



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

# **TECHNIKI PLANOWANIA EKSPERYMENTU I OPTYMALIZACJA KONSTRUKCJI MASZYN WIRNIKOWYCH Z WYKORZYSTANIEM METOD NUMERYCZNYCH**

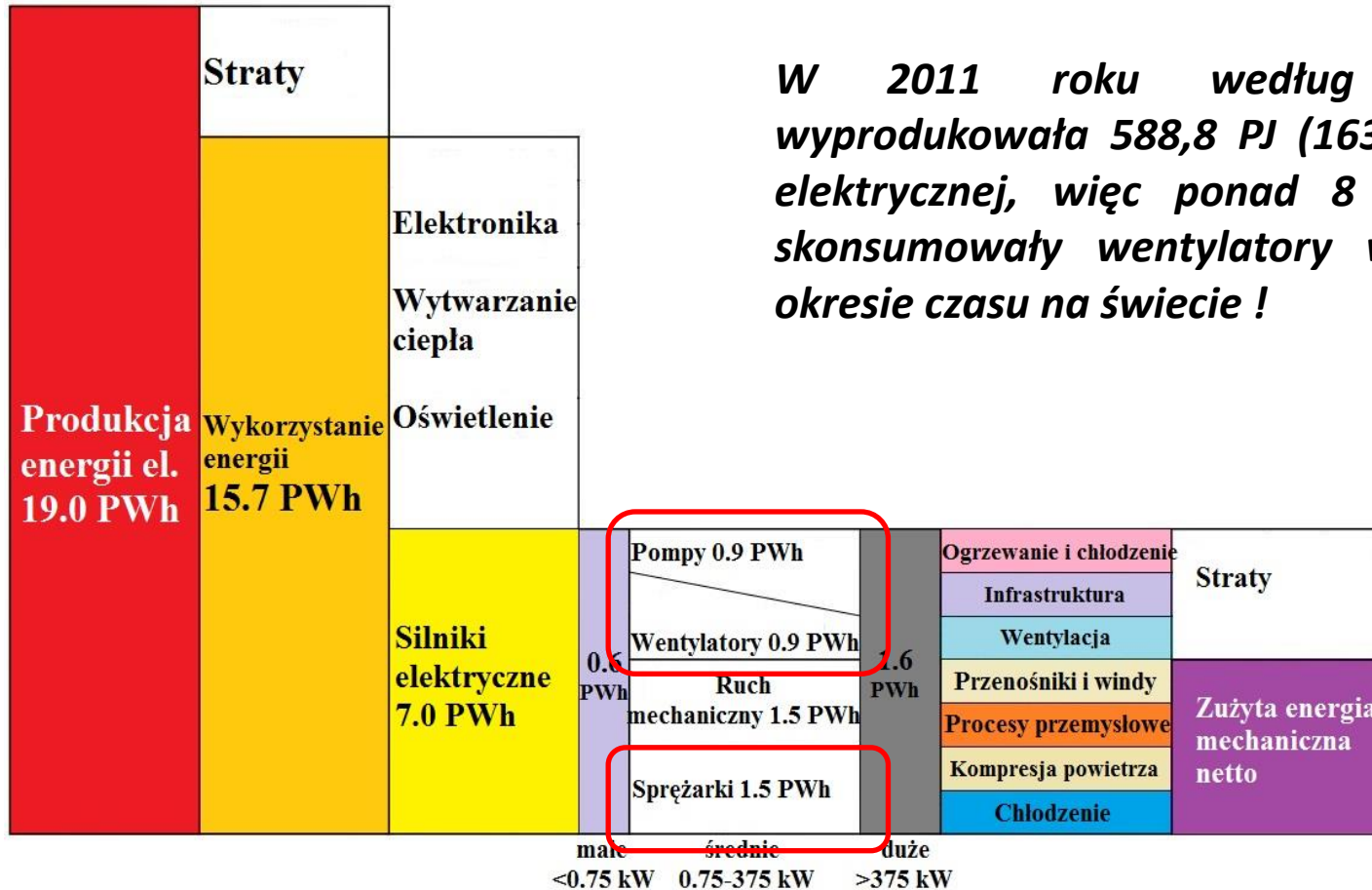
**Tomasz Siwek, Mateusz Szubel, Dominika Matuszewska**

[siwek@agh.edu.pl](mailto:siwek@agh.edu.pl)

AGH University of Science and Technology

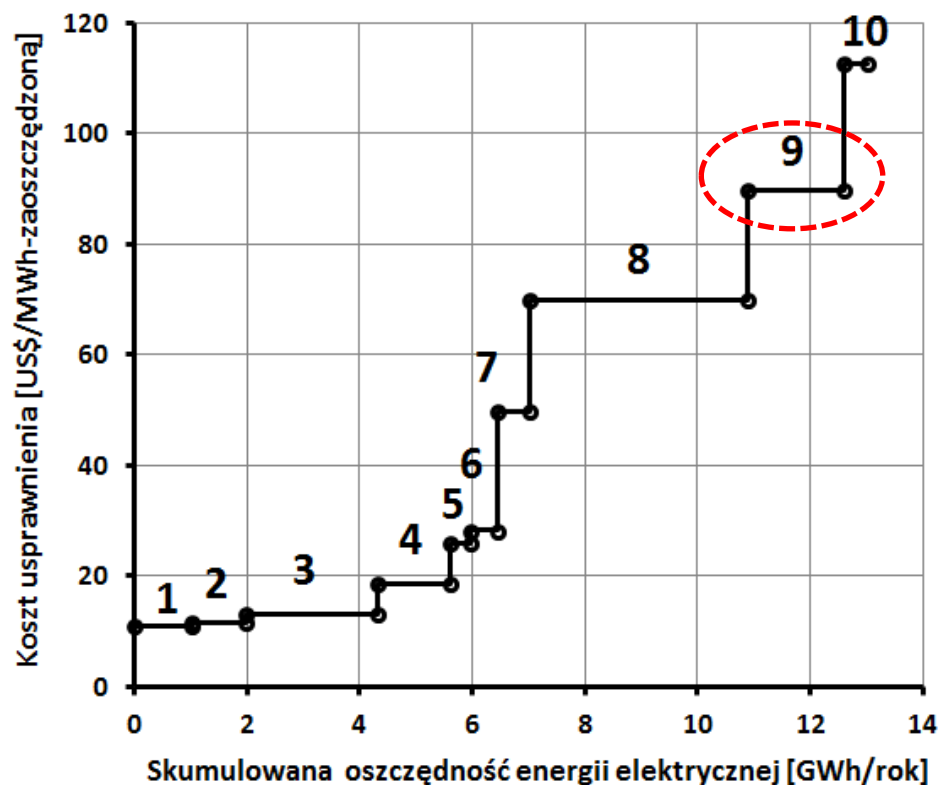
**Krynica, 10.03.2016r.**

# STRUKTURA KONSUMPCJI ENERGII ELEKTRYCZNEJ NA ŚWIECIE



*W 2011 roku według GUS Polska wyprodukowała 588,8 PJ (163,5 TWh) energii elektrycznej, więc ponad 8 razy mniej niż skonsumowały wentylatory w analogicznym okresie czasu na świecie !*

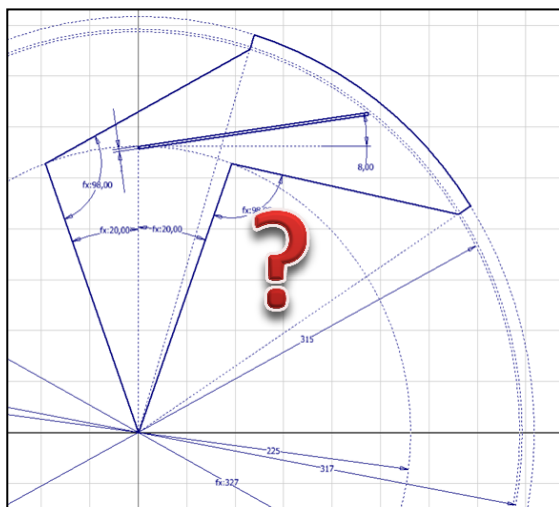
# ILE I JAK ZAOSZCZĘDZIĆ ?!



