

Konferencja: IV Bałtyckie Forum Biogazu

**UKŁAD GAZOWO/PAROWY ORC
DLA BIOGAZOWNI ROLNICZEJ**



**Piotr Lampart, Sebastian Bykuć
Instytut Maszyn Przepływowych PAN**

Gdańsk, 11-12 września 2014

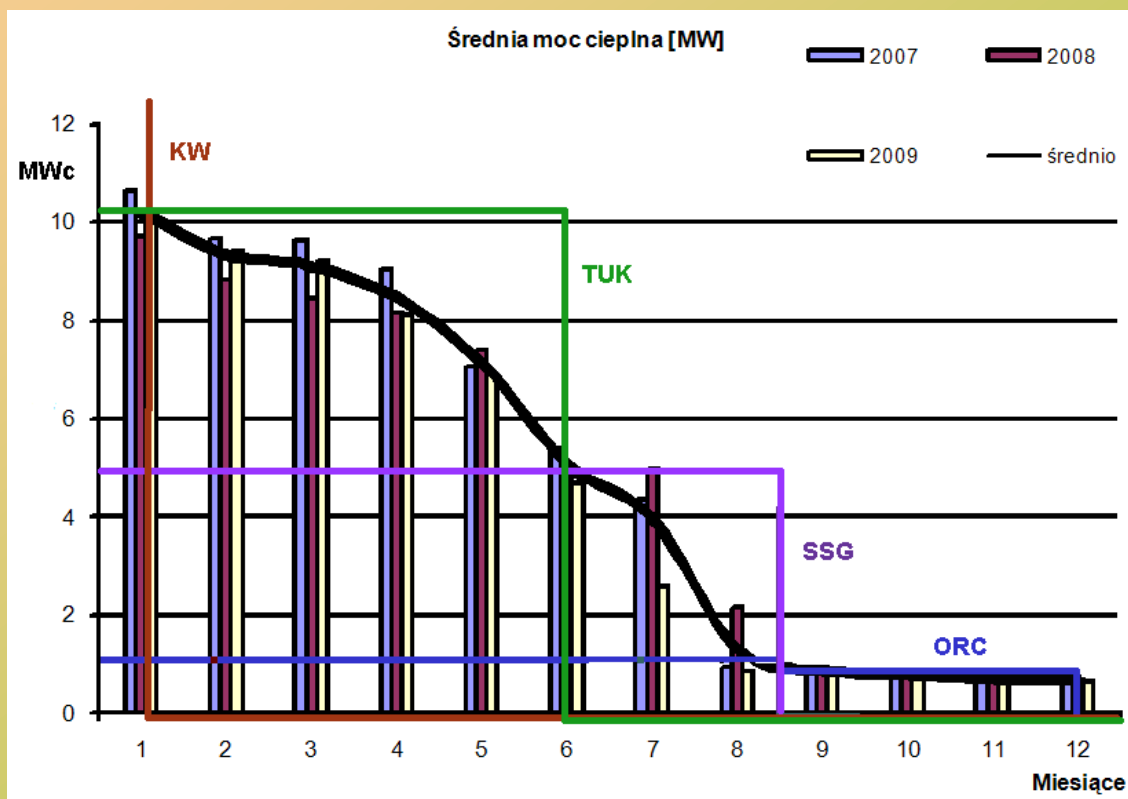
Biogazownia na rośliny energetyczne i odpady z hodowli



Kogeneracja rozproszona, tj. jednoczesne wytwarzanie energii cieplnej i elektrycznej w małej i średniej skali, w oparciu o odnawialne źródła energii, zwłaszcza biomasę, biogaz.



