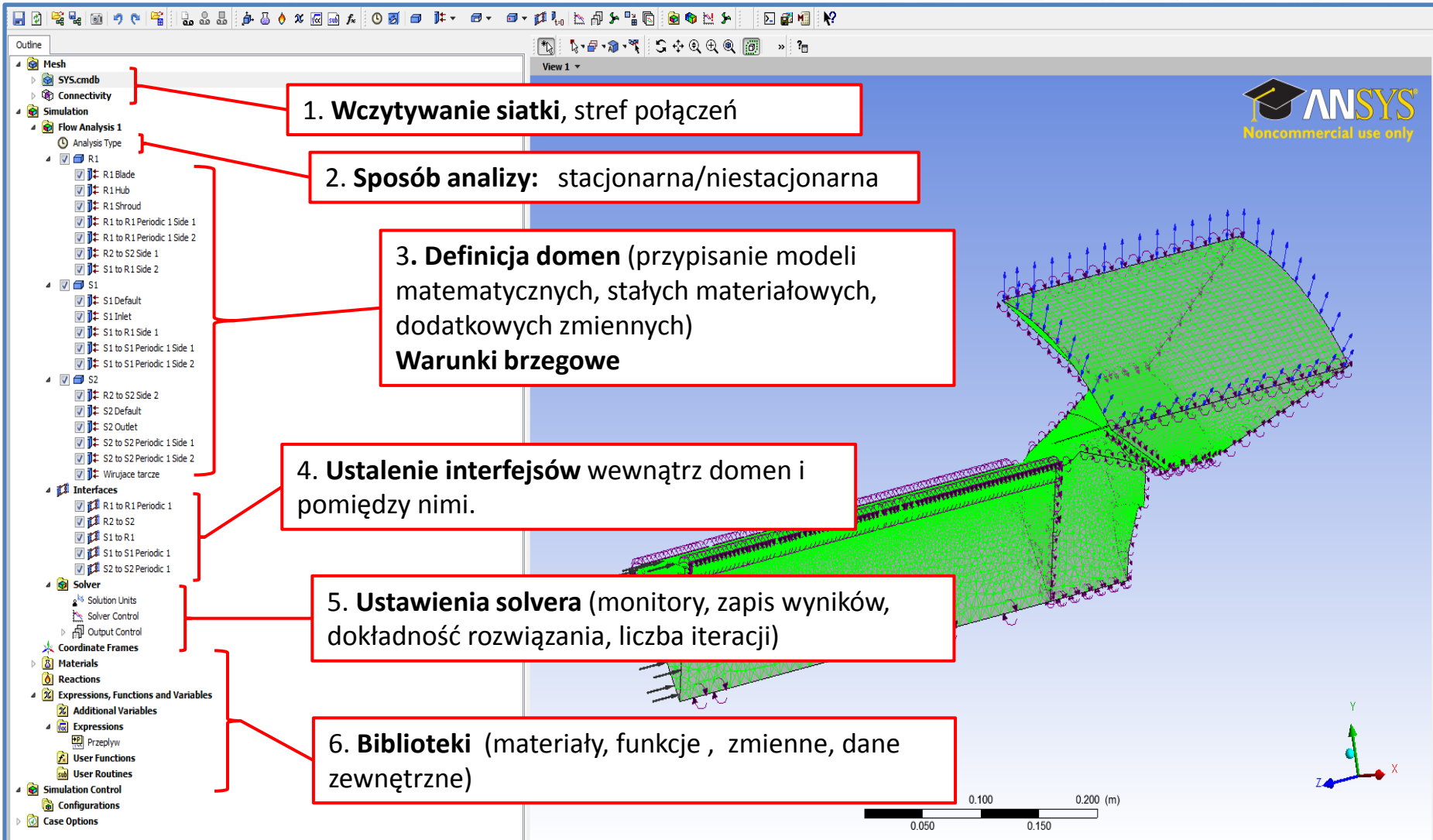
Identyfikacja elementów siatki

Narzędzie Mesh Metrics

Statistics	
<input type="checkbox"/> Nodes	2770179
<input type="checkbox"/> Elements	9803931
Mesh Metric	
<input type="checkbox"/> Min	0,159996525066079
<input type="checkbox"/> Max	0,999999618736902
<input type="checkbox"/> Average	0,898037883172696
<input type="checkbox"/> Standard Deviation	0,09386299213296



Opisanie siatki - CFX-pre („Setup”)



The image shows the ANSYS CFX-pre software interface with a 3D model of a turbine component meshed in green. The left sidebar contains the 'Outline' tree with categories like Mesh, Simulation, Flow Analysis 1, Interfaces, Solver, and Simulation Control. Six red-bordered callout boxes with white text and red arrows point to specific parts of the software interface, detailing the setup steps. The ANSYS logo is visible in the top right corner of the software window, and a coordinate system (X, Y, Z) and a scale bar (0.050 to 0.200 m) are shown in the bottom right corner.

- 1. Wczytywanie siatki, stref połączeń**
- 2. Sposób analizy: stacjonarna/niestacjonarna**
- 3. Definicja domen (przypisanie modeli matematycznych, stałych materiałowych, dodatkowych zmiennych)
Warunki brzegowe**
- 4. Ustalenie interfejsów wewnątrz domen i pomiędzy nimi.**
- 5. Ustawienia solwera (monitory, zapis wyników, dokładność rozwiązania, liczba iteracji)**
- 6. Biblioteki (materiały, funkcje, zmienne, dane zewnętrzne)**

Definiowanie i elementy domeny – „Basic Settings”

Alokacja

- wybór obszaru siatki, np. wirnik



Typ

- płyn
- ciało stałe
- ciało porowate
- ciało pływające



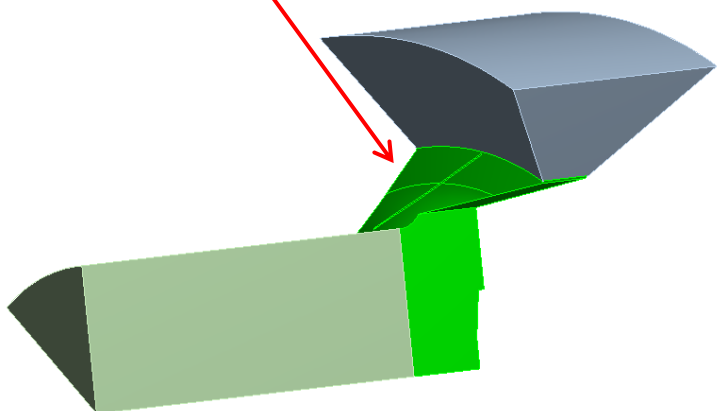
Materiał

- biblioteka materiałów,
- zdefiniowanie stałych materiałowych



Ruch

- obrotowy
- postępowy
- stacjonarna



Dodatkowe opcje:

- definicja pola sił masowych (grawitacja),
- ciśnienia odniesienia,
- udział frakcji, np. gaz-ciecz

Domena – „Fluid Models”

Równania transportu

- masy
- pędu
- energii



Model turbulencji

- w zależności od typu i dokładności opisu zjawiska turbulencji



Spalanie i radiacja

- Rosseland
- P1
- Monte Carlo
- Discrete Transfer

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \text{div}(\rho \vec{v}) = 0$$

$$\rho \frac{d\vec{v}}{dt} = \rho \vec{F} + \text{Div} \Pi$$

$$\rho \frac{d}{dt} \left(e + \frac{U^2}{2} \right) = \rho \vec{F} \cdot \vec{U} + \text{div}(P \cdot \vec{U}) + \rho q - \text{div} \vec{Q}$$

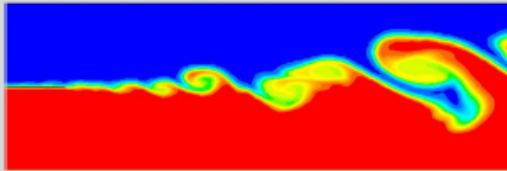
k-Epsilon
 Shear Stress Transport
 BSL Reynolds Stress
 SSG Reynolds Stress
 k-Epsilon EARSM
 Zero Equation
 RNG k-Epsilon
 k-Omega
 Eddy Viscosity Transport Equation
 BSL
 BSL EARSM
 Spalart Allmaras (Beta)
 LRR Reynolds Stress
 QI Reynolds Stress
 Omega Reynolds Stress

„Fluid Models” – grupy modeli turbulencji

• Different approaches to make turbulence computationally tractable

DNS

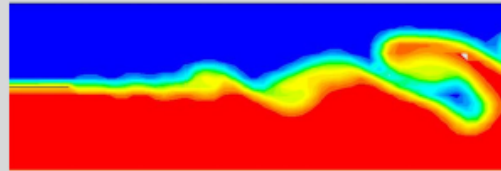
(Direct Numerical Simulation)



- Numerically solving the full unsteady Navier-Stokes equations
- Resolves the whole spectrum of scales
- No modeling is required
- But the cost is too prohibitive!
Not practical for industrial flows!

LES

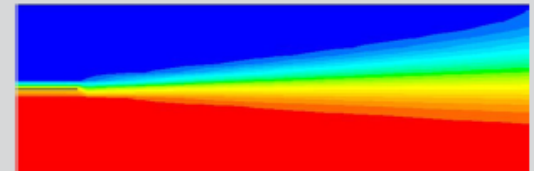
(Large Eddy Simulation)



- Solves the spatially averaged N-S equations
- Large eddies are directly resolved, but eddies smaller than the mesh are modeled
- Less expensive than DNS, but the amount of computational resources and efforts are still too large for most practical applications

RANS

(Reynolds Averaged Navier-Stokes Simulation)



- Solve time-averaged Navier-Stokes equations
- All turbulent length scales are modeled in RANS
- Various different models are available
- This is the most widely used approach for calculating industrial flows

Warunki brzegowe

• Inlet

- Velocity Components
- Normal Speed
- Mass Flow Rate
- Total Pressure (stable)
- Static Pressure
- Static Temperature (Heat Transfer)
- Total Temperature (Heat Transfer)
- Total Enthalpy (Heat Transfer)
- Relative Static Pressure (Supersonic)
- Inlet Turbulent conditions

• Outlet

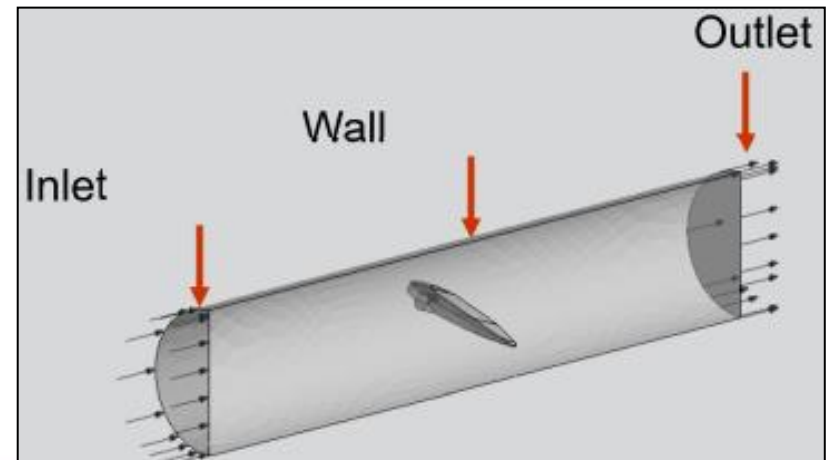
- Average Static Pressure
- Velocity Components
- Static Pressure
- Normal Speed
- Mass Flow Rate