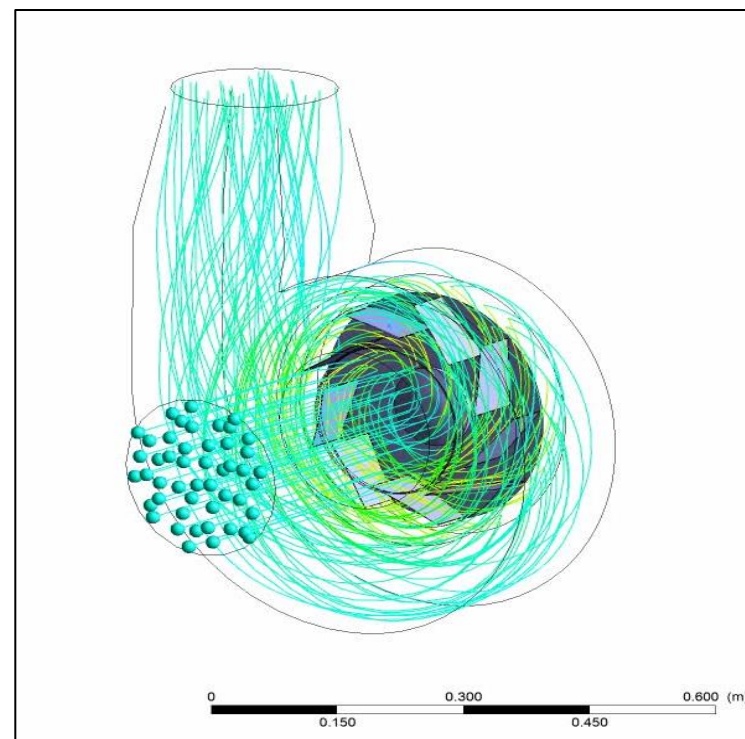
- 1 Uszczelnienie maszyn i systemów
- 2 Sterowanie i regulacja przepustnic
- 3 Odcinanie przepływu do niepracującego sprzętu
- 4 Poprawa warunków przepływu powietrza na wlotach i wylotach wentylatorów
- 5 Oczyszczenie maszyn i systemu z osadów
- 6 Wprowadzenie systemu kontrolowanego serwisu
- 7 Modernizacja lub eliminacja napędów pasowych
- 8 Regulacja punktu pracy za pomocą obrotów
- 9 **Wymiana przewymiarowanych wentylatorów na bardziej sprawne**
- 10 Wymiana silników elektrycznych na bardziej sprawne

*Krzywa potencjału ograniczenia zużycia energii dla wentylatorów i ich systemów w warunkach UE z uwzględnieniem kosztów i zysków poszczególnych operacji*

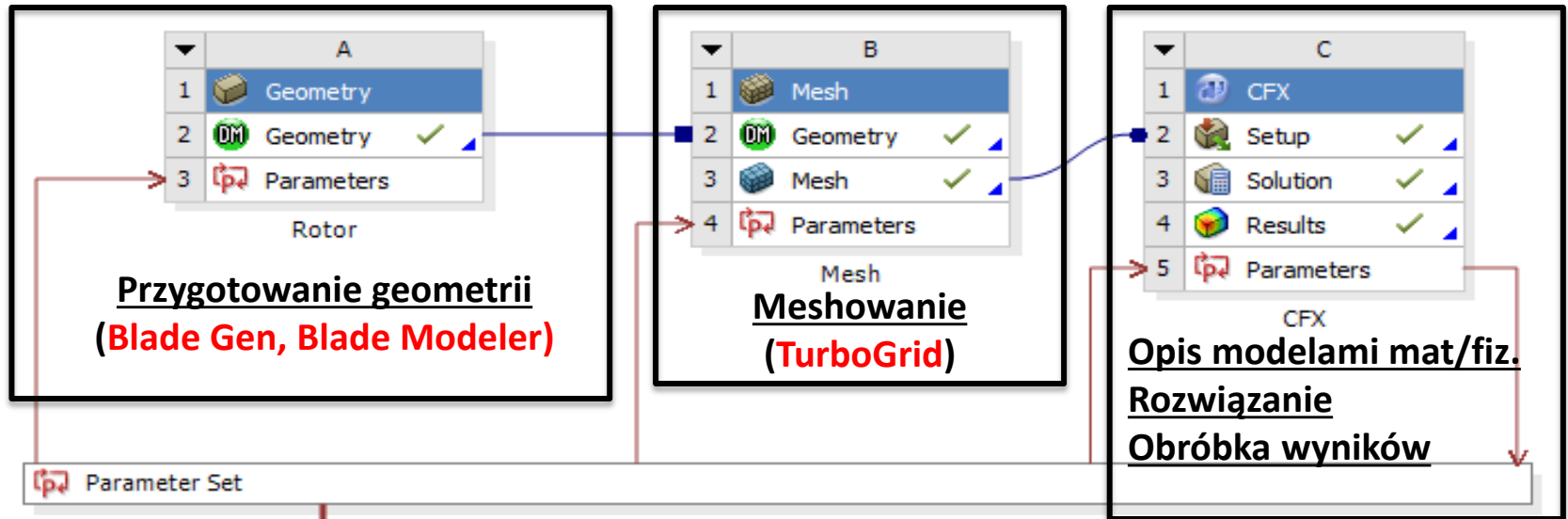
# OD KONCEPCJI DO NAJLEPSZEGO ROZWIĄZANIA



optymalizacja



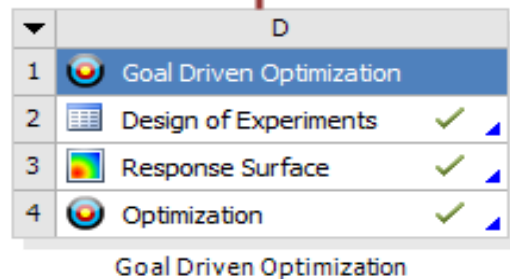
Raport o maszynie



Przygotowanie geometrii  
(Blade Gen, Blade Modeler)

Meshowanie  
(TurboGrid)

Opis modelami mat/fiz.  
Rozwiązanie  
Obróbka wyników



## Zarządzanie przebiegiem eksperymentu

- **Wybór planu eksperymentu** (CCD - Central Composite Design, Optimal Space-Filling , niestandardowy-własny)
- **Generowanie przestrzeni odpowiedzi** (algorytmy dopasowania: Full Second-Order Polynomial, Kriging, Non-parametric Regression, Neural Network)
- **Typowanie kandydatów** (Screening, Multi-Objective Genetic Algorithm, Nonlinear Programming)

# TWORZENIE I PARAMETRYZACJA MODELU

Z pakietu ANSYS

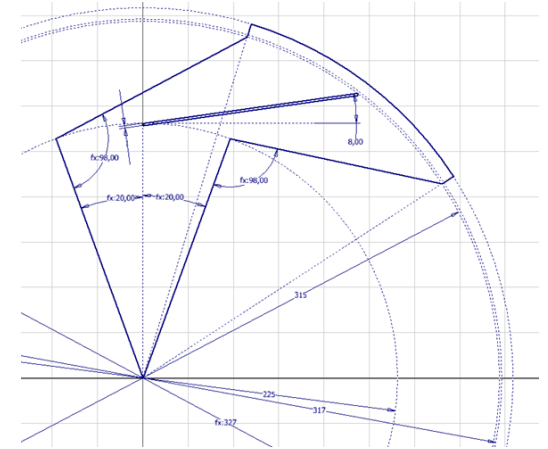
- **Design Modeler**
- **SpaceClaim**
- Blade Gen
- Blade Editor

Inne geometrie  
CAD

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

Notatnik  
(.dat, .txt)

- definiowanie krzywych opisujących np. profil lotniczy



B: Geometry - DesignModeler

File Create Concept Tools Units View Help

ZXPlane FlowPath2\_Lay Generate Share Topology Parameters Extrude Revolve Sweep Skin/Loft

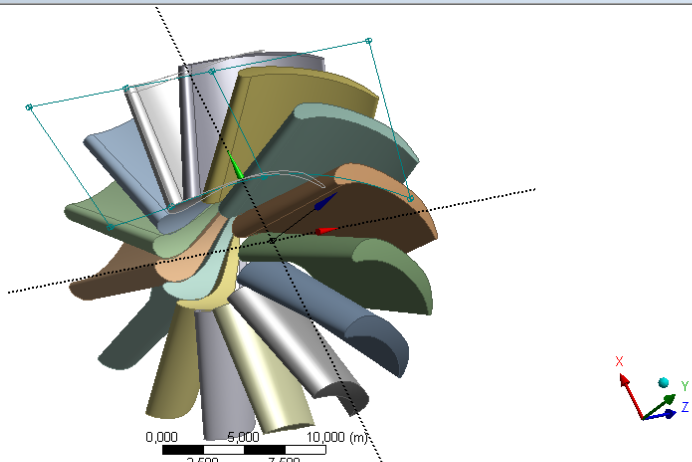
Thin/Surface Blend Chamfer Slice Point Conversion

BladeEditor: Import BGD Load BGD FlowPath Blade Splitter VistaTFExport ExportPoints StageFluidZone SectorCut ThroatArea CAD Import Preferences

Tree Outline Graphics Section Definition Graph: Blade2\_Section2

B: Geometry

- XYPlane
- ZXPlane
- Hub
- Shroud
- In
- Out
- LE
- TE
- FlowPath2\_LayerContour
- VZPlane
- FlowPath2
- Blade2
- Blade2\_Section1
- Blade2\_Section2
- 15 Parts, 15 Bodies