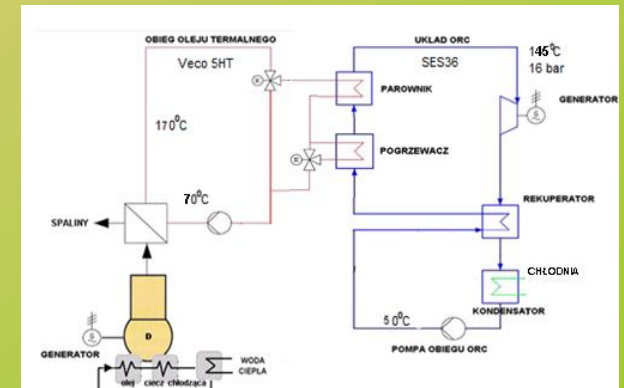
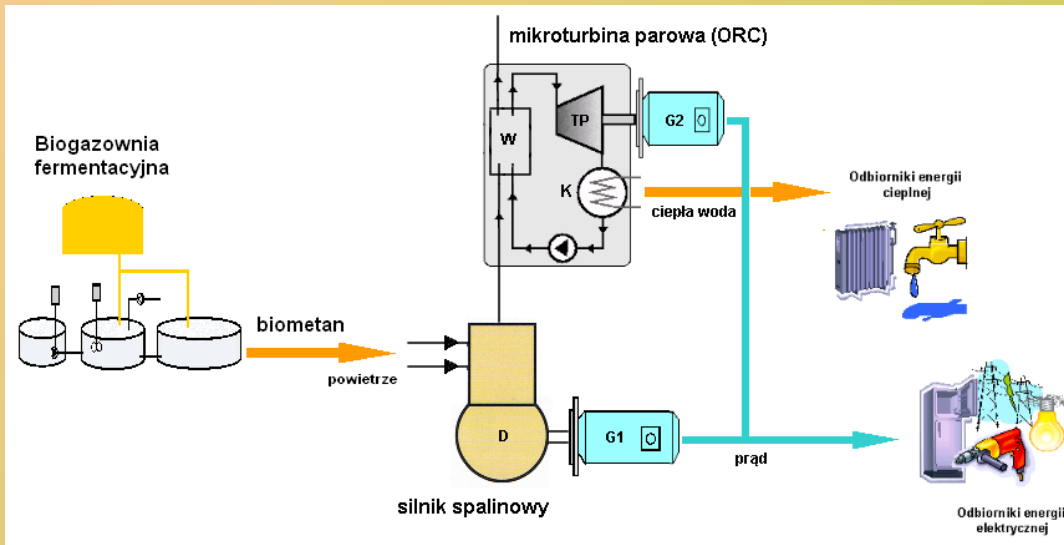
- ⇒ **Wysokosprawna kogeneracja energii elektrycznej i ciepła jest uwarunkowana realnym zapotrzebowaniem na ciepło.**



Ciepłownia Żychlin

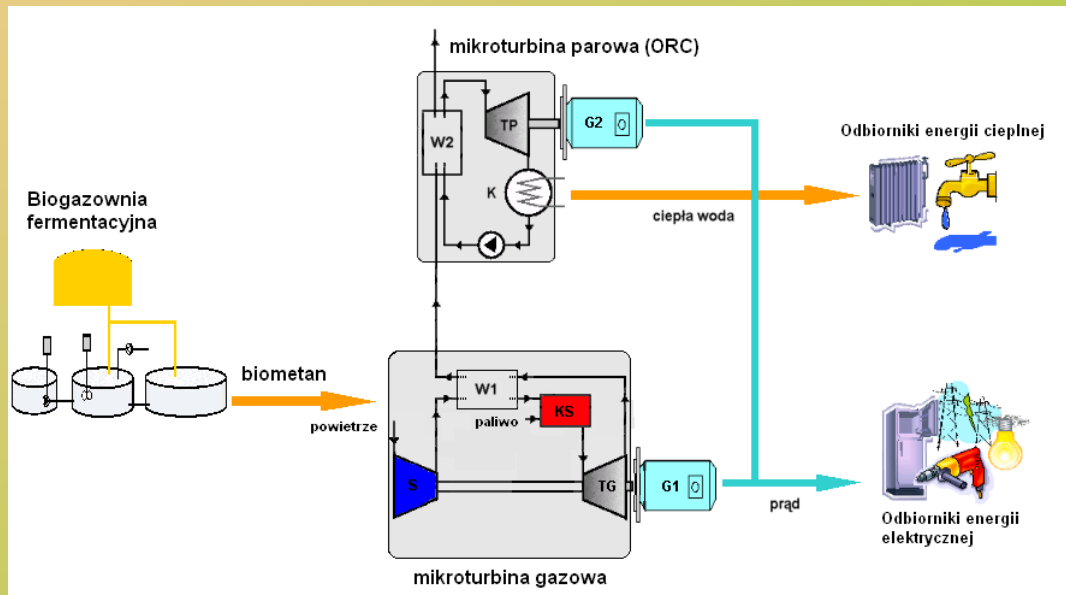
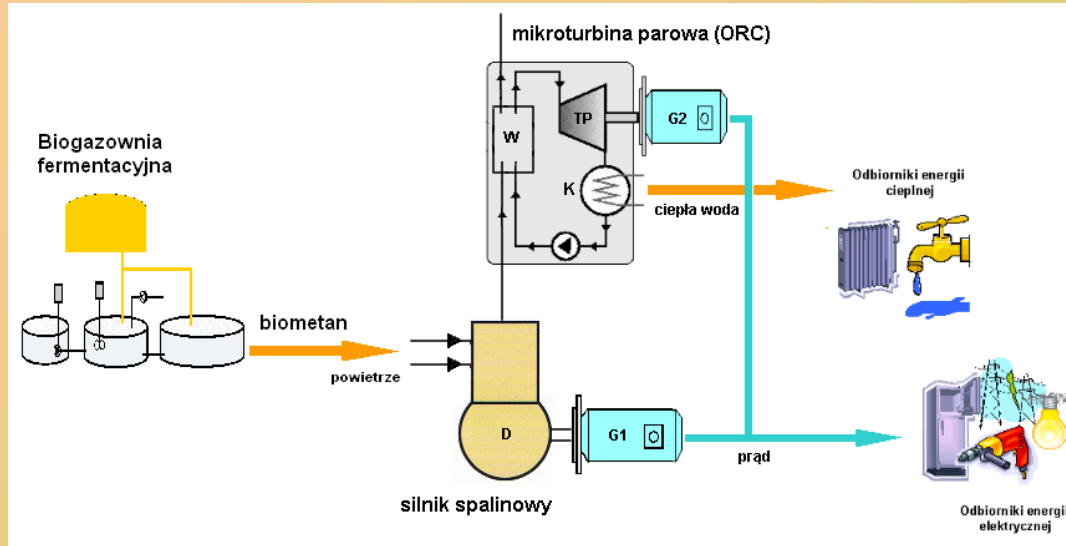
Nadbudowa układu podstawowego generacji energii elektrycznej w biogazowni układem ORC i wykorzystanie dostępnego ciepła odpadowego