• Opening

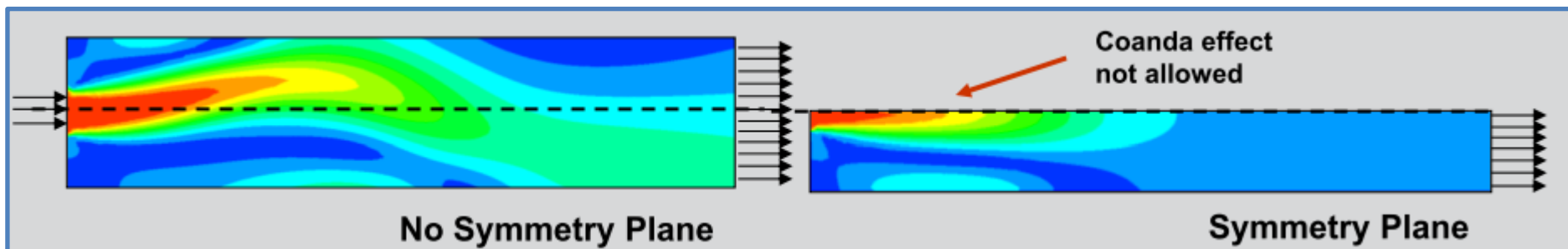
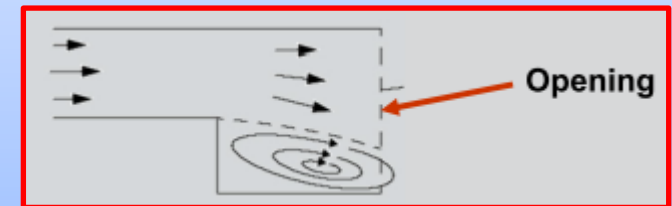
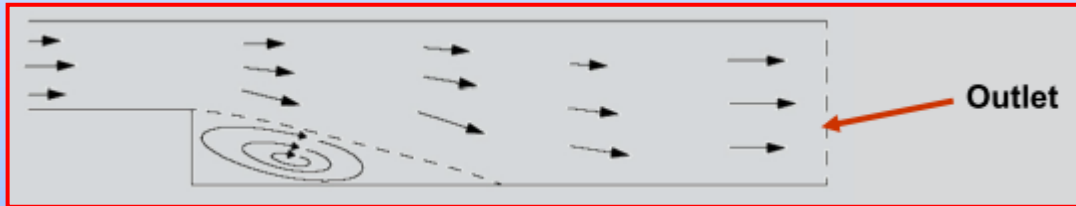
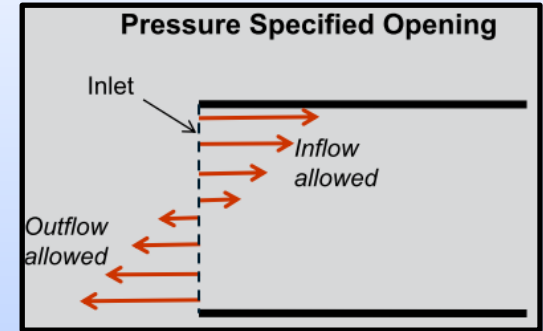
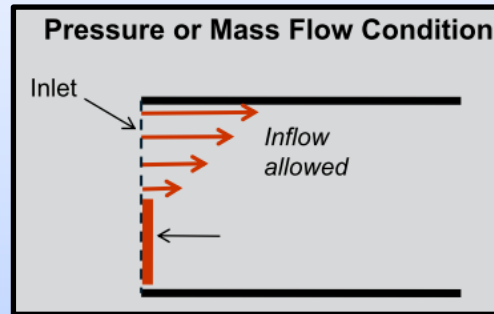
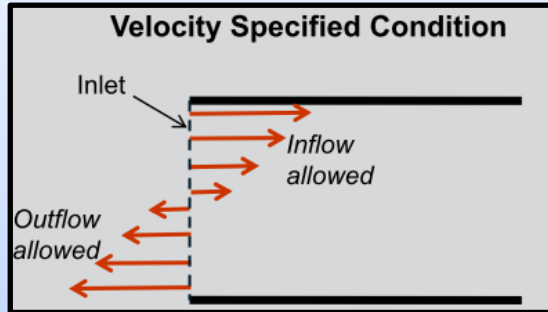
- Opening Pressure and Dirn
- Entrainment
- Static Pressure and Direction
- Velocity Components
- Opening Temperature (Heat Transfer)
- Opening Static Temperature (Heat Transfer)
- Inflow Turbulent conditions

• Wall

- No Slip / Free Slip
- Roughness Parameters
- Heat Flux (Heat Transfer)
- Wall Velocity (for tangential motion only)
- Adiabatic (Heat Transfer)
- Fixed Temperature (Heat Transfer)
- Heat Transfer Coefficient (Heat Transfer)



Warunki brzegowe - wybrane uwagi



Ustawienia Solvera

1

Poprawna INICJALIZACJA = skrócenie czasu obliczeń

średnie ciśnienie i
temperatura w domenie

uśrednione wartości
wektorów prędkości

intensywność turbulencji

wyniki (i-1)

2

Symulacja stacjonarna

- skala czasowa
- liczba iteracji
- poziom residuów

Symulacja niestacjonarna

- krok czasowy
- czas symulacji zjawiska
- liczba iteracji w kroku czasowym
- poziom residuów
- częstość zapisu wyników

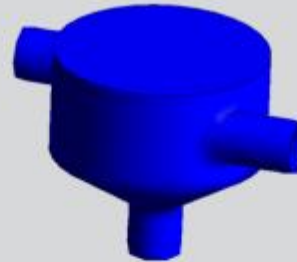
3

Uruchomienie

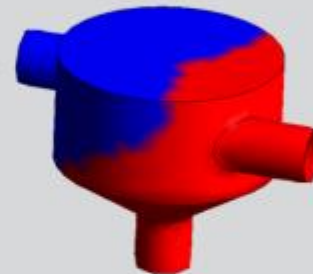
- liczba i dostęp do procesorów
- zasoby pamięci operacyjnej
- zasoby pamięci masowej

Obliczenia w architekturze równoległej

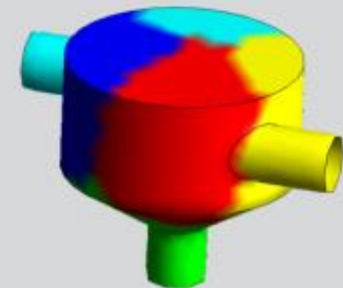
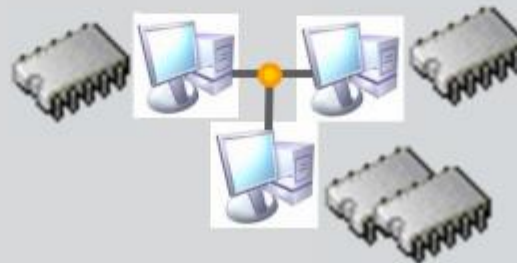
- Serial



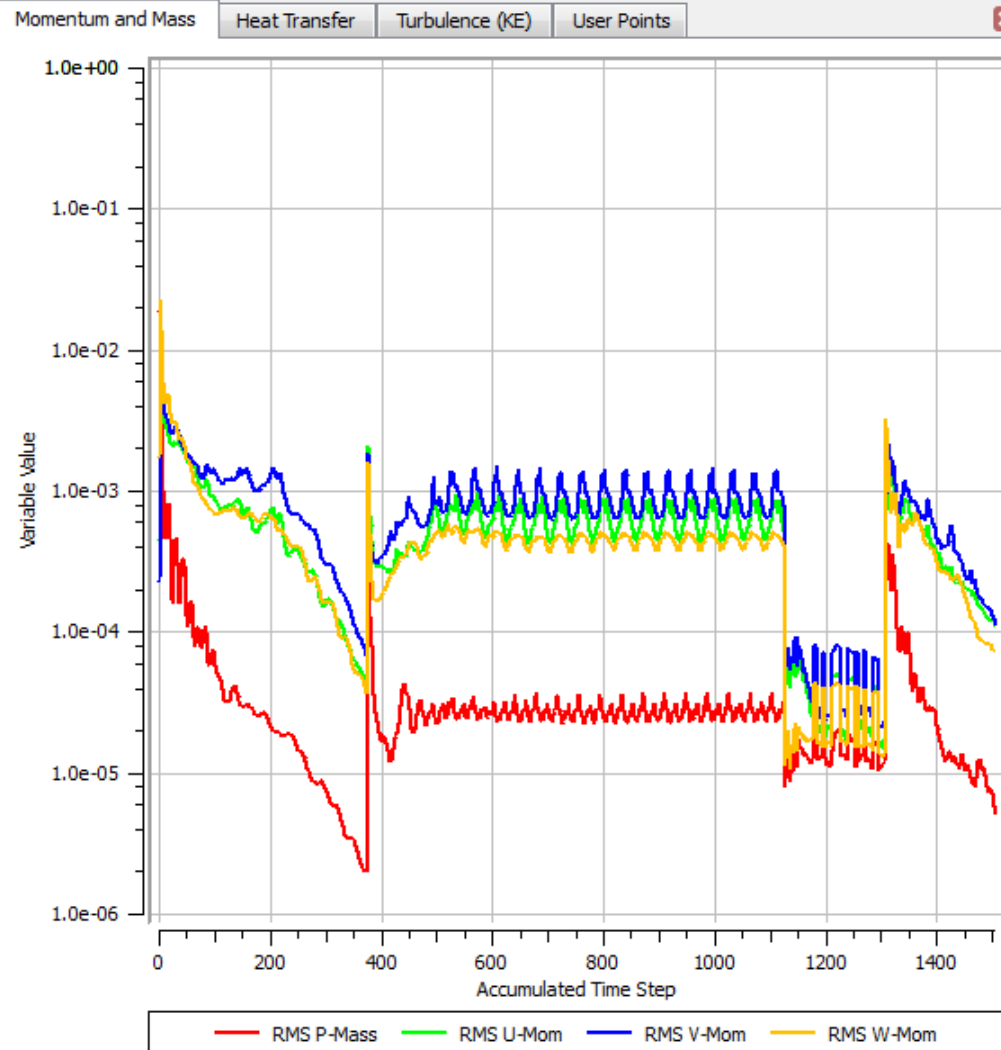
- Local Parallel



- Distributed Parallel



Monitoring obliczeń



Out File

H-Energy	1.19	8.0E-04	3.2E-01	5.6	1.
K-TurbKE	0.96	8.7E-04	1.5E-01	5.6	3.
E-Diss.K	0.82	9.5E-04	2.1E-01	11.6	3.

=====

OUTER LOOP ITERATION = 1388 (82) CPU SECONDS = 2.326E+05

Equation	Rate	RMS Res	Max Res	Linear
U-Mom	0.97	4.5E-04	1.5E-01	2.
V-Mom	1.00	7.5E-04	4.4E-01	1.
W-Mom	0.98	3.9E-04	7.1E-02	1.
P-Mass	0.99	2.9E-05	3.8E-03	8.9

=====

H-Energy	1.02	8.2E-04	2.8E-01	5.6	1.
K-TurbKE	1.02	8.9E-04	9.0E-02	5.6	3.
E-Diss.K	1.07	1.0E-03	2.8E-01	11.6	3.

=====

OUTER LOOP ITERATION = 1389 (83) CPU SECONDS = 2.330E+05

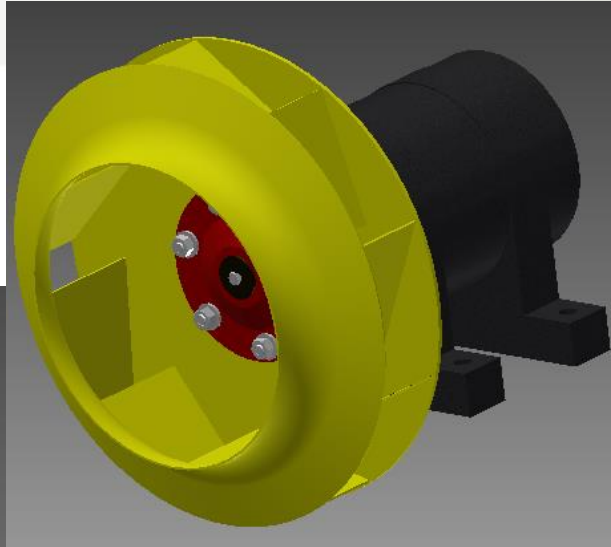
Equation	Rate	RMS Res	Max Res	Linear
U-Mom	0.96	4.3E-04	1.1E-01	2.
V-Mom	0.94	7.0E-04	3.8E-01	1.
W-Mom	0.99	3.9E-04	6.7E-02	1.
P-Mass	1.00	2.9E-05	3.5E-03	8.9

=====

H-Energy	0.89	7.2E-04	1.6E-01	5.6	1.
K-TurbKE	1.03	9.1E-04	7.7E-02	5.6	3.
E-Diss.K	1.20	1.2E-03	3.7E-01	11.6	3.