0,000 5,000 10,000 (m)  
2,500 7,500

Model View Print Preview

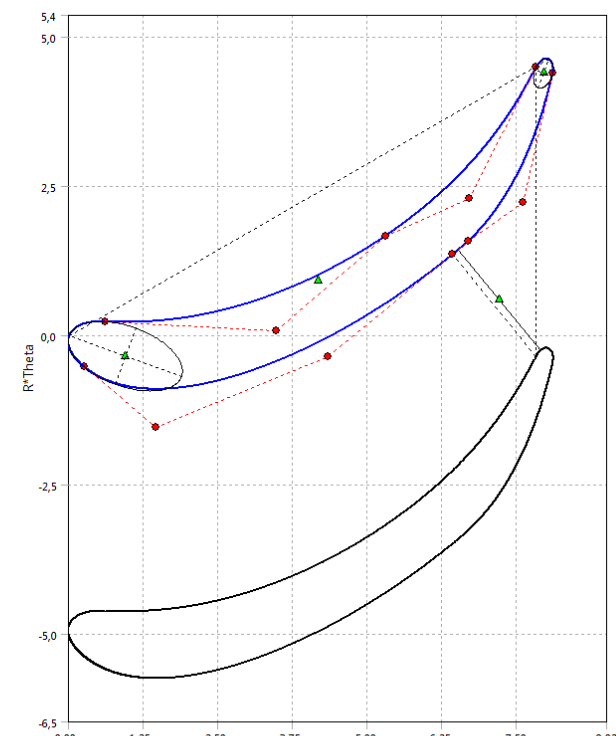
Parameter Editor

Name	Value	Type	Comment
✓ LiczbaLopatek	15	Dimensionless	
✓ PromienLE	0,5 m	Length	

Check Close

Design Parameters Parameter/Dimension Assignments

Section Definition Graph: Blade2\_Section2



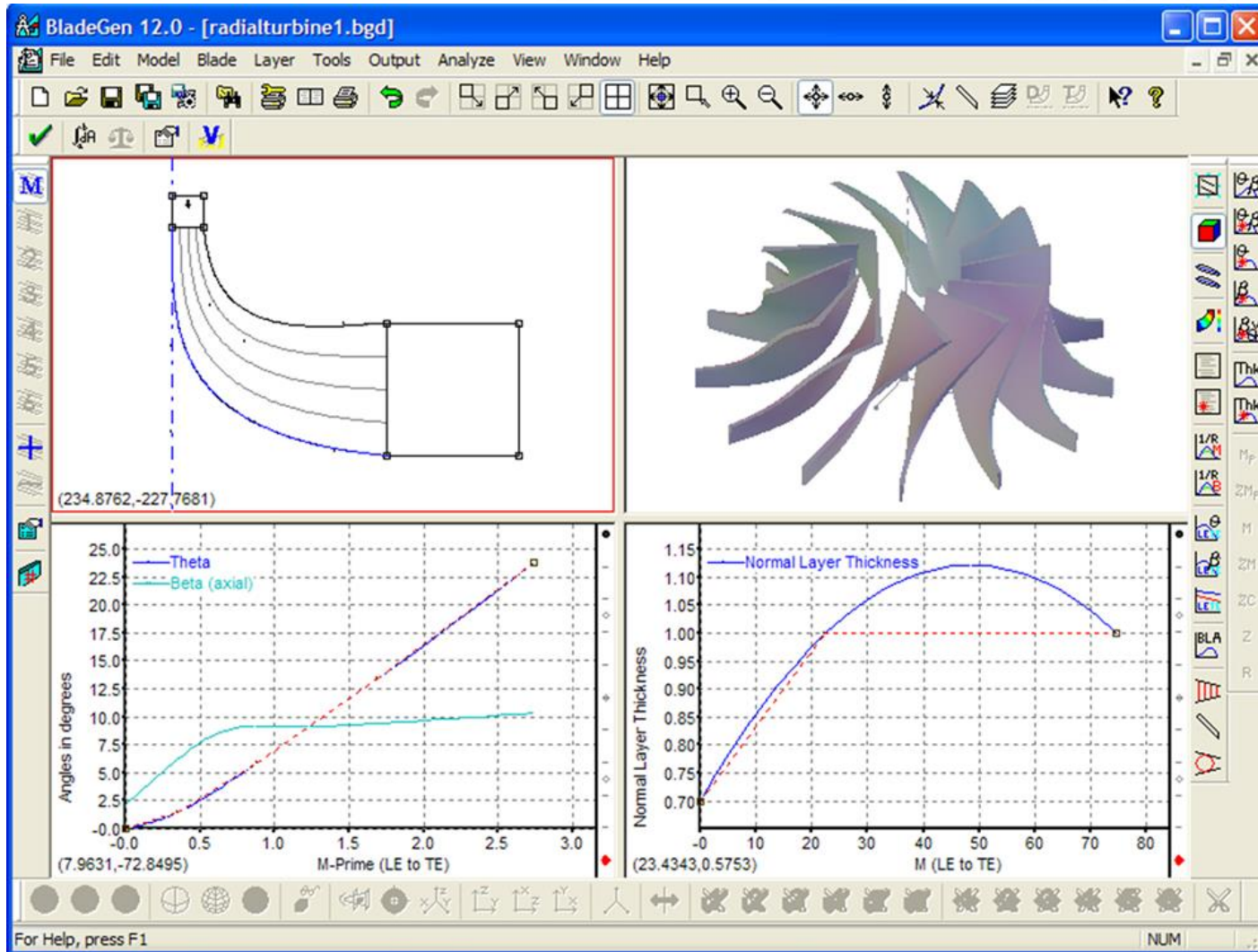
5,4  
5,0  
2,5  
0,0  
-2,5  
-5,0  
-6,5

0,00 1,25 2,50 3,75 5,00 6,25 7,50 9,02

M (LE to TE)

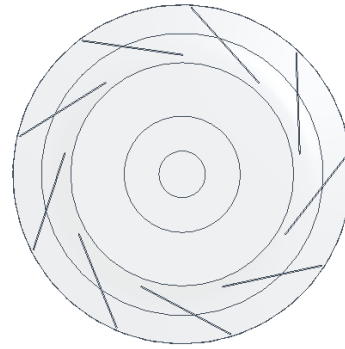
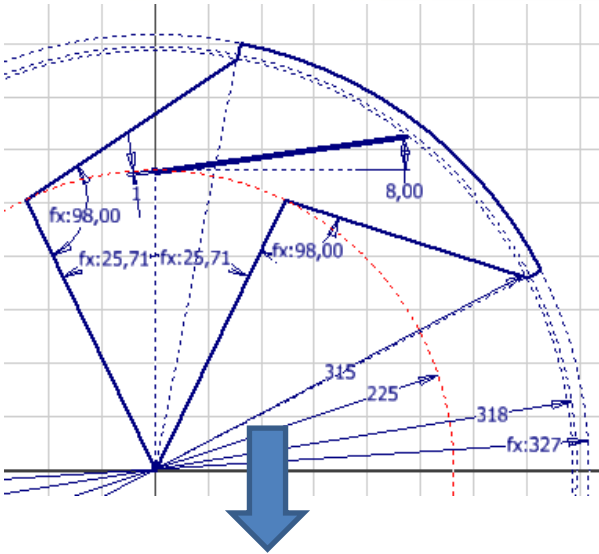
Ready No Selection Meter Degree 0 0