W IMP PAN powstaje kontenerowy kogeneracyjny układ gazowo/parowy, którego podstawową jednostką jest silnik spalinowy gazowy. Drugim układem generacyjnym jest układ parowy ORC. Poprzez termoolejowy kocioł odzysknicowy układ ORC wykorzystuje ciepło spalin z silnika. Z kolei ciepło z układu chłodzenia silnika wykorzystywane jest na potrzeby ciepłownicze.

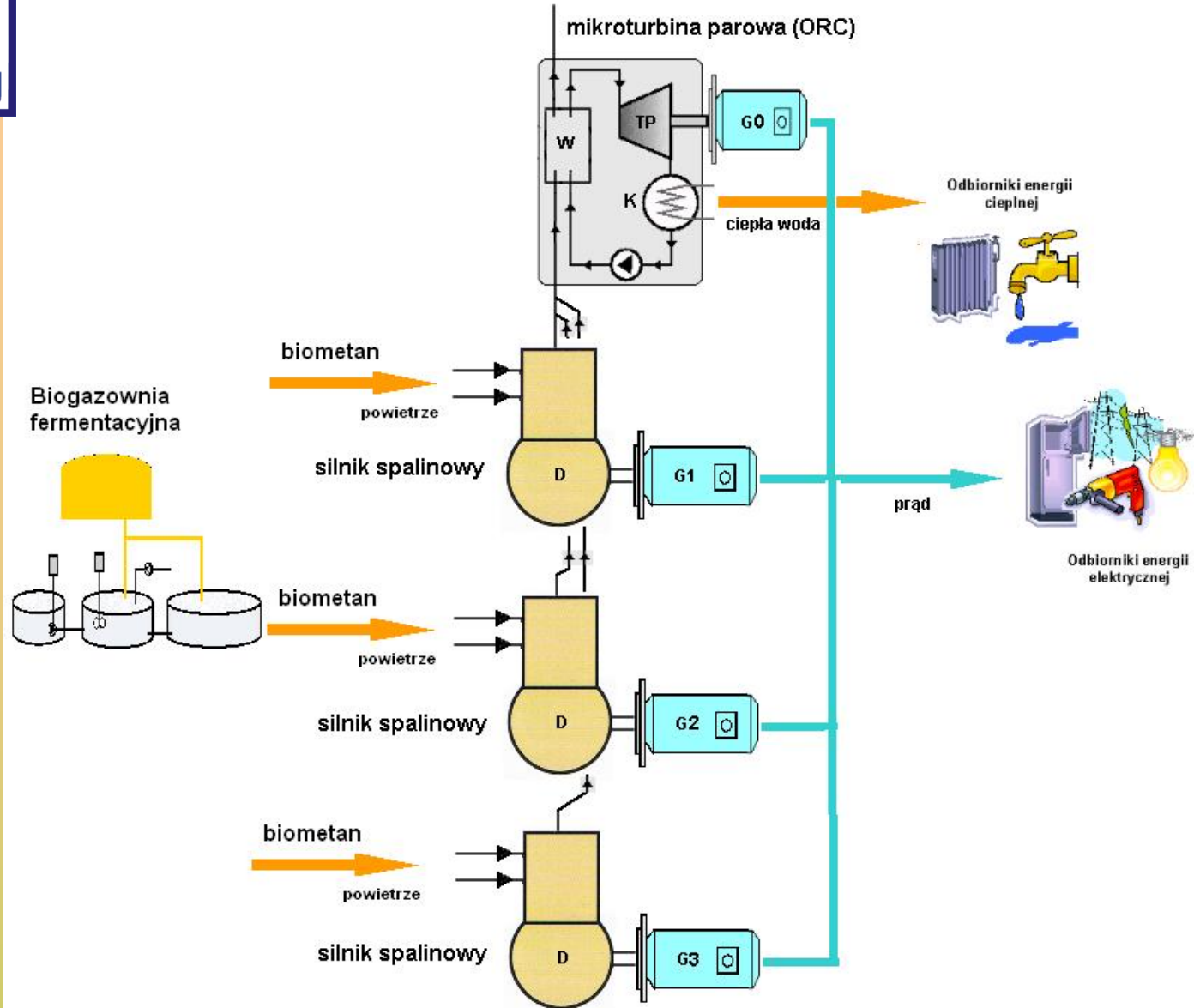


Czynnikiem pośrednim transportującym ciepło spalin do układu ORC jest