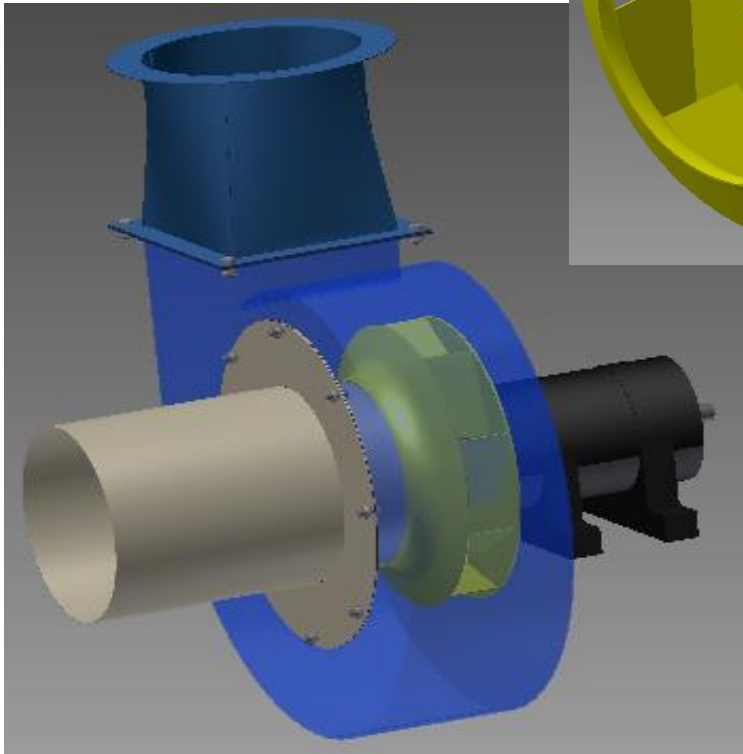
Układy pracy wentylatora promieniowego w projekcie

1.



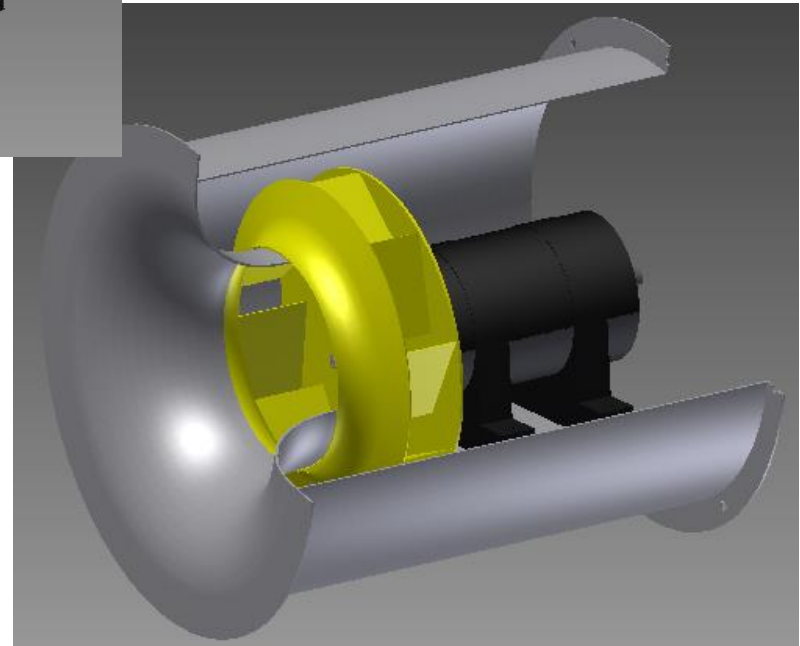
*Wirnik z wolnym wylotem **W***

2.



*Tradycyjny - wentylator promieniowy
w zabudowie spiralnej **S***

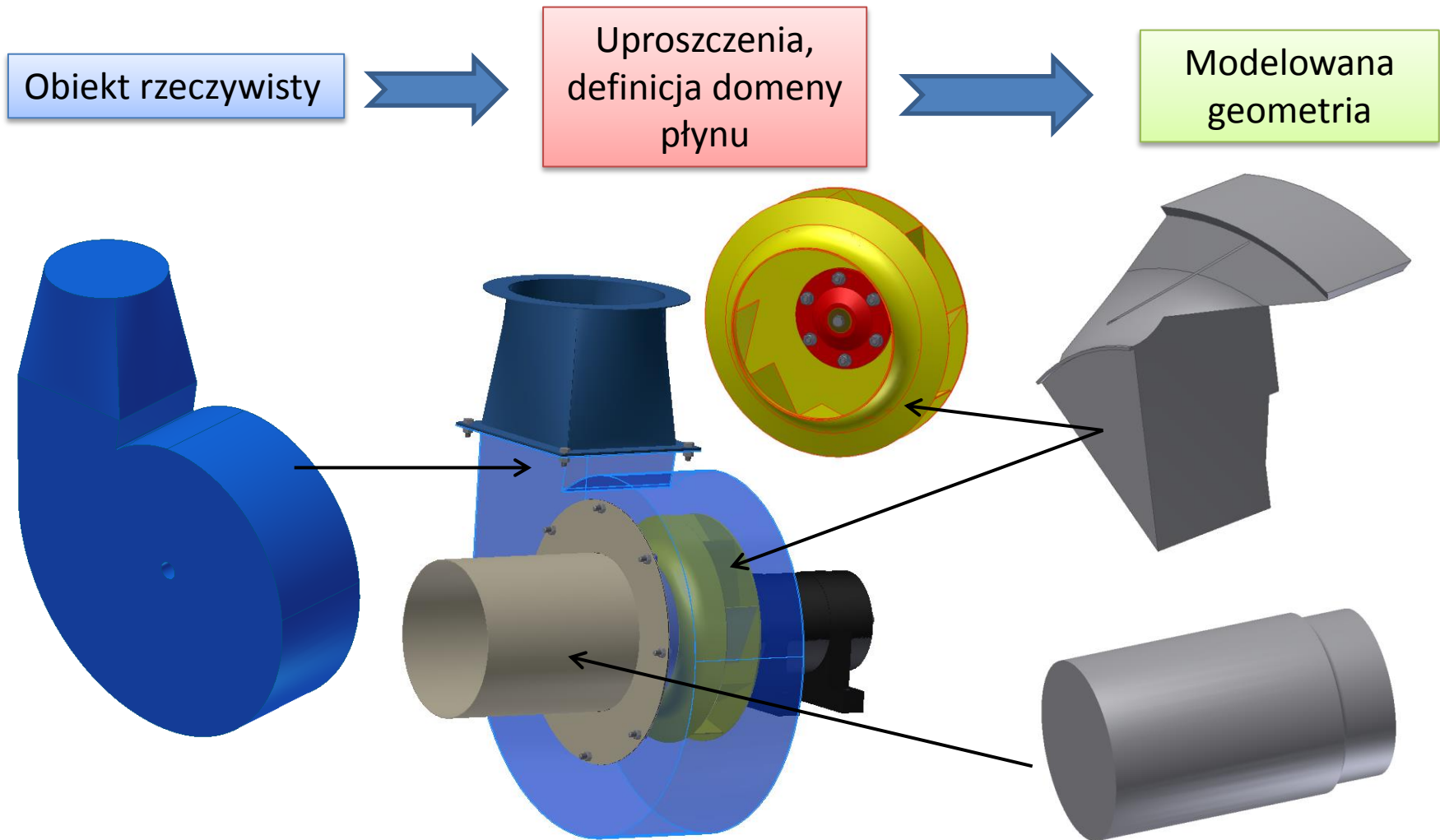
3.



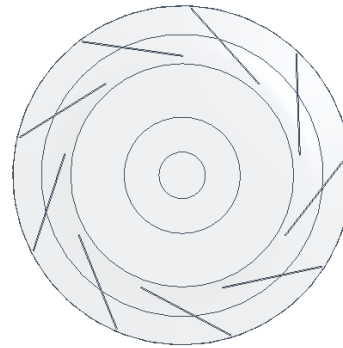
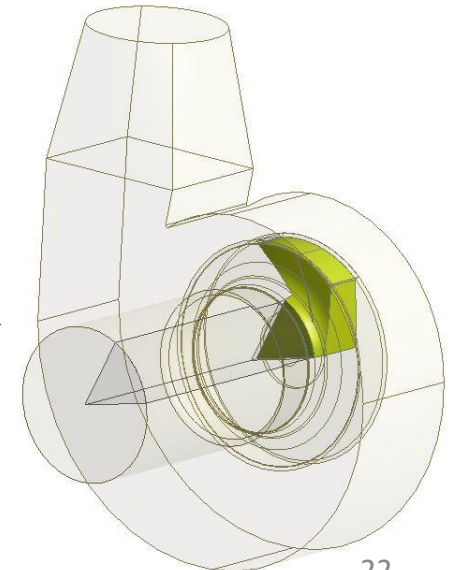
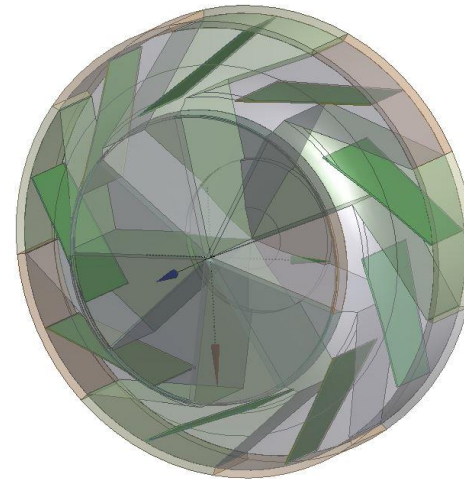
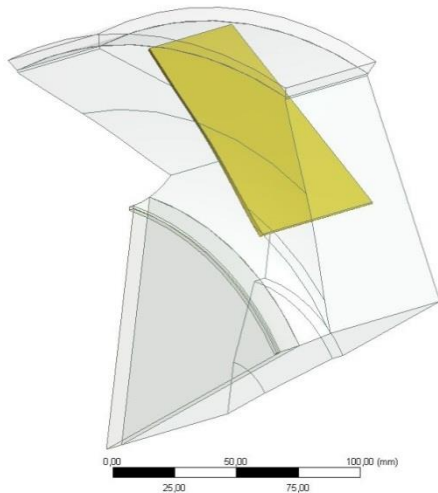
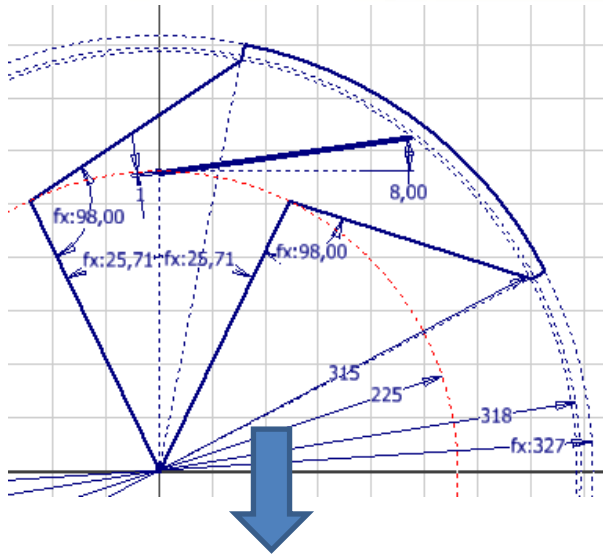
*Wentylator kanałowy
z wirnikiem promieniowym **K***