# TWORZENIE GEOMETRII WIRNIKA - BladeGen



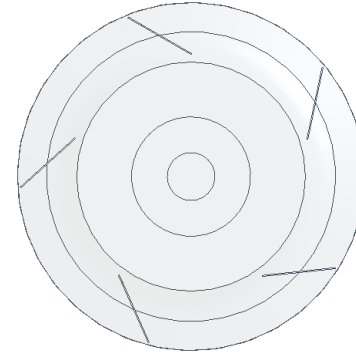


# GENEROWANIE WIRNIKA –PARAMETRYZACJA MODELU



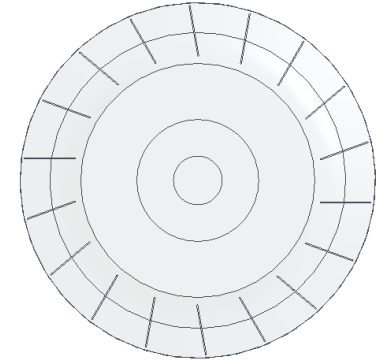
$$\beta_1 = 8^\circ$$

$$z = 9$$



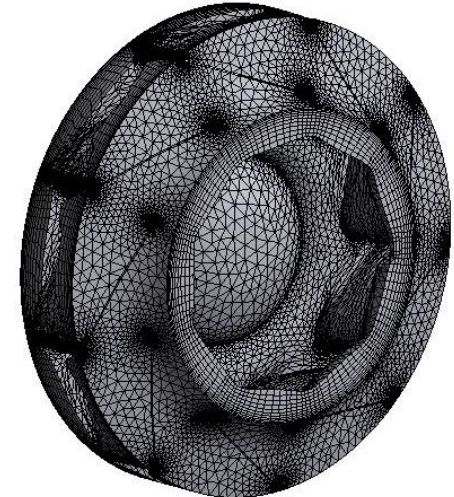
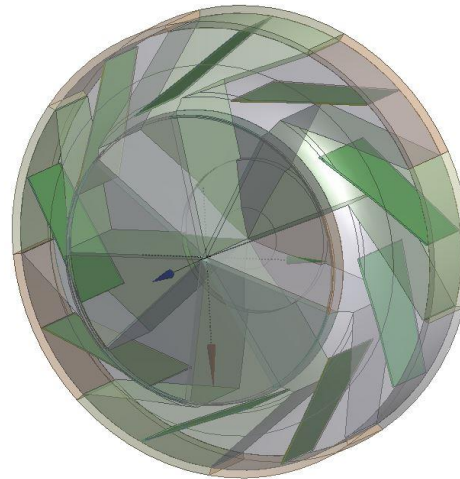
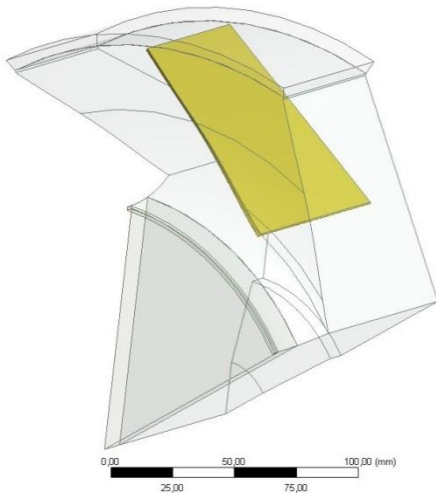
$$\beta_1 = 30^\circ$$

$$z = 5$$



$$\beta_1 = 80^\circ$$

$$z = 15$$

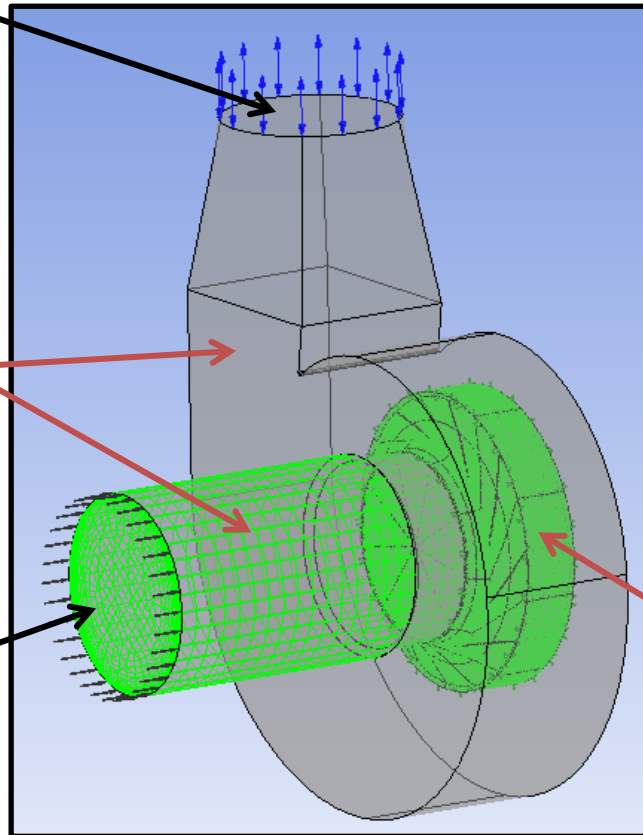


# DOMENY I WARUNKI BRZEGOWE - PreCFX

Ciśnienie otoczenia (100 kPa)

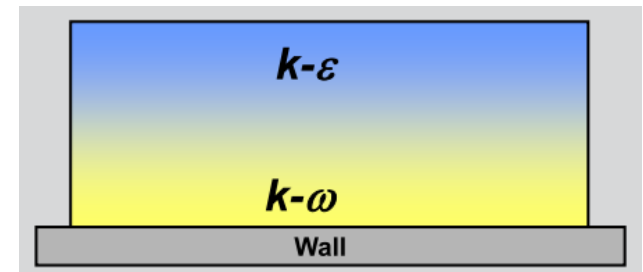
Domeny stacjonarne (powietrze, gaz doskonały)

Zmienna:  
strumień masy



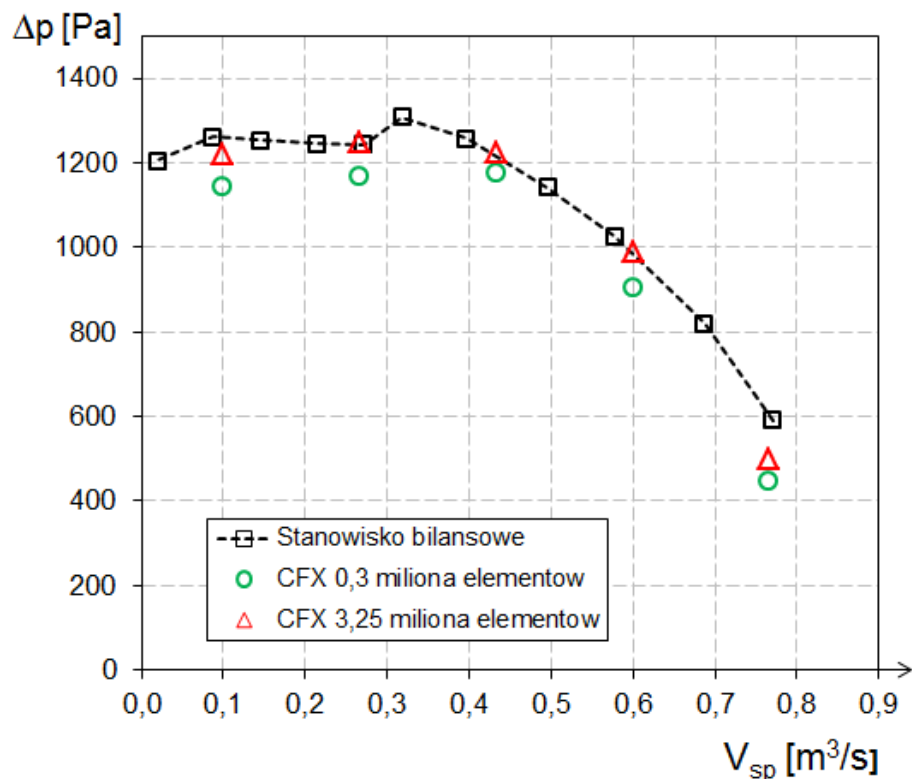
## Model turbulencji:

- SST  $k-\omega$  (*Shear Stress Transport, Menter*)

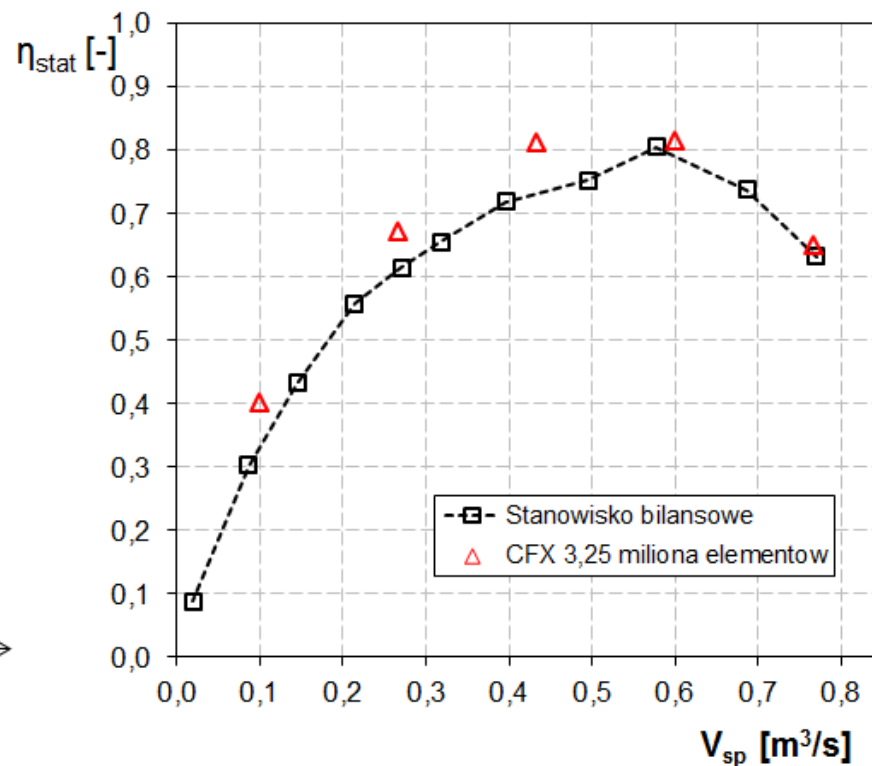


Domena obrotowa „sparametryzowany wirnik” (n=2880 ob/min)