olej termalny wysokotemperaturowy Veco 5HT. Czynnikiem roboczym w instalacji ORC jest SES36. Budowany układ parowo/gazowy posiada wysoką sprawność produkcji energii elektrycznej na poziomie ok. 50% oraz wysoką sprawność kogeneracyjną na poziomie ok. 70%.

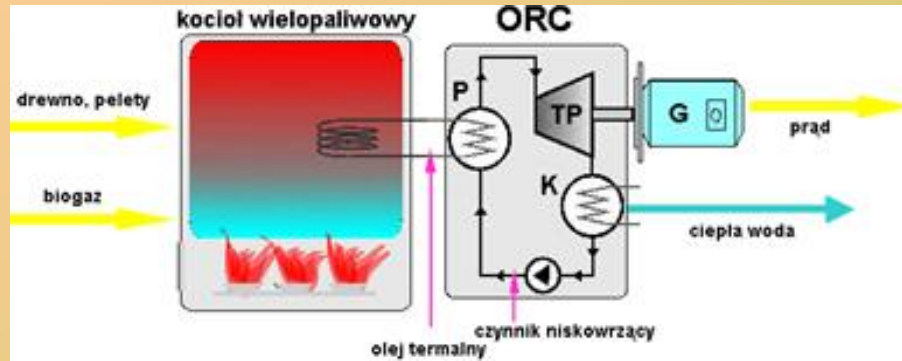
Nadbudowa silnika spalinowego tłokowego / turbiny gazowej



Nadbudowa grupy silników spalinowych

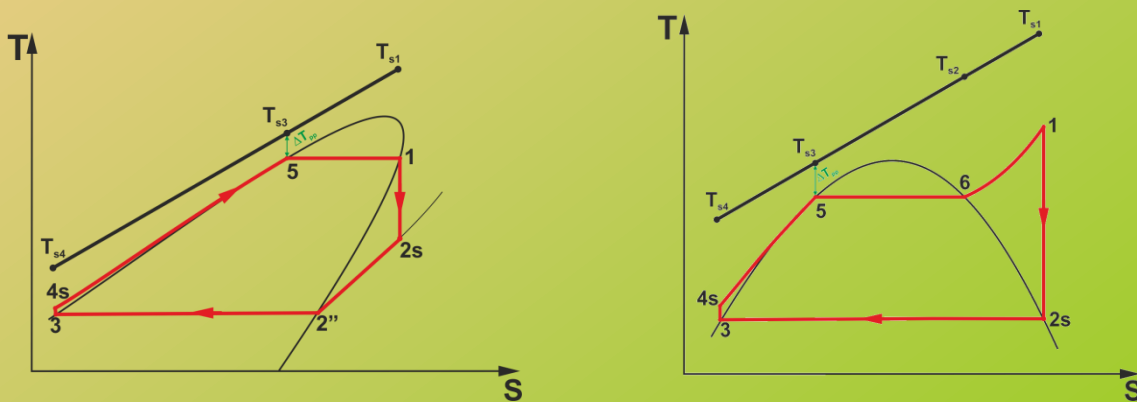


ORC (ORGANIC RANKINE CYCLE)