Eksperyment numeryczny – ANSYS

Przygotowanie geometrii

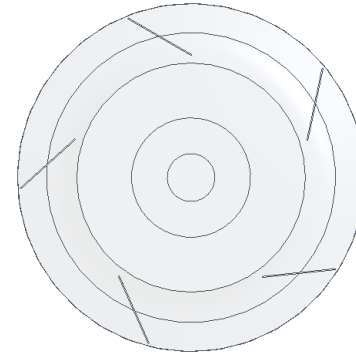


Generowanie wirnika –parametryzacja modelu



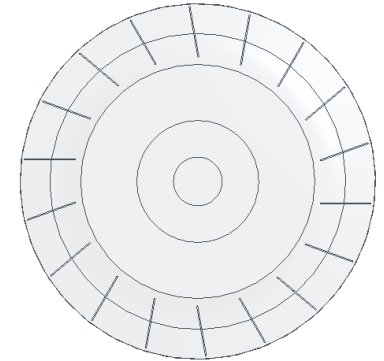
$$\beta_1 = 8^\circ$$

$$z = 9$$



$$\beta_1 = 30^\circ$$

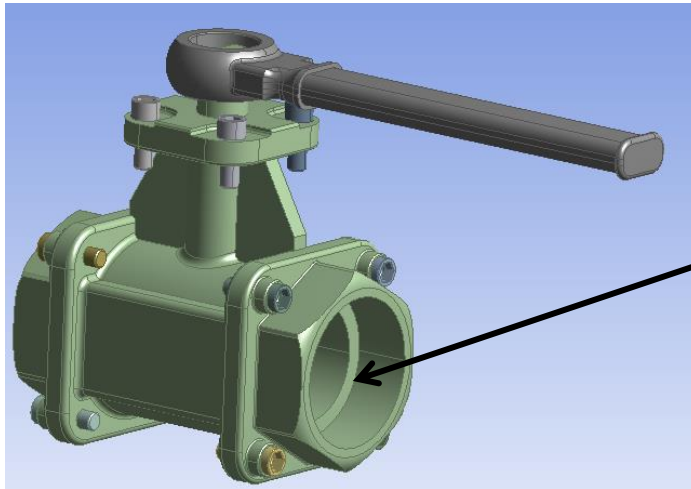
$$z = 5$$



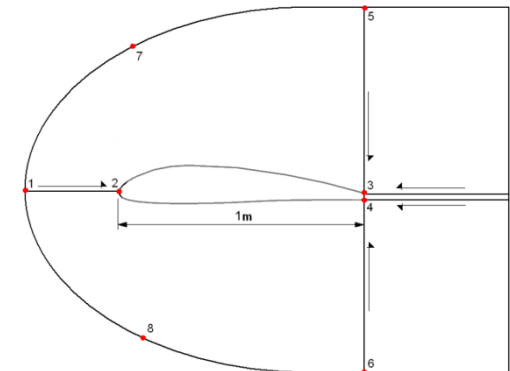
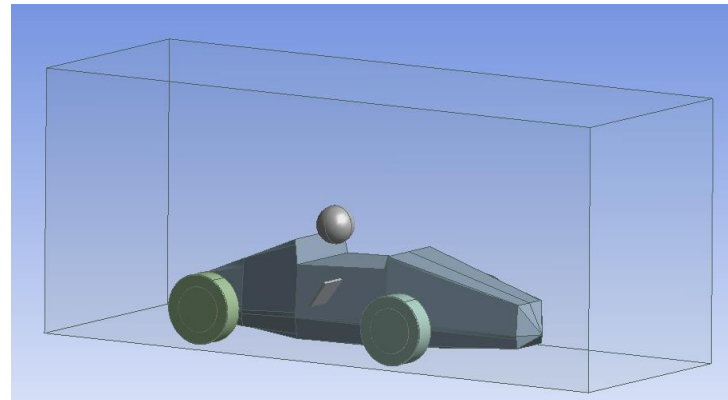
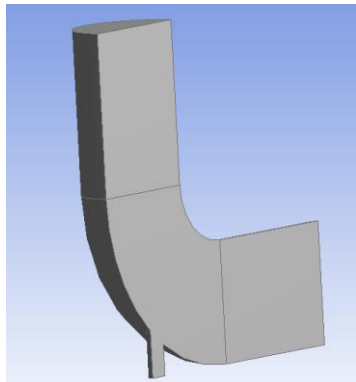
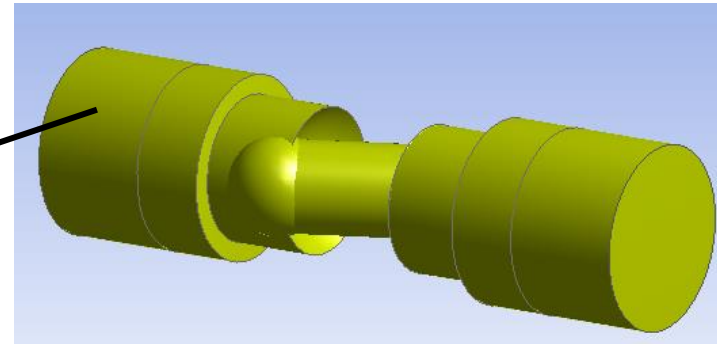
$$\beta_1 = 80^\circ$$

$$z = 15$$

Przygotowanie geometrii – przydatne funkcje



Wypełnienie płynem przez zastosowanie funkcji „Fill by Caps” (DM).

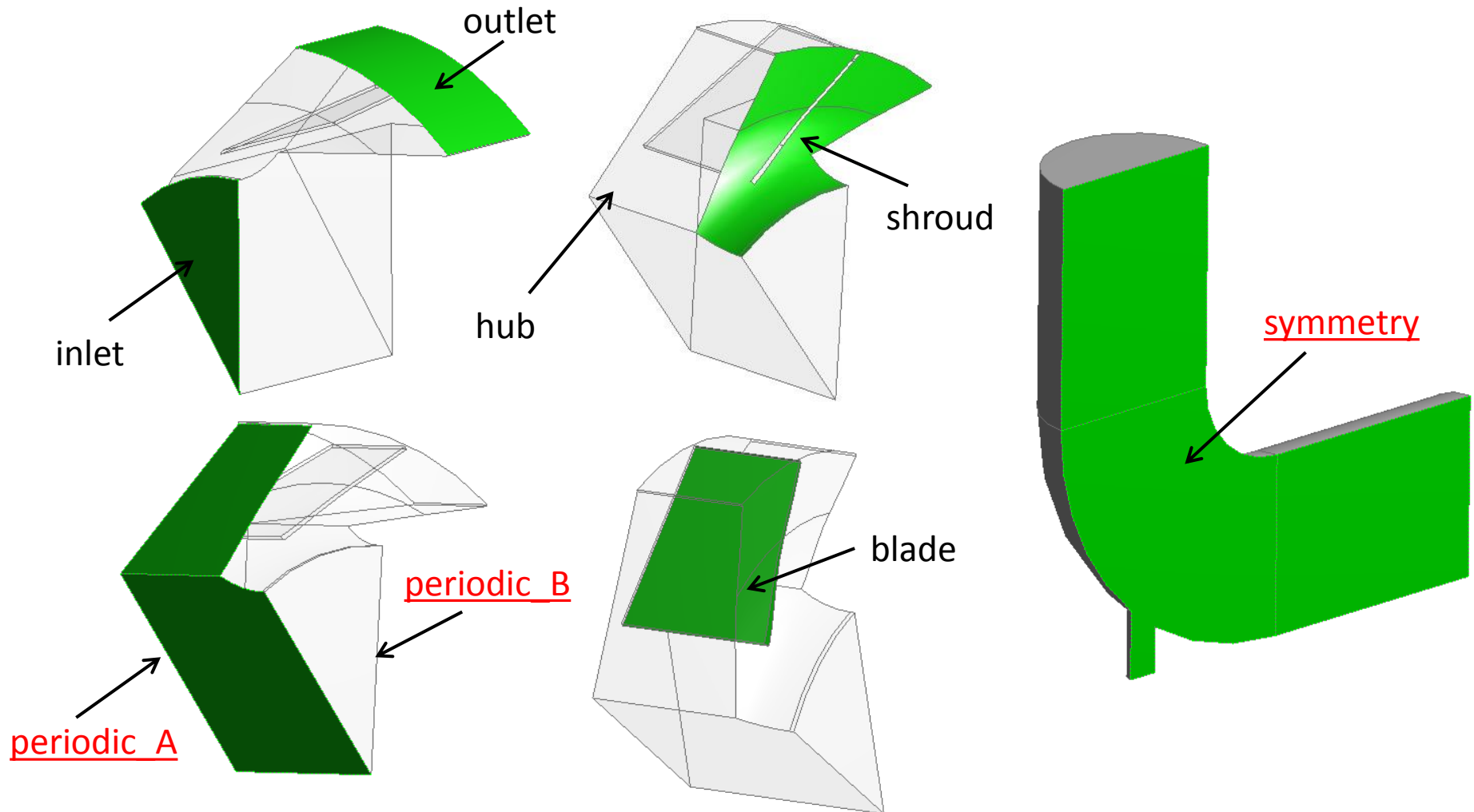


Funkcja „Slice” (DM)

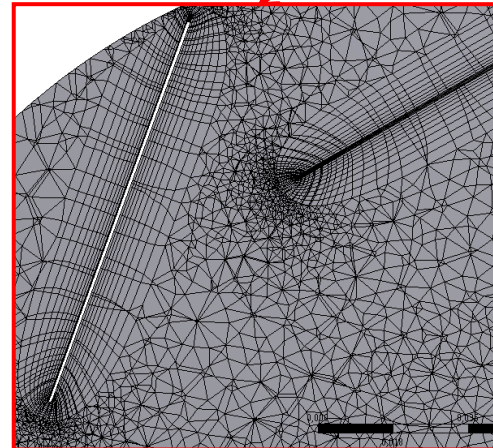
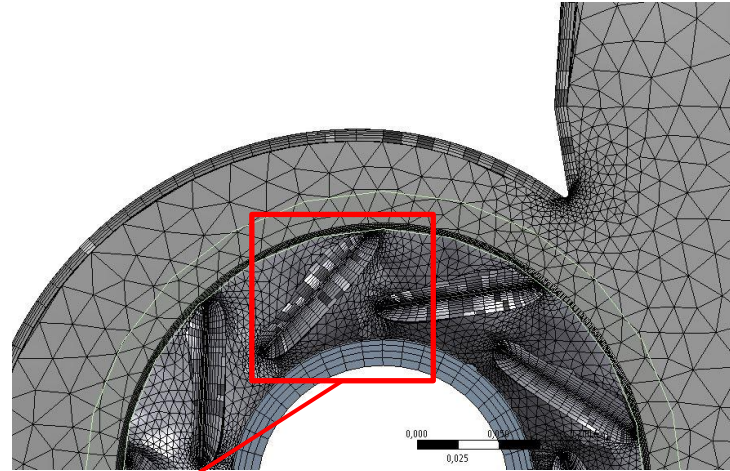
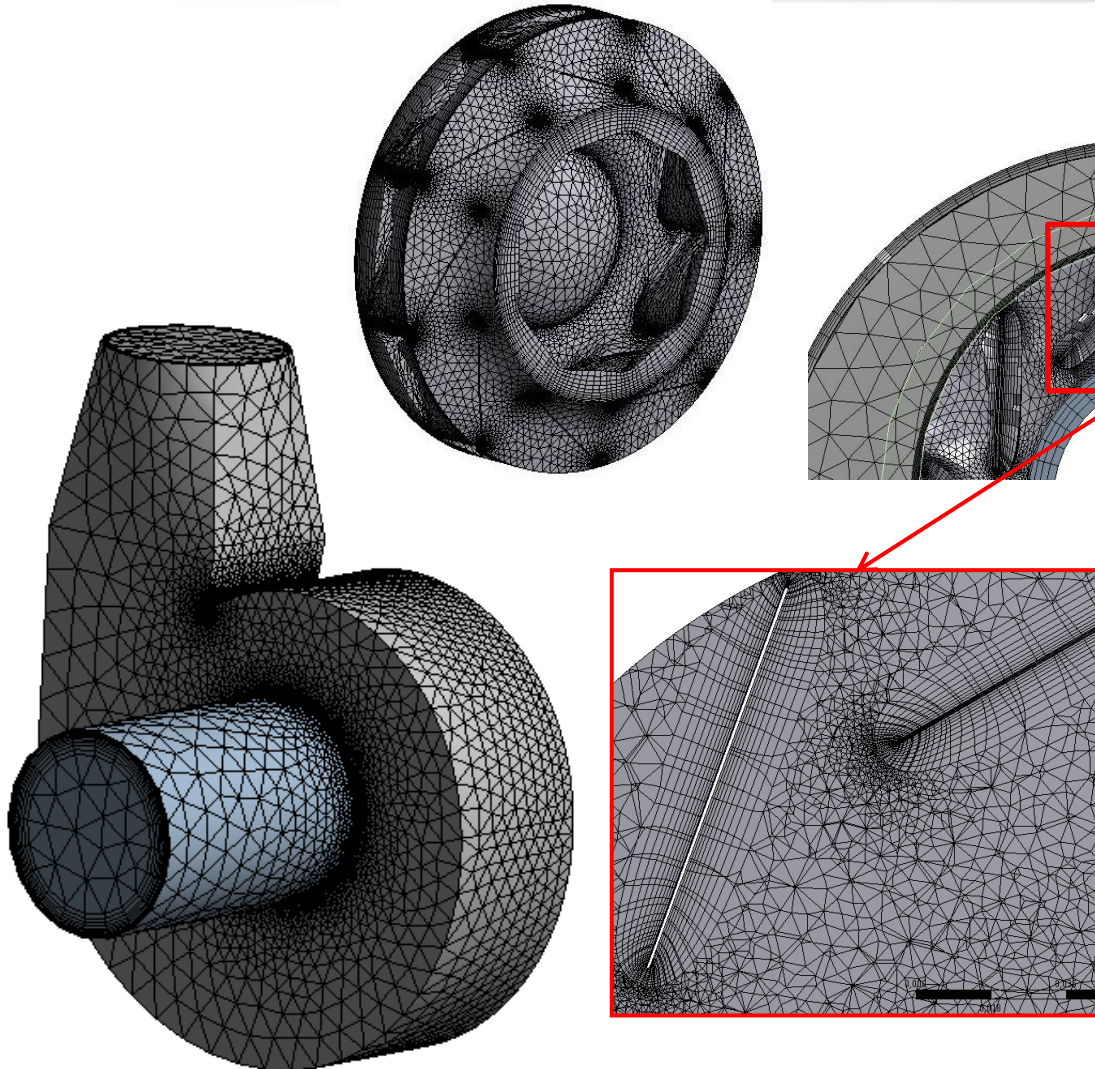
Tworzenie warstwy płynu
„Enclosure” (DM)