# WERYFIKACJA ILOŚCIOWA MODELU NUMERYCZNEGO



Przyrost ciśnienia statycznego  
w funkcji wydajności

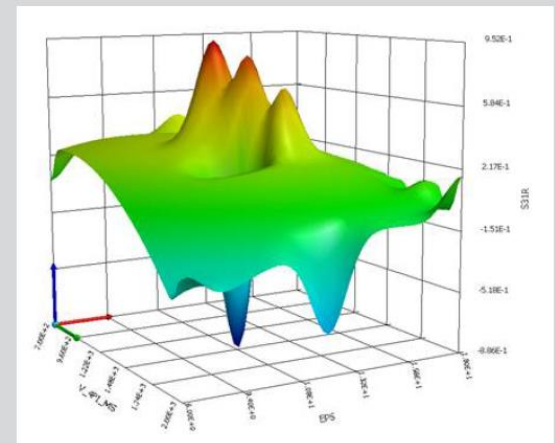
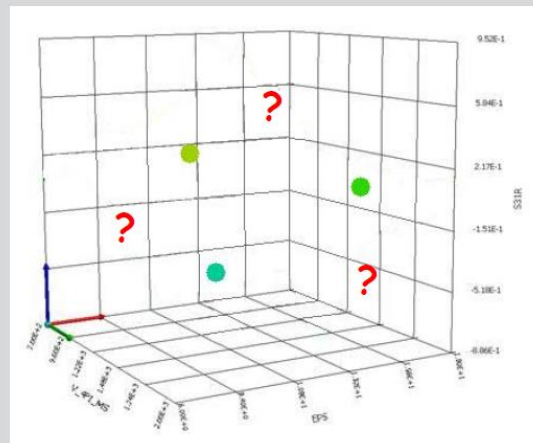
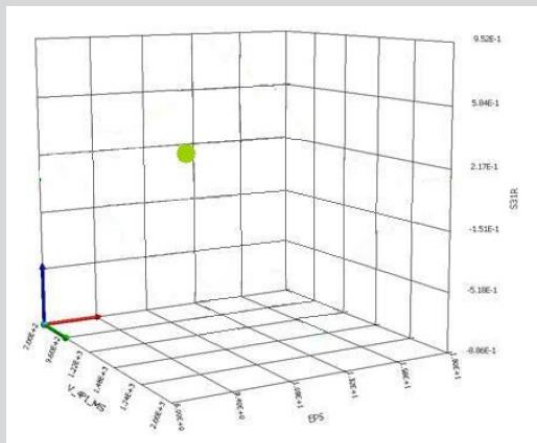


Sprawność wewnętrzna (w parametrach  
statycznych) w funkcji wydajności

# PLANOWANIE EKSPERYMENTU NUMERYCZNEGO (DesignXplorer in GDO)

DesignXplorer (DX) jest narzędziem, które wykorzystuje powierzchnie odpowiedzi (Response surfaces) do efektywnego opisania/odwzorowania przestrzeni rozwiązania, celem:

- Poznania parametrów pracy przy innych warunkach projektowych i operacyjnych,
- Znalezienia warunków, które dają najlepsze osiągi,
- Określenie kluczowych parametrów wpływających na osiągi (badanie wrażliwości),
- Badanie relacji pomiędzy parametrami wejściowymi/wyjściowymi.

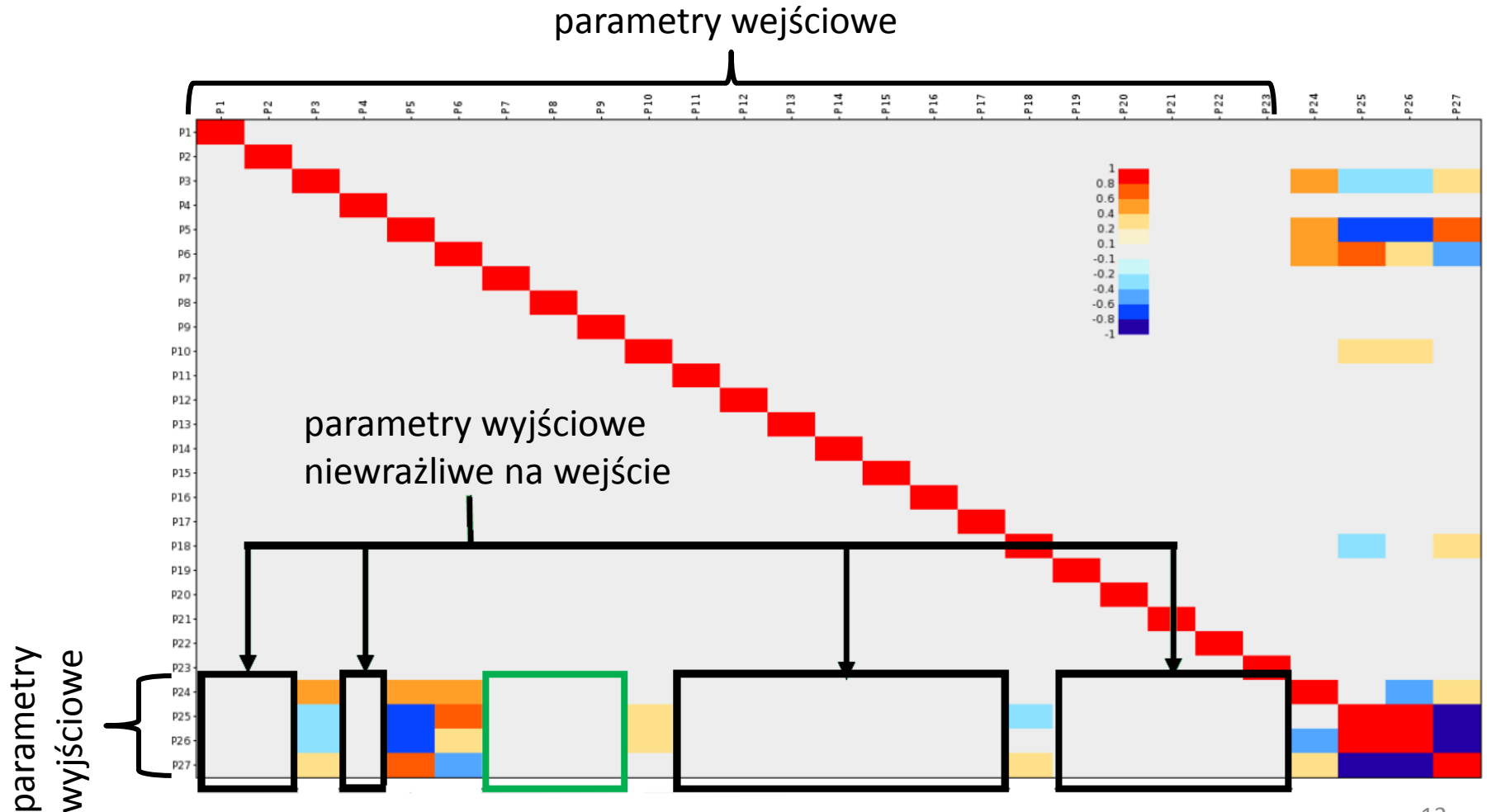


Pojedyncza  
próba

Analiza  
„What if?”