Schemat siłowni ORC

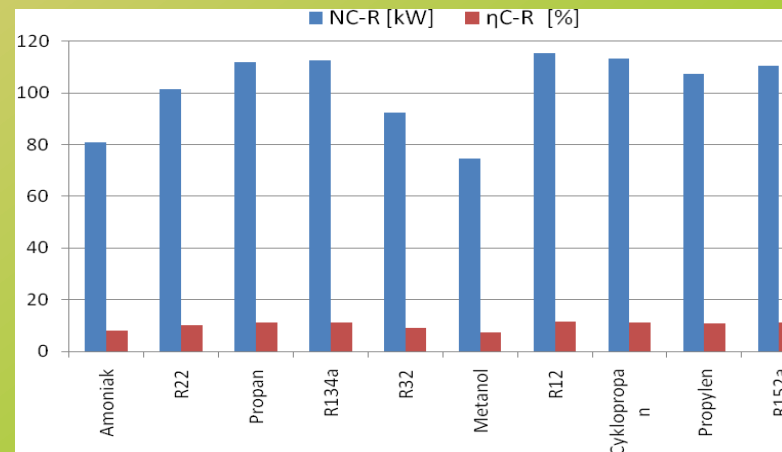
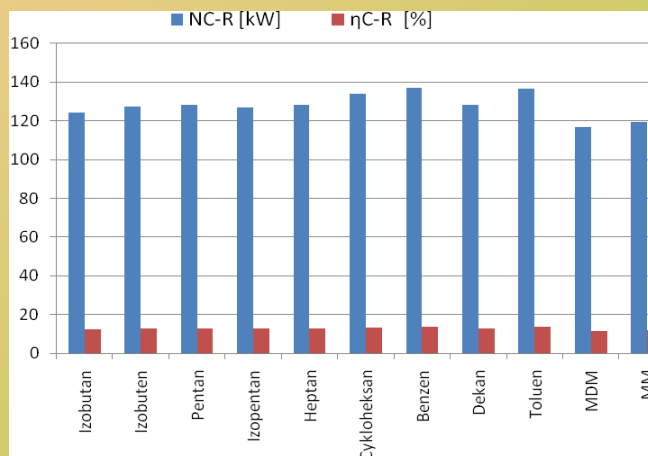
- ⇒ Podstawowy układ generacji mocy;
Wykorzystanie ciepła wysoko i niskotemperaturowego
- ⇒ Nadbudowa układu podstawowego;
Wykorzystanie ciepła odpadowego