Szkic 2D – “.DAT”

Nazewnictwo powierzchni interpretowane w pakiecie ANSYS – funkcja „Named Selection”



Dyskretyzacja modelu – obudowa spiralna



Jakość siatki przy ściankach określa Y^+
(bezwymiarowy współczynnik odległości od ścianki)

$$Y^+ = \frac{y \cdot v_\tau}{\vartheta}$$

y – odległość od ścianki
 ϑ – lepkość kinematyczna
 v_τ – prędkość dynamiczna

$$v_\tau = \sqrt{\frac{\tau_0}{\rho}}$$

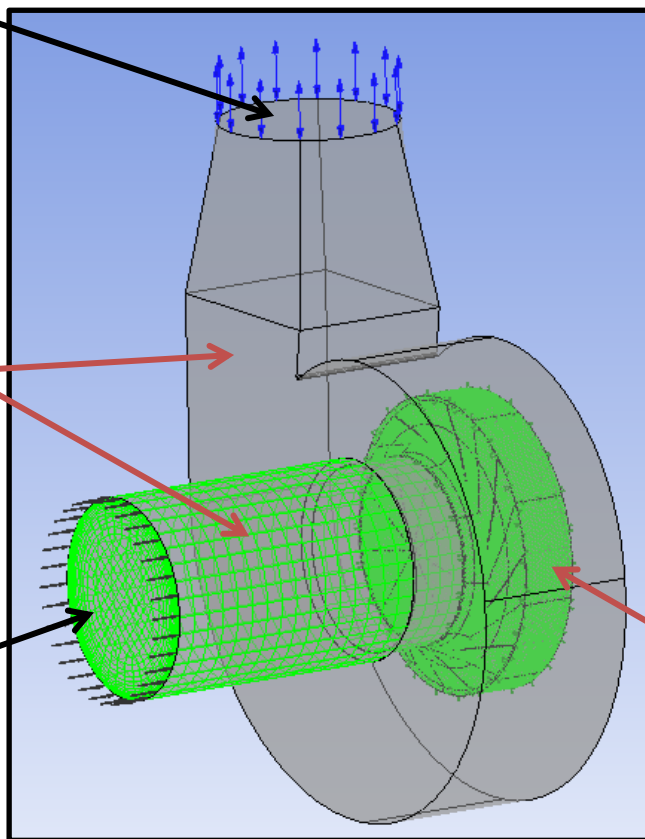
τ_0 – naprężenia na ściance
 ρ – gęstość płynu

Domeny i warunki brzegowe

Ciśnienie barometryczne (1 at)

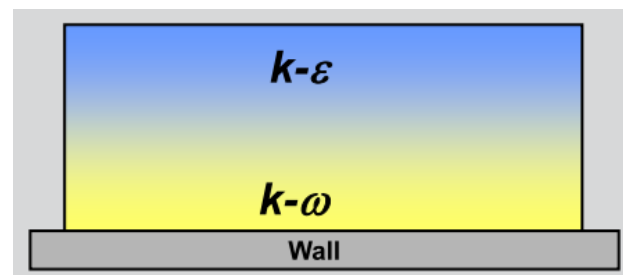
Domeny stacjonarne (powietrze jako gaz idealny)

Zmienna:
strumień masy



Model turbulencji:

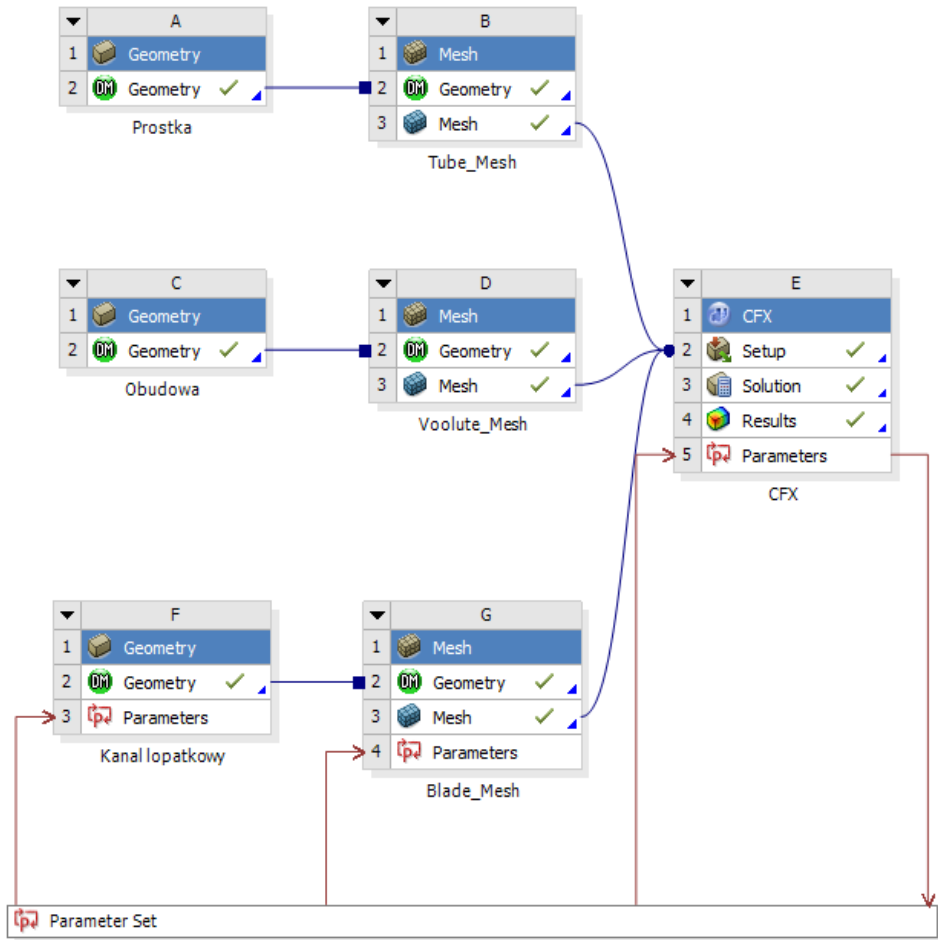
- $k-\epsilon$
- SST (Shear Stress Transport)



Domena obrotowa (n=2880 ob/min)

Wentylator promieniowy

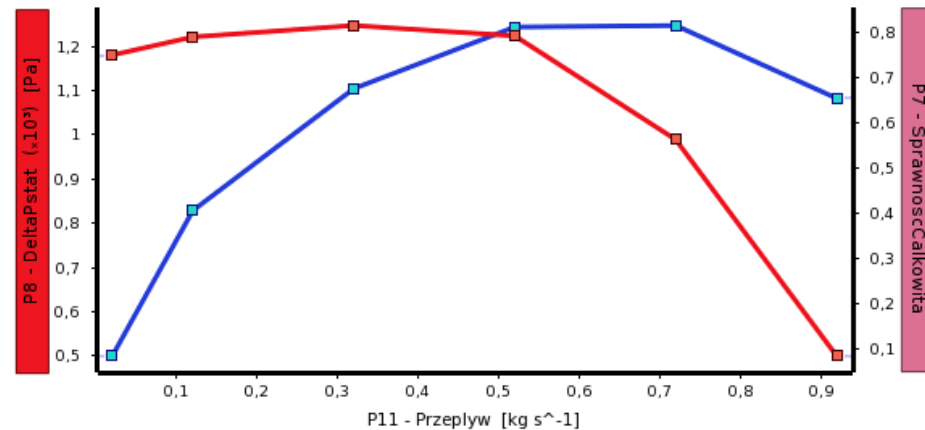
Workbench + Design Exploration



Raport

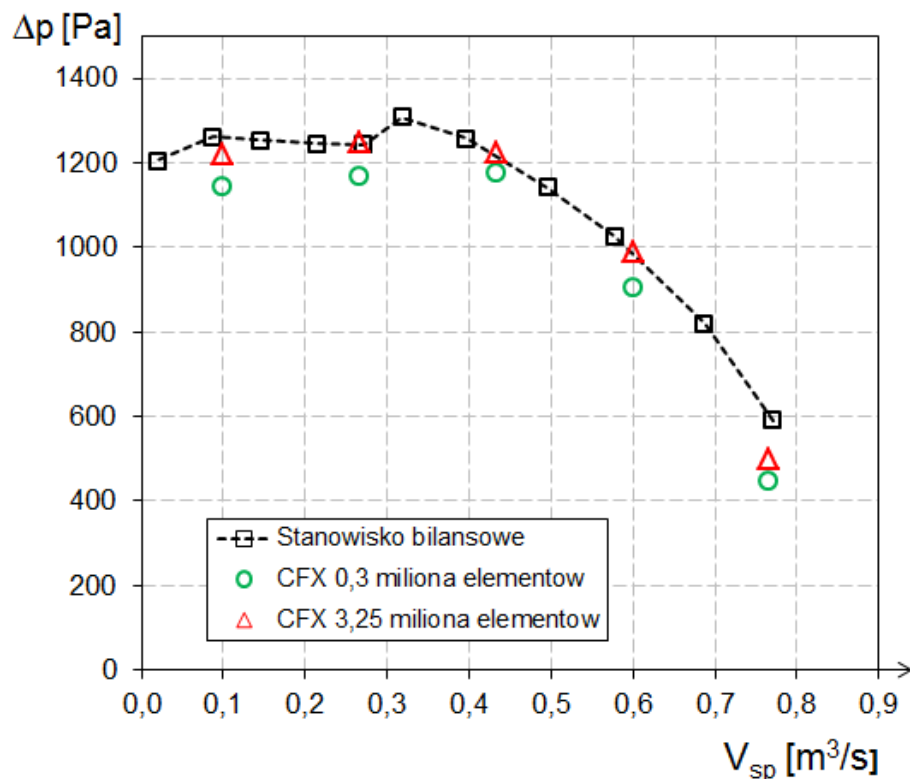
Table of Design Points						
	A	B	C	D	E	F
1	N...	P13 - DS2	P12 - DS1	P11 - Przepływ	P7 - Sprawno...	P8 - DeltaPstat
2	Units			kg s ⁻¹		Pa
3	Current	9	172	0,72	0,81395	989,26
4	DP 1	9	172	0,92	0,65317	500,76
5	DP 2	9	172	0,52	0,81059	1223,6
6	DP 3	9	172	0,32	0,6745	1247
7	DP 4	9	172	0,12	0,40526	1221,1
8	DP 5	9	172	0,02	0,084438	1180,2