Przestrzeń  
odpowiedzi

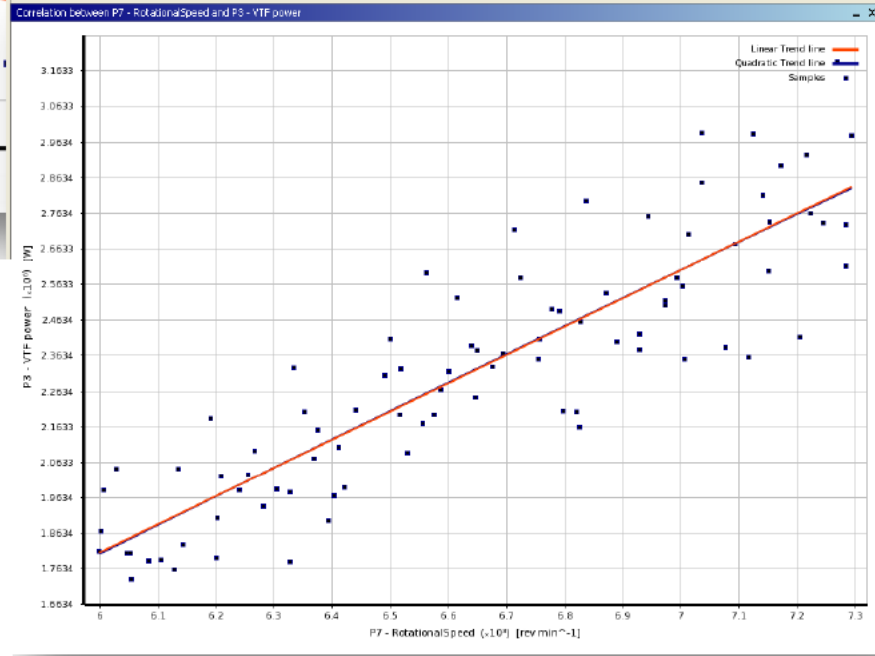
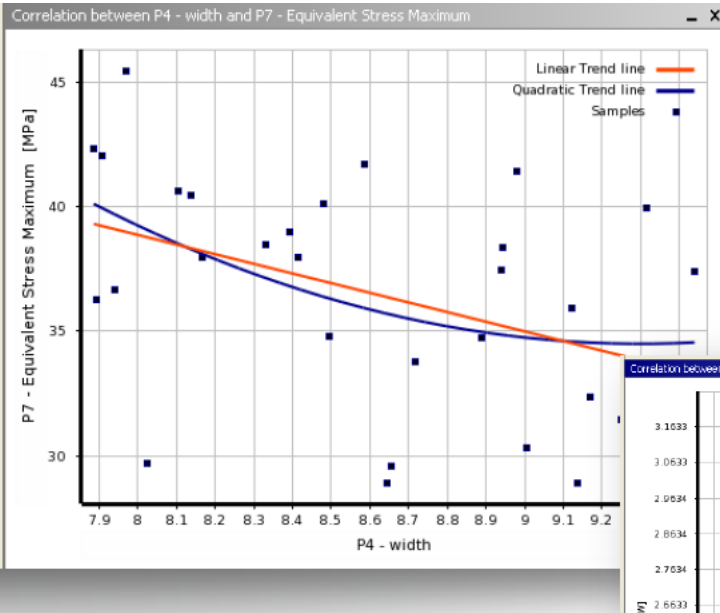
# DesignXplorer – BADANIE WRAŻLIWOŚCI



# DesignXplorer – BADANIE KORELACJI

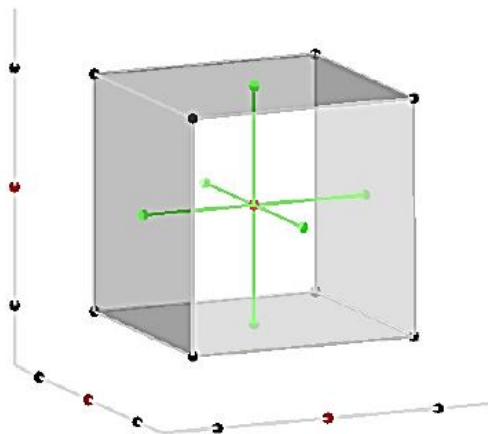
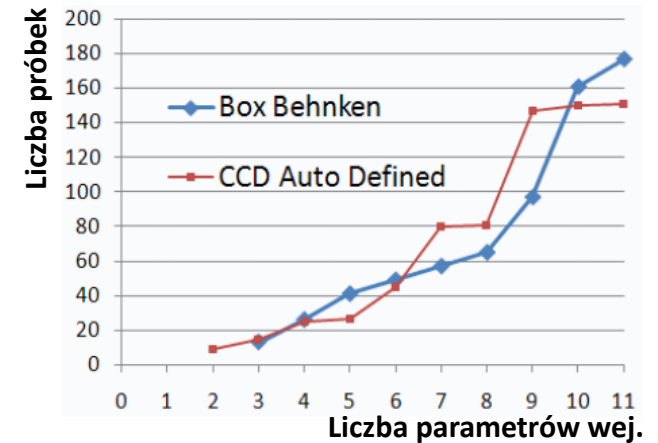
Properties of Outline A13: Correlation Scatter

	A	B	C
1	Property	Value	Enabled
2	Axes		
3	X axis	P4 - width	
4	Y axis	P7 - Equ...	
5	Trend Lines		
6	Linear	R2 = 0.17728	<input checked="" type="checkbox"/>
7	Quadratic	R2 = 0.19282	<input checked="" type="checkbox"/>

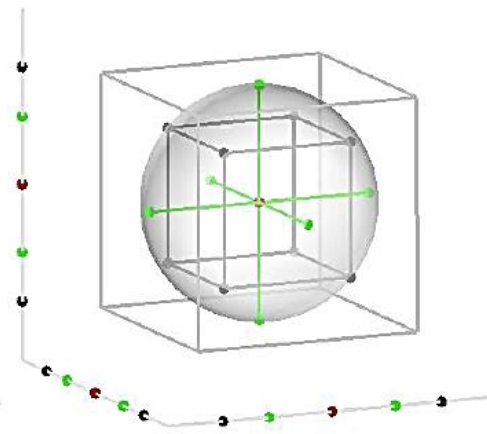


Celem efektywnego prowadzenia optymalizacji, DOE posiada kilka wbudowanych planów eksperymentu:

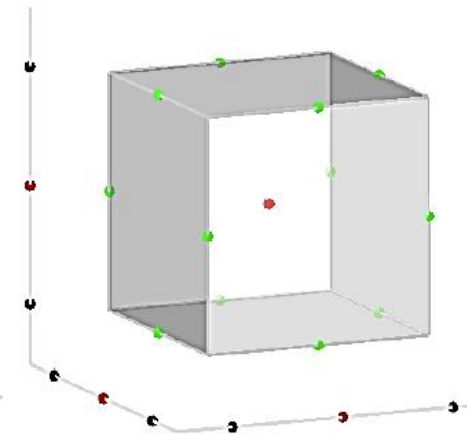
- Central Composite Design (CCD) [domyślny]
- Box Behnken Design
- Optimal Space Filling Design
- Custom + Sampling
- Sparse Grid Initialization
- Latin Hypercube Sampling Design



CCD Face Centered



CCD Rotatable



Box Behnken

## PLAN EKSPERYMENTU – Optymalizacja wirnika

Próbki związane z planem eksperymentu, wygenerowanym metodą CCD – VIF Optimality, pod kątem optymalizacji wybranych parametrów wirnika wentylatora promieniowego.

Design Point (DP)	Input Parameter (P13)	Input Parameter (P15)	Output Parameter (P7)	Output Parameter (P8)
	„z” number of blades	„ $\beta_1$ ” blade inlet angle	„ $\eta$ ” total efficiency	$\Delta p_{st}$ static pressure
1	10	23,5	0,77	1019
2	5	23,5	0,67	616
3	15	23,5	0,81	1237
4	10	45	0,63	896
5	10	2	0,56	504
6	5	45	0,50	449
7	15	45	0,67	1096
8	5	2	0,79	698
9	15	2	<0*	<0*

\* w 9 DP wentylator pracuje jak turbina



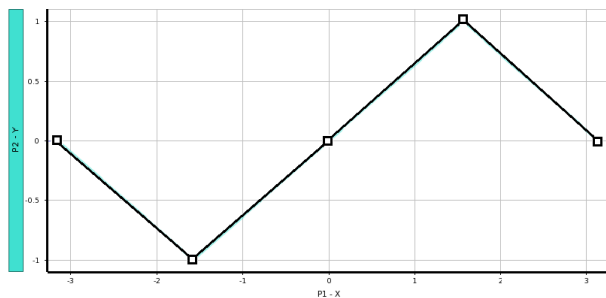
# GENEROWANIE POWIERZCHNI ODPOWIEDZI

Powierzchnia odpowiedzi (Response Surface) zapewnia przybliżone wartości parametrów wyjściowych, w każdym miejscu analizowanej przestrzeni projektowej, bez konieczności przeprowadzenia kompletnego rozwiązania.