Podkrytyczny obieg ORC z czynnikiem suchym i mokrym

CZYNNIKI ROBOCZE UKŁADU ORC

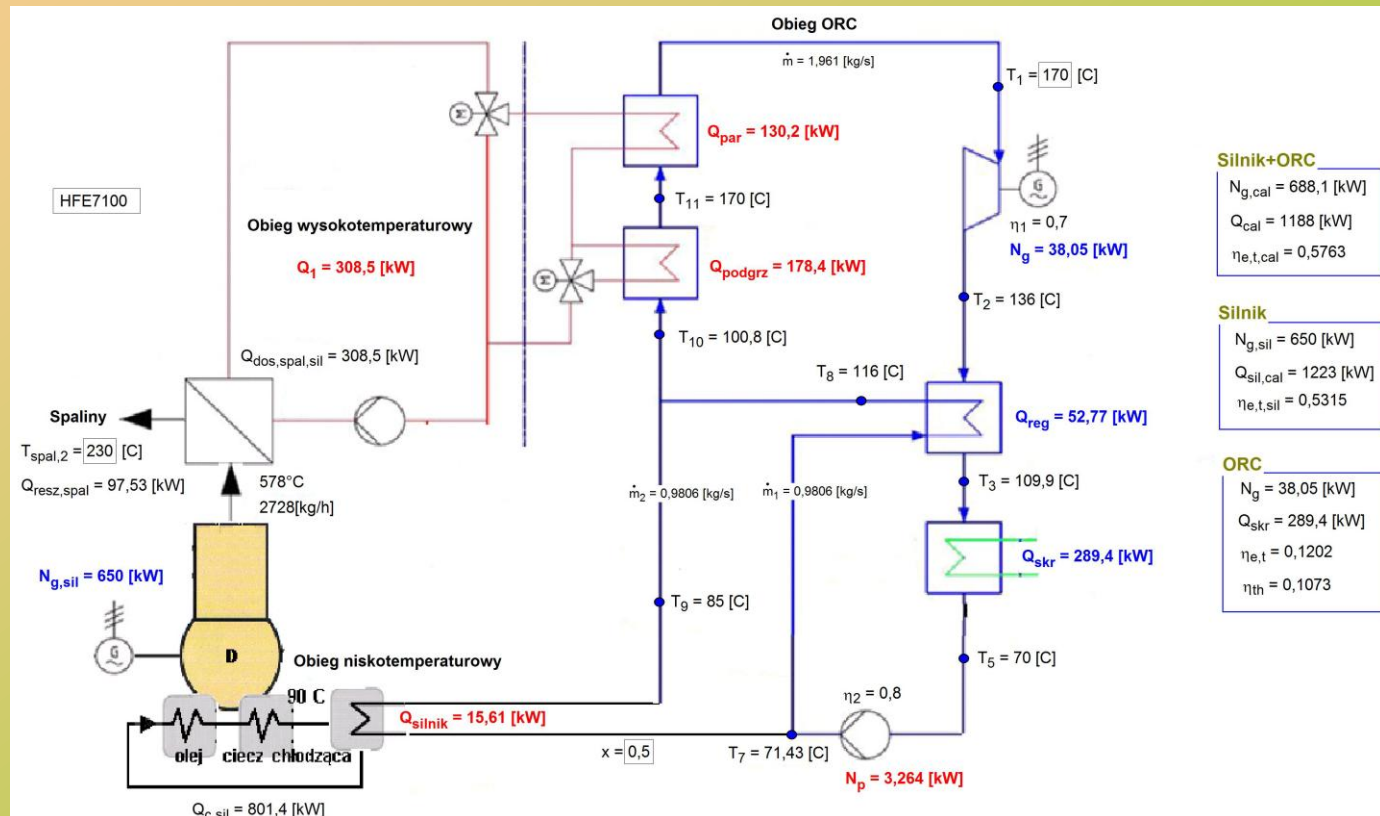
- ⇒ Czynniki powinny być tani, łatwo dostępny, łatwy w transporcie
- ⇒ Nietoksyczny; wskazane, aby posiadał woń
- ⇒ Czynniki powinny wykazywać stabilność chemiczną w pełnym zakresie temperatur pracy
- ⇒ Niekorodujący i kompatybilny z elementami konstrukcyjnym
- ⇒ Czynniki powinny mieć wysoką wartość współczynnika przejmowania ciepła
- ⇒ Lepkość powinna być mała, aby nie powodować dodatkowych spadków ciśnienia w układzie
- ⇒ Temperatura punktu potrójnego czynnika powinna być odpowiednio mniejsza do spodziewanej minimalnej temperatury w obiegu natomiast temperatura krytyczna powinna być odpowiednio wyższa do najwyższej temperatury czynnika w obiegu (przy założeniu, że rozważany jest obieg podkrytyczny)
- ⇒ Jest wskazane, aby czynniki były pozbawione wybuchowości, były niepalne, o zerowej wartości ODP i niskiej wartości GWP, zaś instalacja pracująca z tym czynnikiem powinna charakteryzować się jak najniższą wartością wskaźnika TEWI (czyli urządzenie pracujące z tym czynnikiem powinna cechować wysoka efektywność energetyczna)