Tabela planu eksperymentu + wyniki

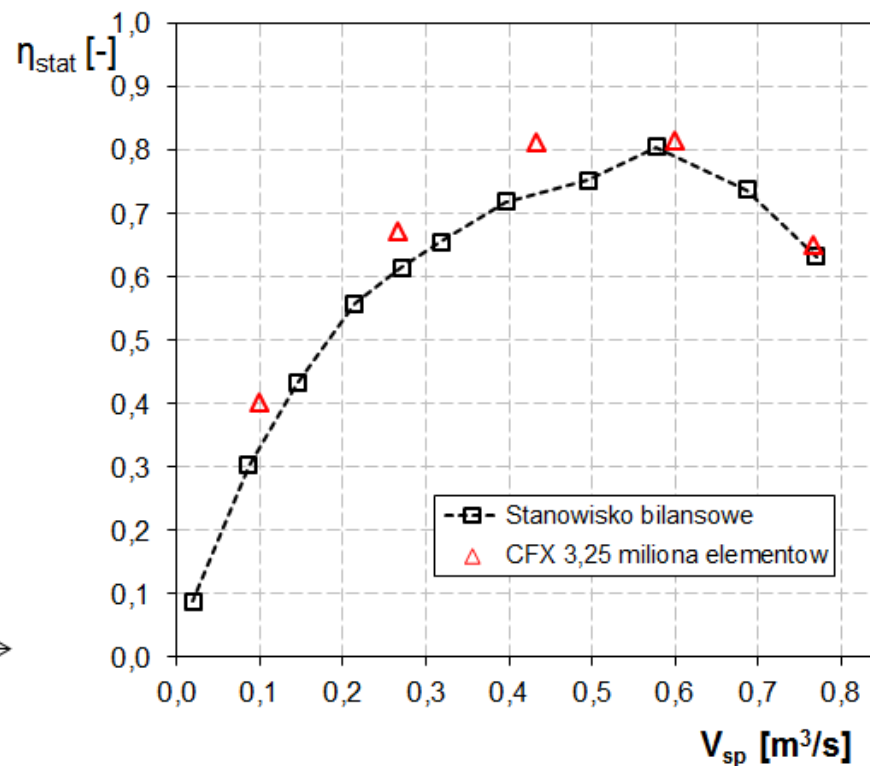


Charakterystyka numeryczna DE

Weryfikacja ilościowa modelu numerycznego



Przyrost ciśnienia statycznego w funkcji wydajności

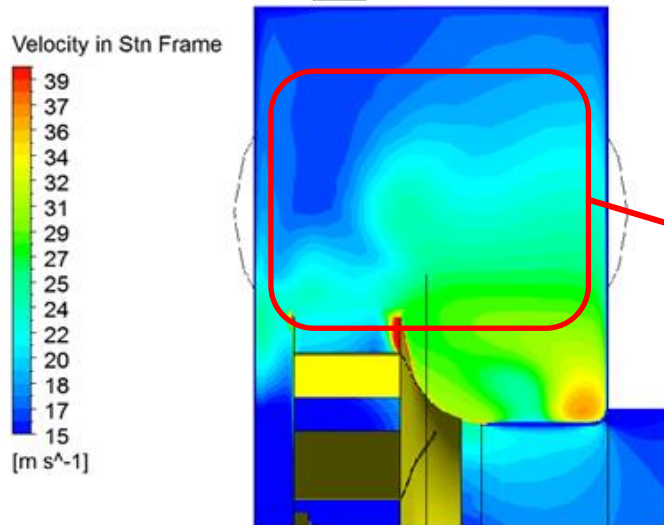


Sprawność wewnętrzna (w parametrach statycznych) w funkcji wydajności

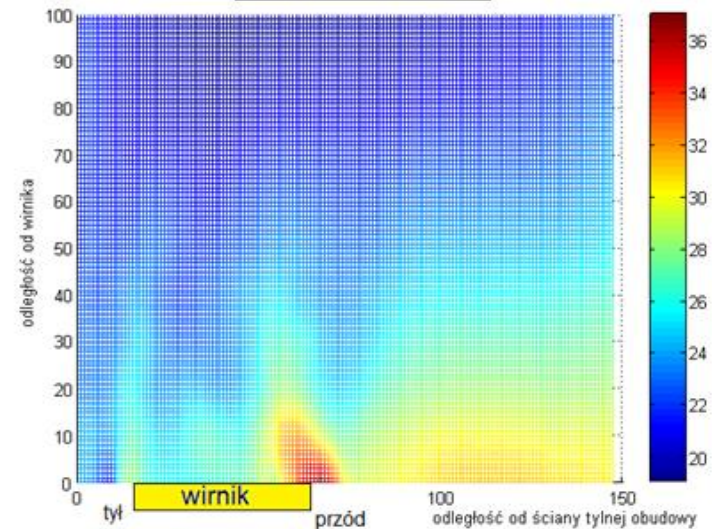
Weryfikacja jakościowa – CFX z Termooanemometrem

Prędkość bezwzględna c za wirnikiem na kącie rozwinięcia 360st.

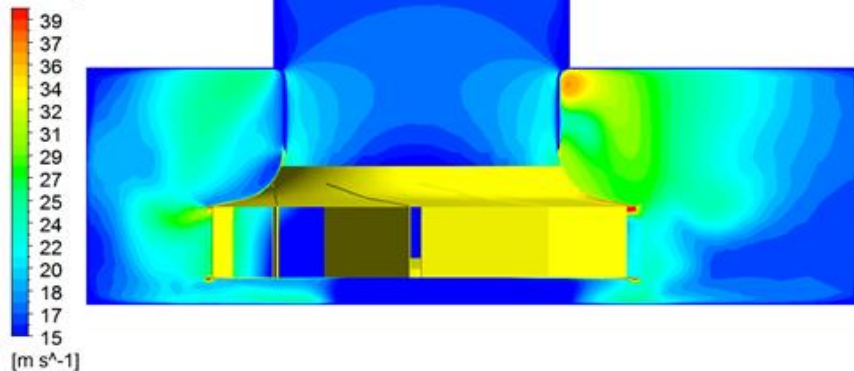
CFX



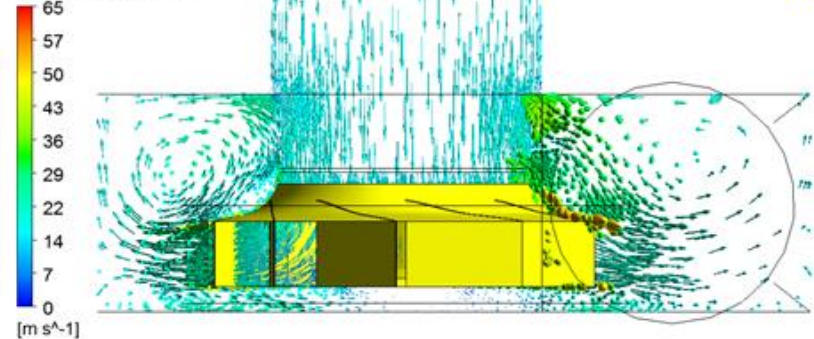
Termooanemometr



Velocity in Stn Frame



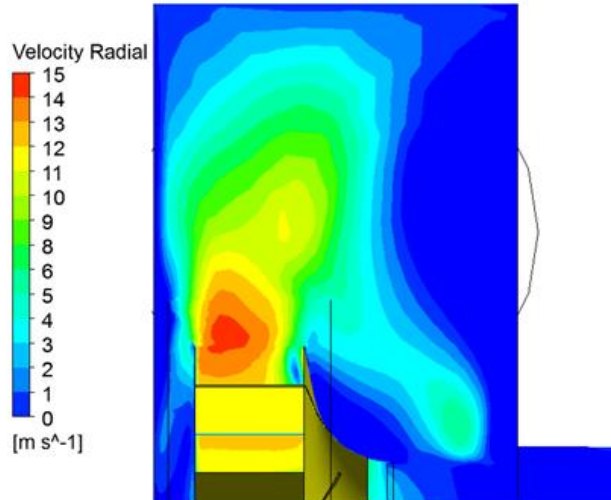
Velocity in Stn Frame



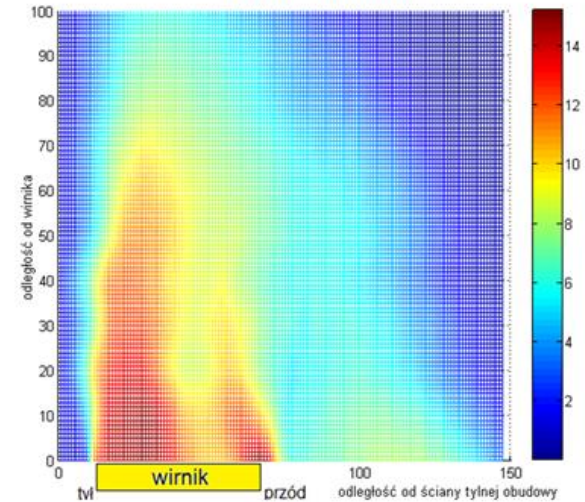
Weryfikacja jakościowa – CFX z Termooanemometrem

Składowa promieniowa c_r za wirnikiem na kącie rozwinięcia 360

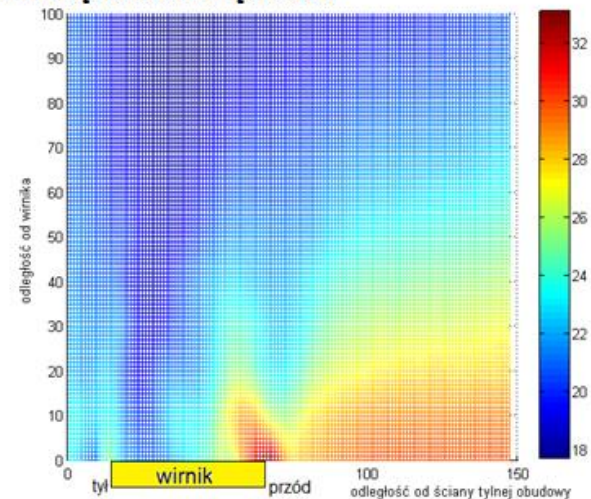
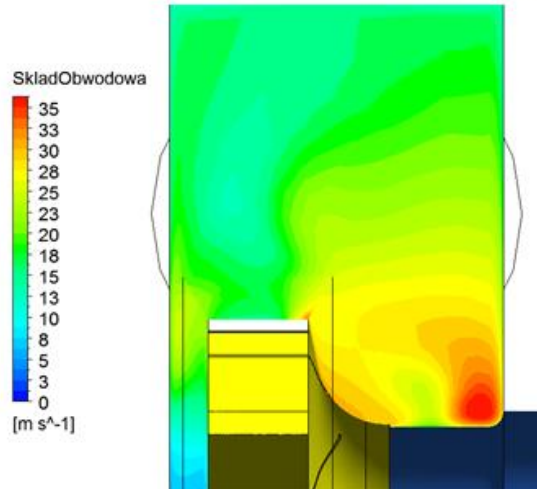
CFX