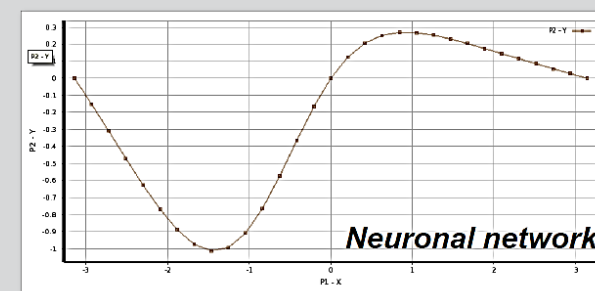
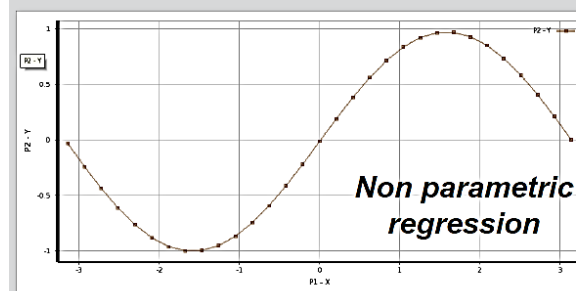
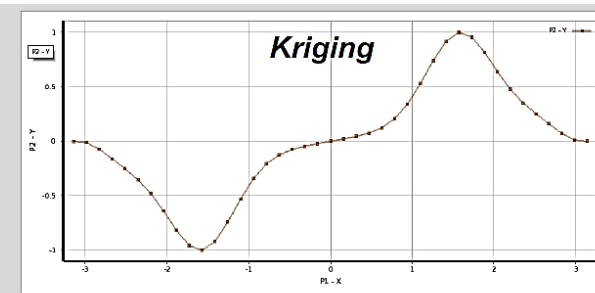
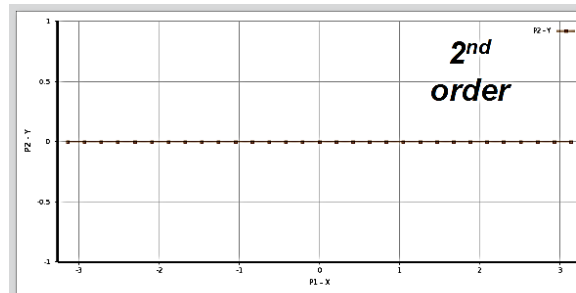
W pakiecie GDO dostępne są następujące typy dopasowania:

1. Standard Response Surface (wielomian 2st.) - domyślna
2. Kriging
3. Non-parametric Regression
4. Neural Network
5. Sparse Grid

## Odpowiedzi

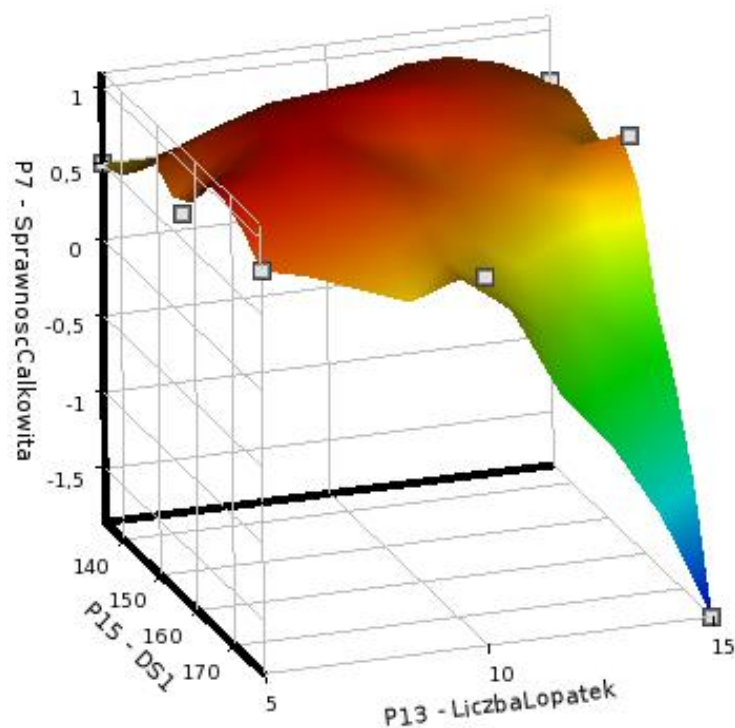


Próbki

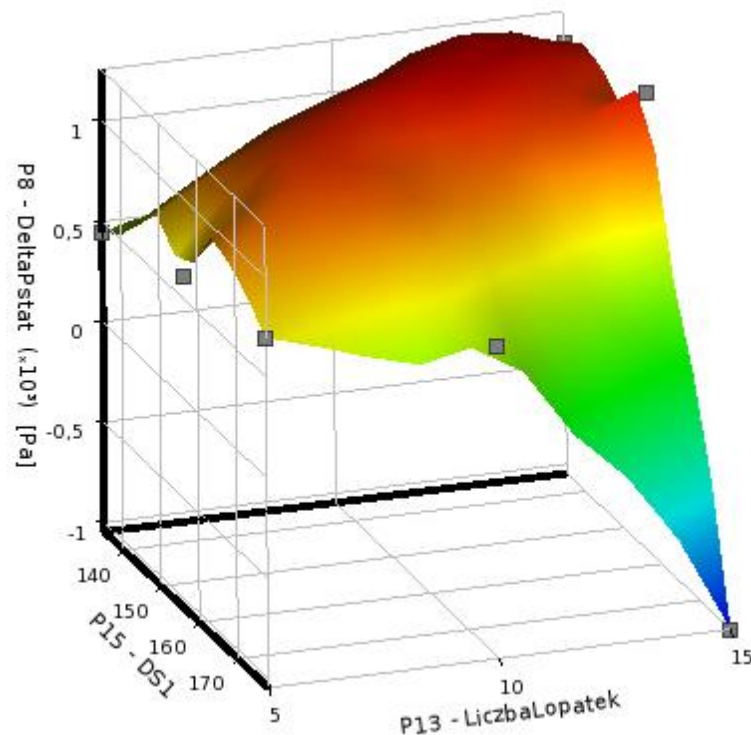


# POWIERZCHNIA ODPOWIEDZI – Optymalizacja wirnika

a)



b)



Płaszczyzna odpowiedzi wygenerowana dla prezentowanego przykładu optymalizacji parametrów pracy wirnika wentylatora promieniowego, a) sprawność, b) przyrost ciśnienia statycznego

# TYPOWANIE OPTYMALNEGO ROZWIĄZANIA

W ramach GDO dostępne jest 6 metod typowania optymalnego rozwiązania:

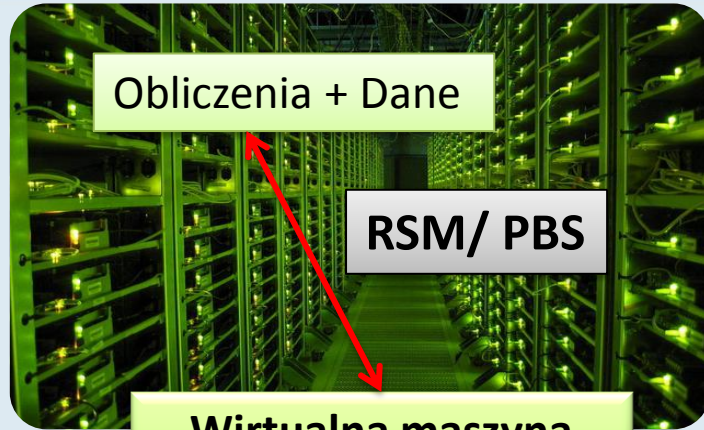
1. Screening (Shifted Hammersley) – domyślna,
2. MOGA (Multi-Objective Genetic Algorithm),
3. NLPQL (Non-linear Programming by Quadratic Lagrangian),
4. MISQP (Mixed-Integer Sequential Quadratic Programming Method),
5. Adaptive Single-Objective,
6. Adaptive Multiple-Objective.

Input Parameters		
Name	Lower Bound	Upper Bound
P13 - LiczbaLopatek	5	15
P15 - DS1	135	178

Candidate Points			
	Candidate Point 1	Candidate Point 2	Candidate Point 3
P13 - LiczbaLopatek	7,545	7,705	8,265
P15 - DS1	156,35	153,92	151,57
P7 - SprawnoscCalkowita	★★★ 1,1034	★★★ 1,1027	★★★ 1,0966

## PODSUMOWANIE

- Zbudowano i zweryfikowano model numeryczny do badań i optymalizacji wysokosprawnych wentylatorów promieniowych,
- Dla potrzeb badania wentylatorów promieniowych można zaadoptować nowoczesne metody modelowania CFD,
- Modelowanie z wykorzystaniem technik CFD skraca czas kreowania produktu i znacznie obniża koszty fazy wdrożeniowej,
- Podczas optymalizacji na jakość rozwiązania wpływa nie tylko model CFD, ale także dobór odpowiedniego planu eksperymentu i płaszczyzny odpowiedzi.