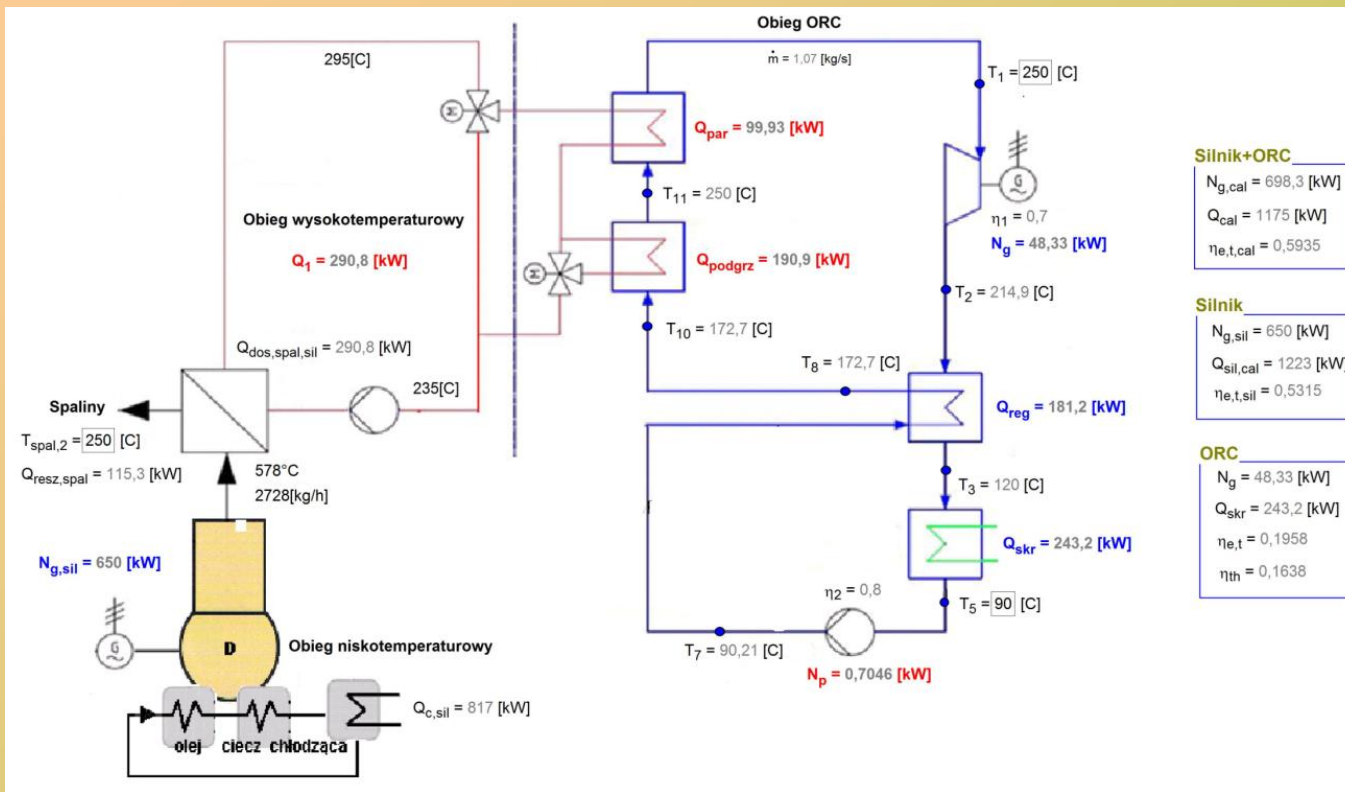
Sprawności i moc siłowni ORC z naturalnymi czynnikami suchymi i mokrymi (temperatura pary na wlocie do turbiny $T_1=90^\circ\text{C}$, $Q=1\text{ MW}$) – A. Borsukiewicz-Gozdur

układ gazowo/parowy w IMPPAN wariant 1

- Spaliny: temperatura wlot/wylot 480°C/120°C, maksymalna moc cieplna 300 kW,
- Obieg oleju termalnego: pętla temperaturowa 190°C/110°C (parametry maksymalne)
- Obieg czynnika roboczego (SES36): maksymalne ciśnienie, temperatura 16 bar, 150 °C, ciśnienie i temperatura w kondensatorze 1.5 bar, 60°C,
- przepływ maksymalny 1,16 kg/s, moc elektryczna maksymalna 40kW,
- moc cieplna w skraplaczu maksymalna 220kW.

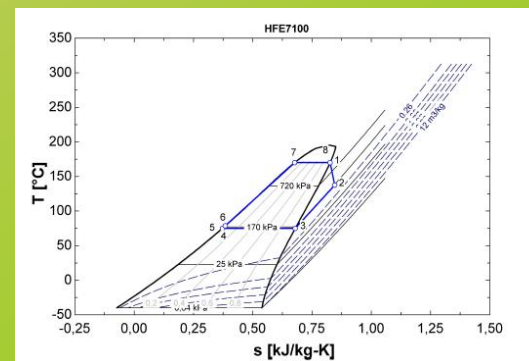


układ gazowo/parowy w IMPPAN wariant 2



Zestawienie mocy dla analizowanych wariantów

	Wariant I	Wariant II	Wariant III
Moc elektryczna	698 kW	693 kW	688 kW
Moc cieplna użytkowa	1175 kW	1184 kW	1188 kW
Wskaźnik kogeneracji	0,594	0,585	0,579
Wskaźnik nadwyżki mocy elektrycznej	1,074	1,066	1,058