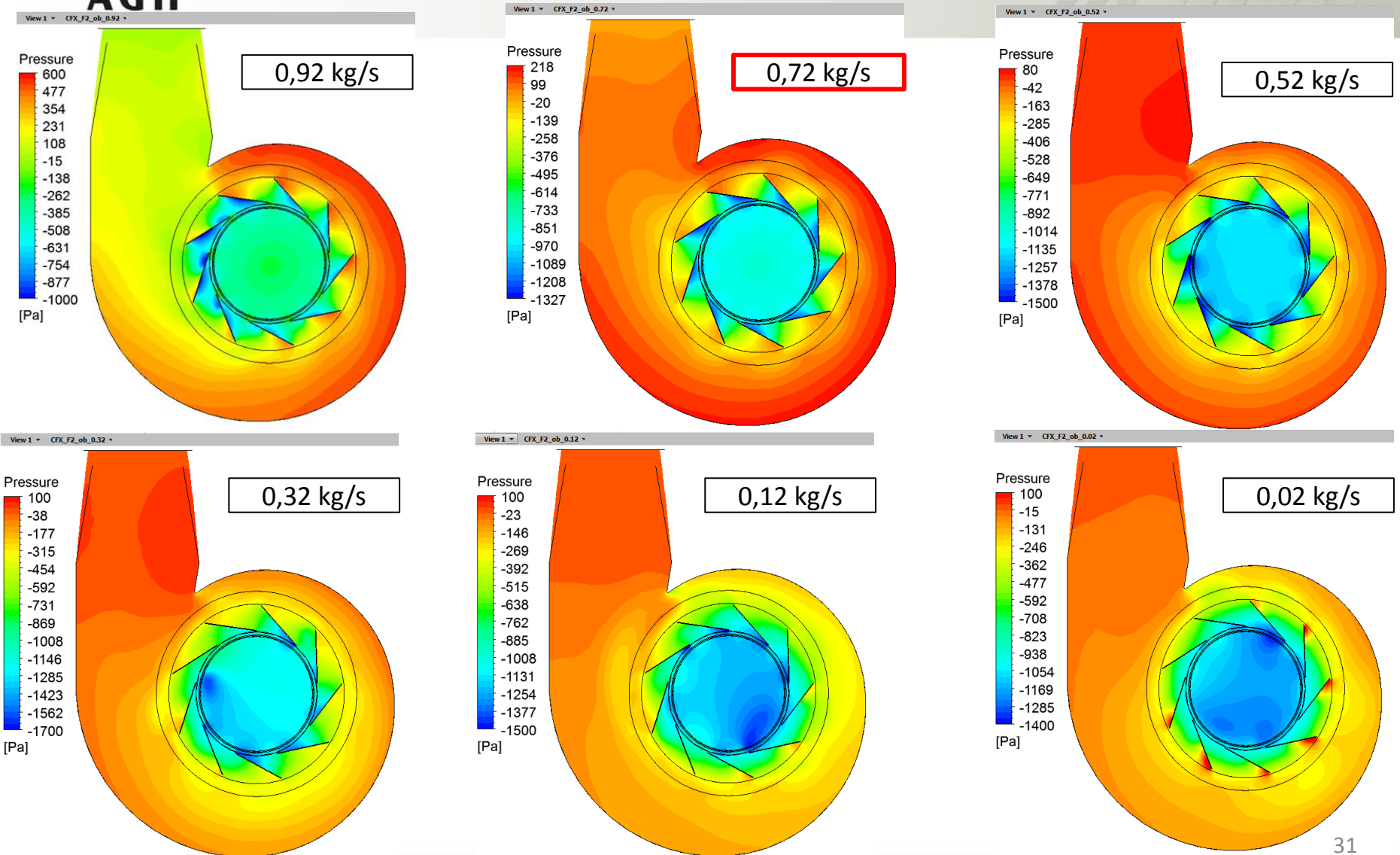
Termooanemometr



Składowa obwodowa c_u za wirnikiem na kącie rozwinięcia 360

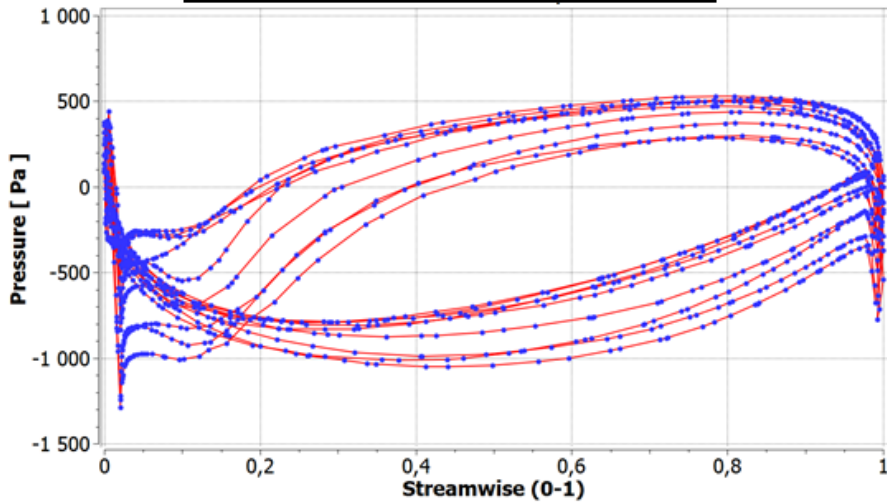


Rozkład ciśnienia statycznego w wirniku dla różnych punktów pracy (50% b_2)

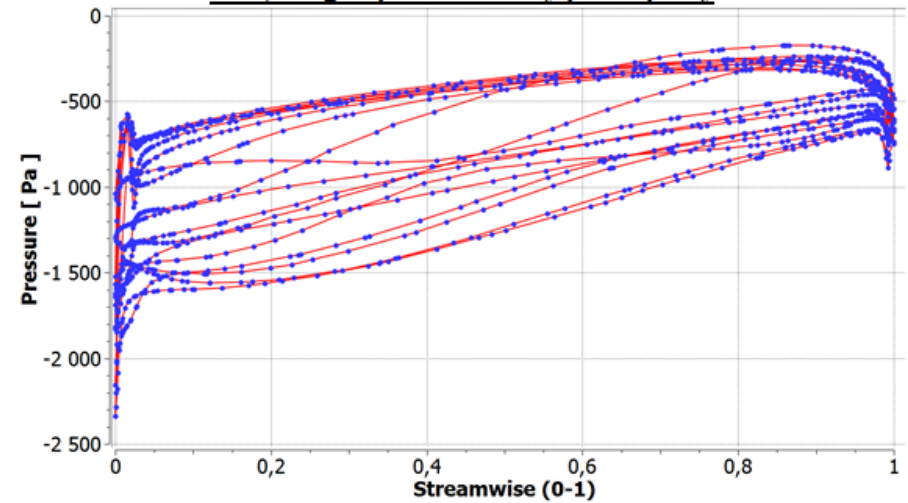


Rozkład ciśnienia statycznego na łopatkach dla różnych punktów pracy (50% b_2)

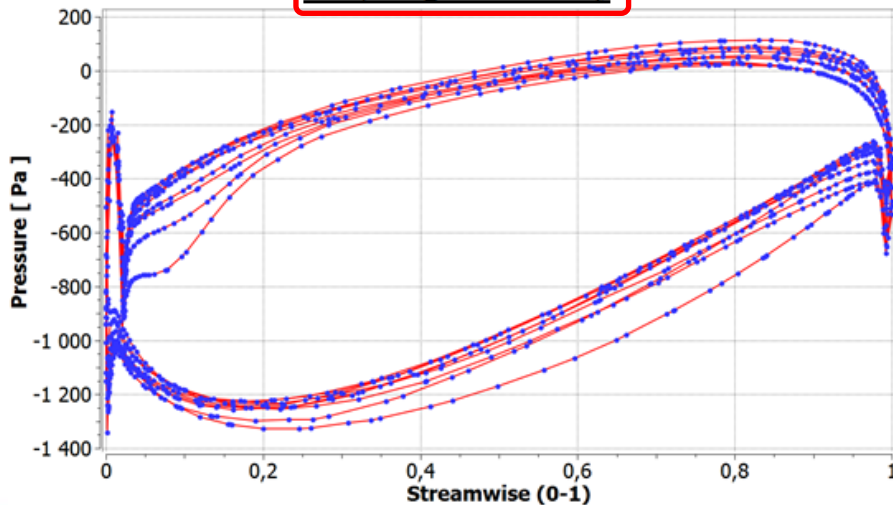
$m=0,92 \text{ kg/s}$ –nad nominalny punkt pracy



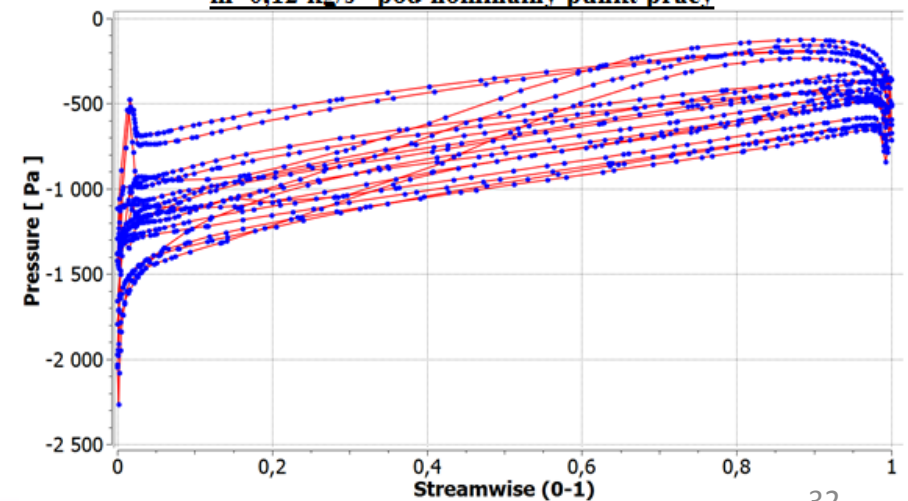
$m=0,32 \text{ kg/s}$ –pod nominalny punkt pracy



$m=0,72 \text{ kg/s}$ -nominalny

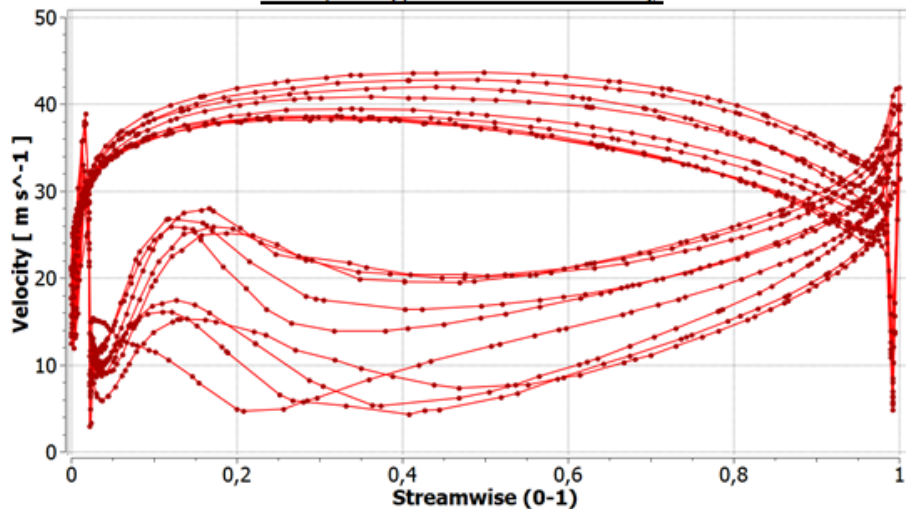


$m=0,12 \text{ kg/s}$ –pod nominalny punkt pracy

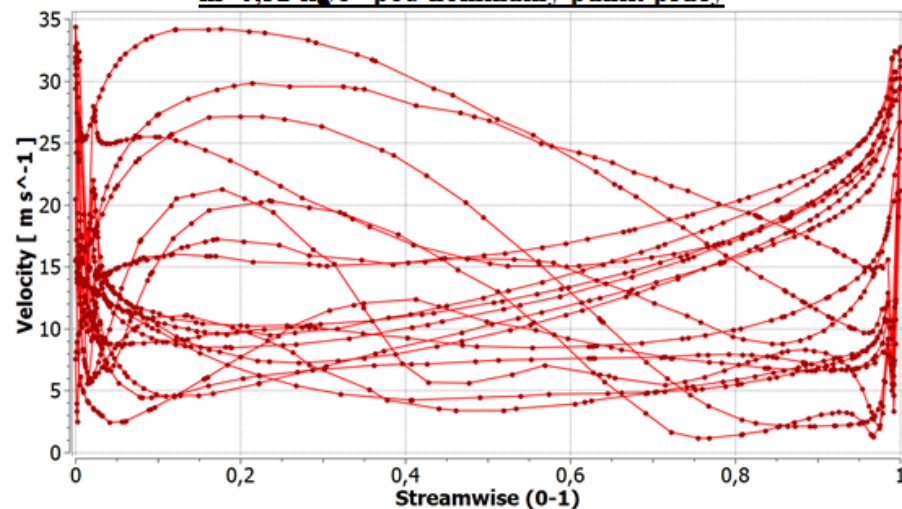


Rozkład prędkości względnej na łopatkach dla różnych punktów pracy (50% b_2)