Obliczenia + Dane

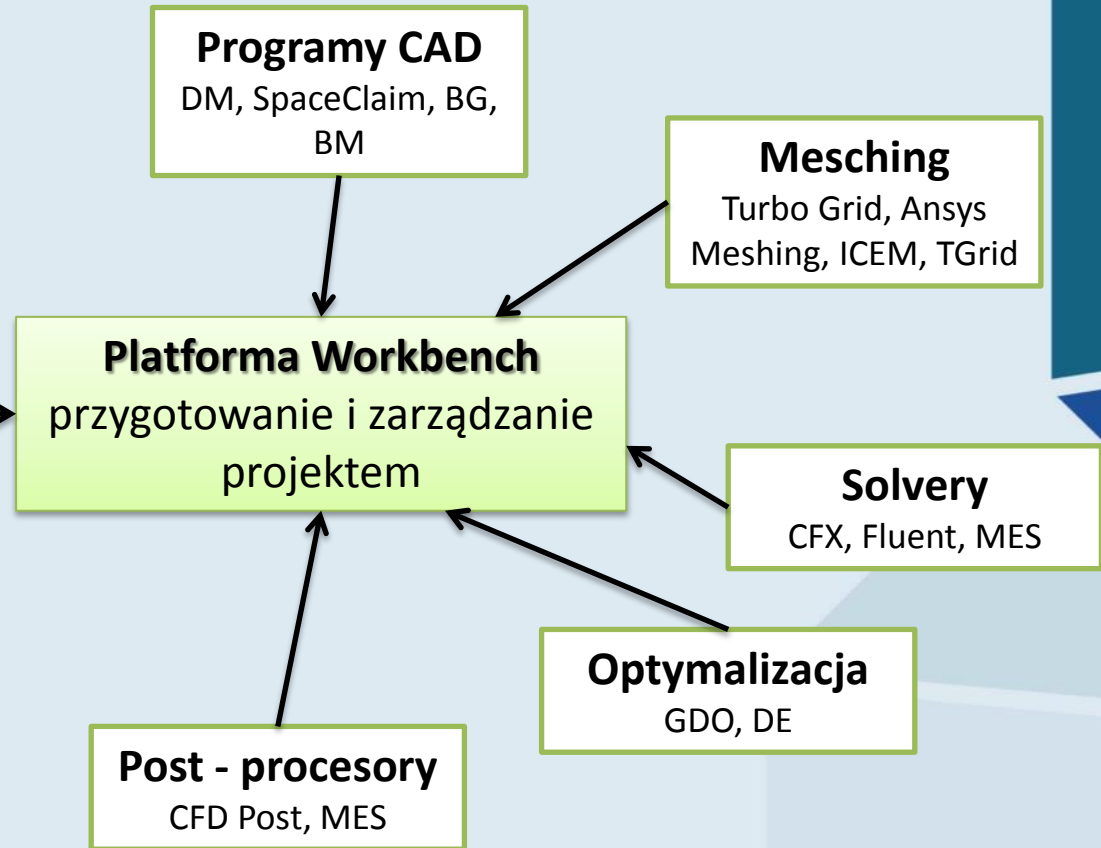
RSM/ PBS

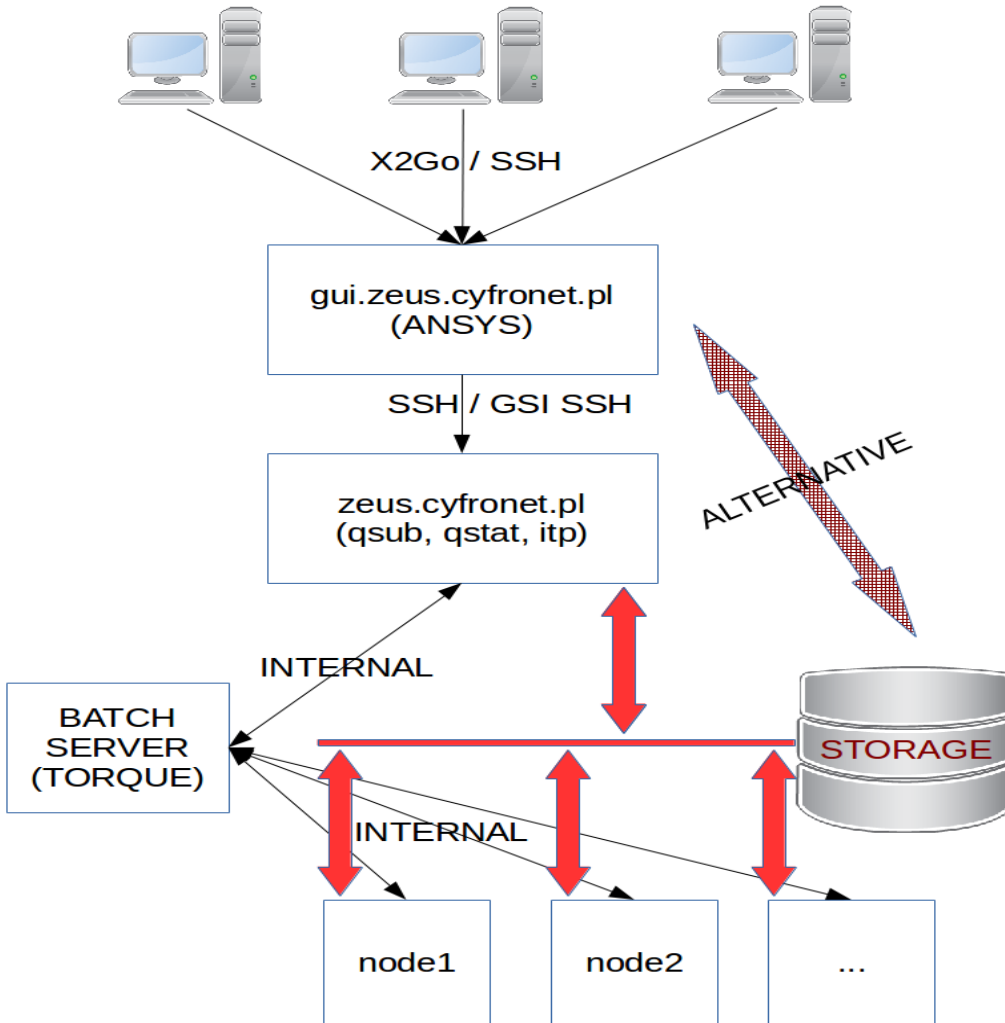
Wirtualna maszyna  
Pre/Post processing

RGS



UŻYTKOWNIK





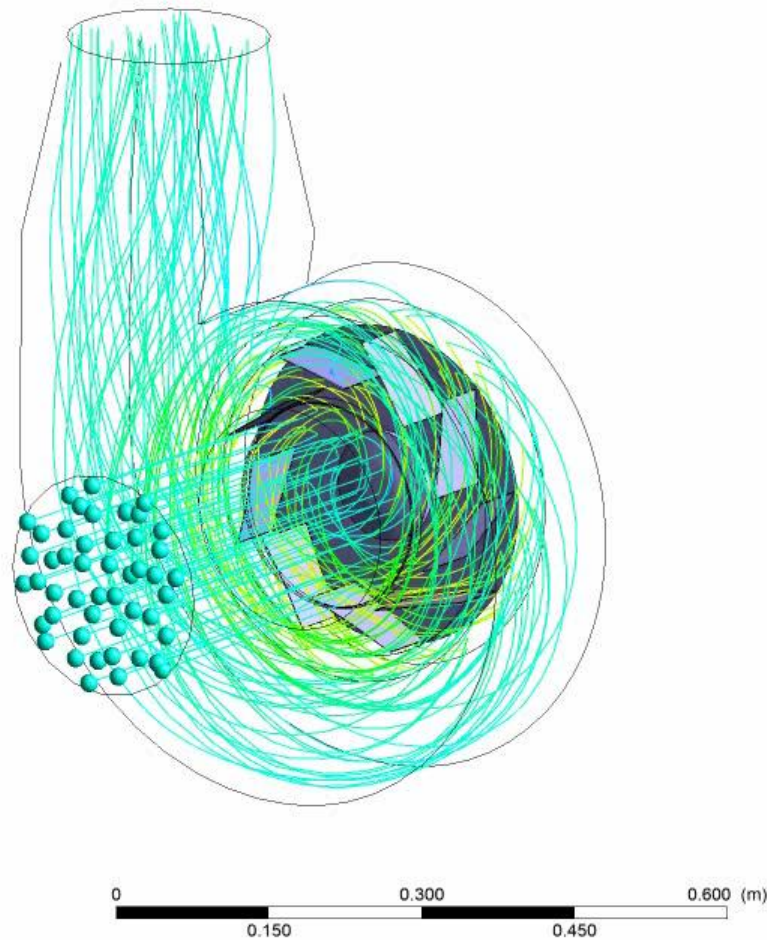
Więcej informacji:

<http://www.plgrid.pl>

<https://docs.cyfronet.pl>

[Podręcznik do usługi RoMa](#)

# *Dziękuję za uwagę !*



Tomasz Siwek  
siwek@agh.edu.pl