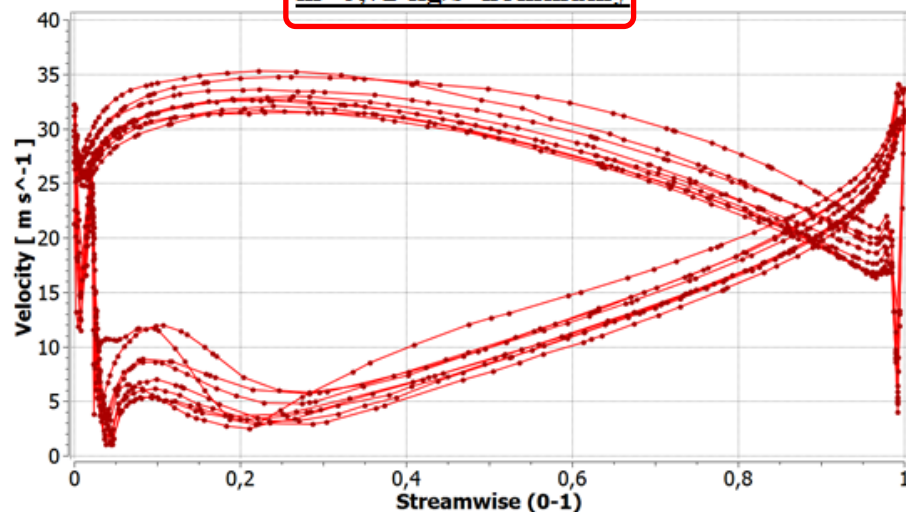
$m=0,92$ kg/s –nad nominalny



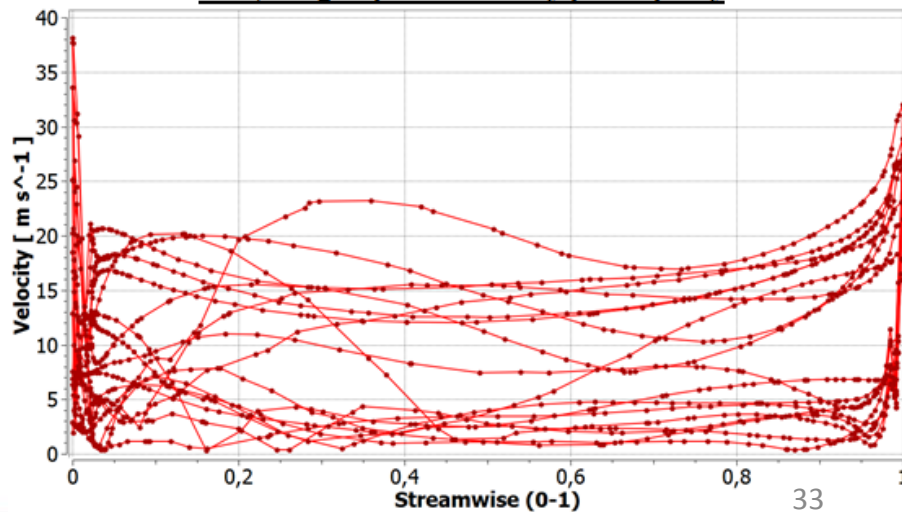
$m=0,32$ kg/s –pod nominalny punkt pracy



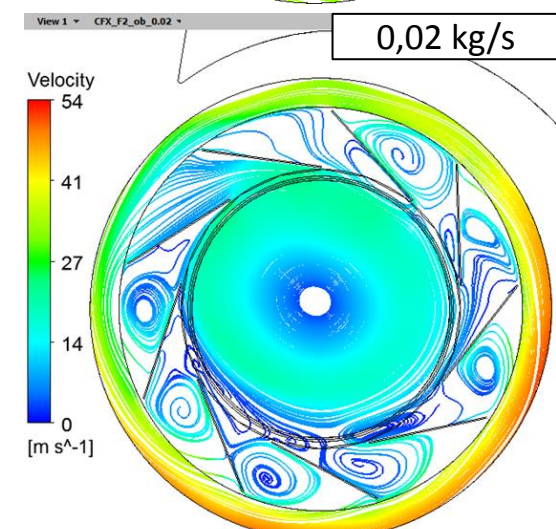
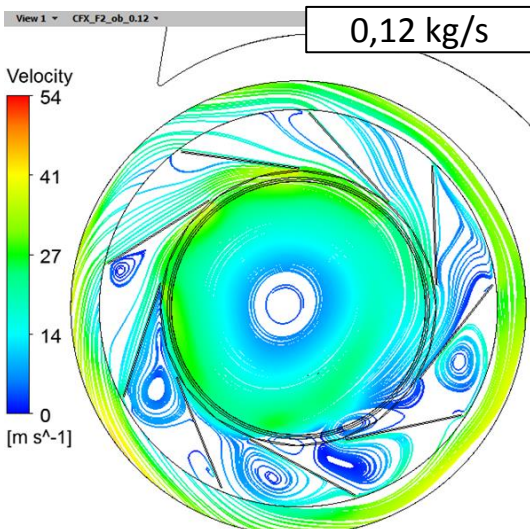
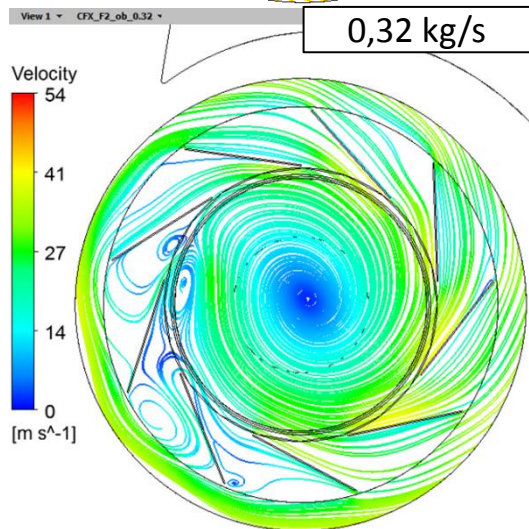
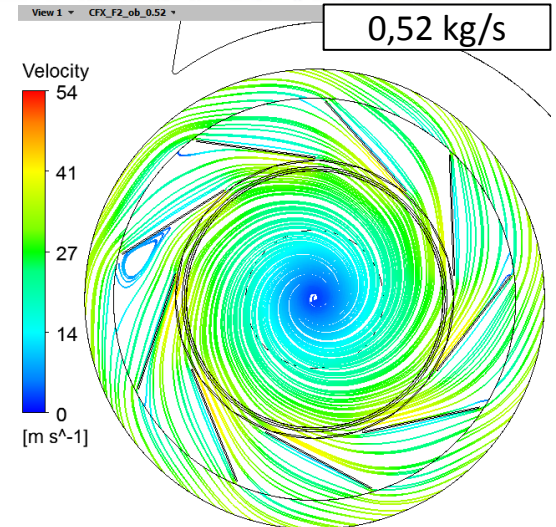
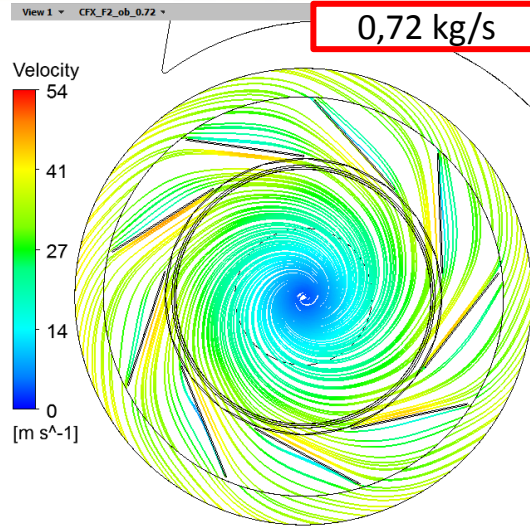
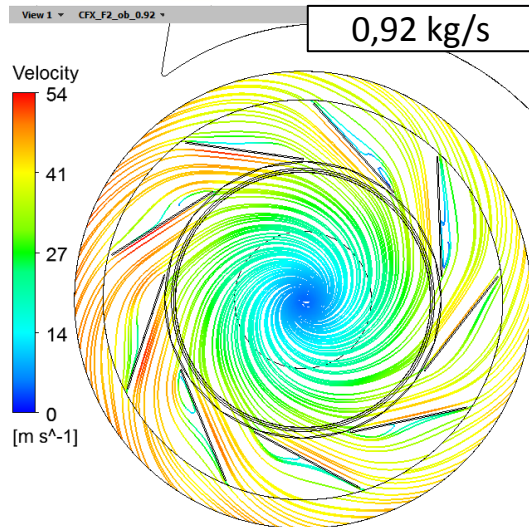
$m=0,72$ kg/s -nominalny



$m=0,12$ kg/s –pod nominalny punkt pracy



Struktury wirowe w wirniku

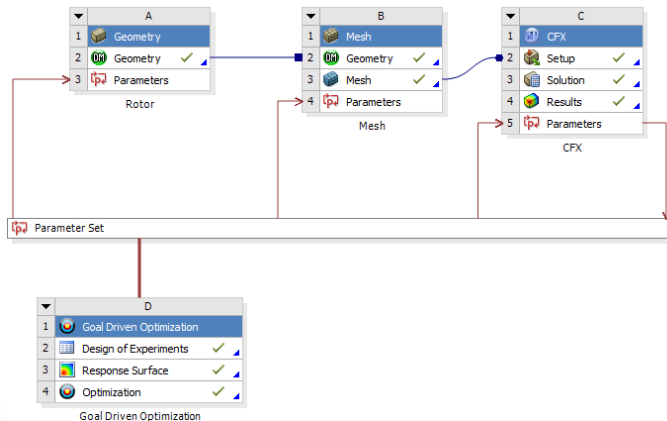
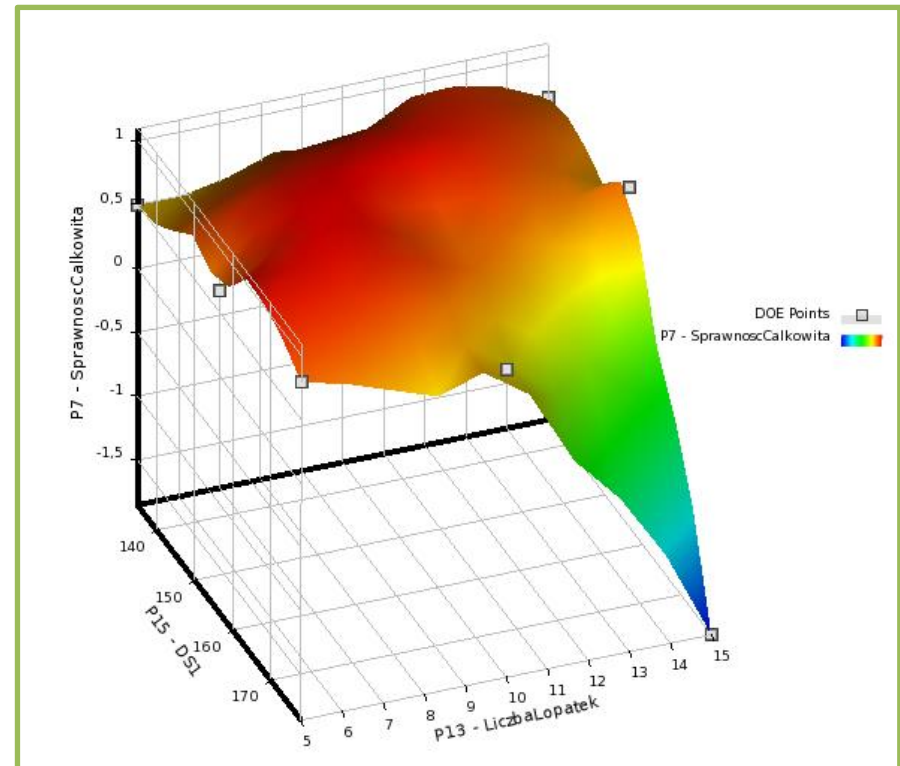


Optymalizacja – dalsze kroki

Plan eksperymentu i obliczenia GDO - Central Composite Design

B	C	D	E	F
Update Order	P13 - Liczb...	P15 - DS1	P7 - SprawnosCa...	P8 - DeltaPstat (Pa)
1	10	156,5	0,77051	1019,2
2	5	156,5	0,66614	616,33
3	15	156,5	0,80862	1237,3
4	10	135	0,63202	896,29
5	10	178	0,56175	504,12
6	5	135	0,50094	448,58
7	15	135	0,66748	1095,7
8	5	178	0,79101	697,61
9	15	178	-1,8524	-1046,7

Płaszczyzna odpowiedzi (generowana metodą Kriging-a)



Dziękuję za uwagę !