Sprawność układu ORC – 17%



Nominalne parametry pracy

- Moc elektryczna netto: **32 kW**
- Moc elektryczna brutto : **40 kW**
- Sprawność elektryczna netto: **≥13%**
- Sprawność całkowita **≥ 95%**
- Źródło ciepła
 - Medium: **olej termalny, Veco 5HT**
 - Moc cieplna: **315 kWt**
 - temperatury dolot/wylot: **170°C/110°C**
- Źródło chłodu
 - **40% glikol**
 - Moc chłodnicza wymagana: **265 kWt**
 - temperatury dolot/wylot: **35°C/55°C**

SSG

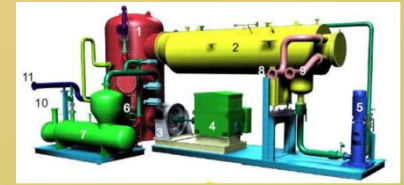


- silnik 12 cylindrowy na gazie ziemnym ma 420kW.
- wymiennik spalin 110/70.
- moc elektryczna max 420kW.
- moc cieplna ze spalin 288kW .
- moc cieplna z bloku silnika, z oleju - 236kW
- Sprawność przy gazie ziemnym - 40% el , 49% term

STAN REALIZACJI:

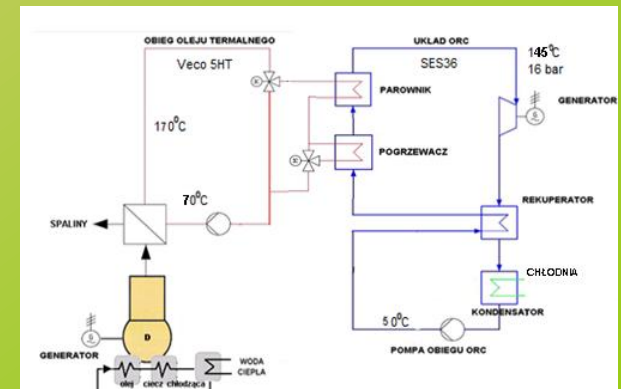
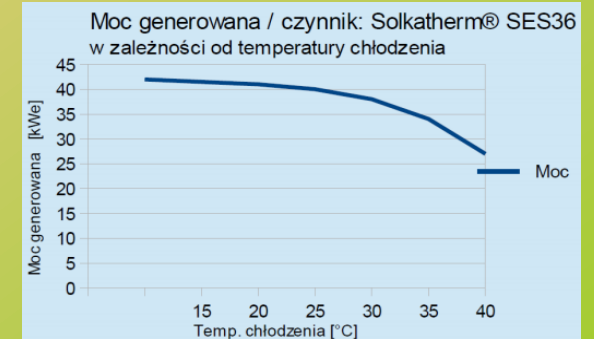
- Uzyskano pozwolenia budowlane
- Wykonano fundamenty pod kontenery
- Zainstalowano chłodnię wentylatorową
- Zainstalowano silnik spalinowy i kocioł odzysknicowy
- Roztrzygnięto przetarg na dostawę ORC
- Opracowano projekt układu przepływogoturbiny ORC

ORC



Ekspander

- silnik pneumatyczny z wirującymi tłokami, w kapsule hermetycznej
- obroty: **3'000 rpm**
- łożyska: kulkowe z membraną ciśnieniową, smarowane wtryskiem oleju w obszarze czynnika roboczego



Obieg ORC z turbiną



Dane techniczne agregatu kogeneracyjnego:

- Silnik gazowy 12 cylindrowy, turbodoładowany, dwustopniowe chłodzenie mieszanki.
- Wersja silnika **MAN E2842**
- Moc elektryczna **380 kWe**
- Maksymalna moc cieplna **458 kWt**
- Układ zapłonowy, elektroniczny, wysokoenergetyczny, bezrozdzielaczowy, z regulacją kąta wyprzedzenia zapłonu,
- Automatyczny, elektroniczny regulator prędkości obrotowej silnika,
- Ścieżka gazowa kompletna, z elektrozapłonem,
- Zużycie gazu około **0,25 m³/kWh energii elektrycznej (gaz GZ50)**
- Akumulatory rozruchowe **24V**,
- Prostownik do automatycznego ładowania akumulatorów.
- Prądnicza synchroniczna **MeccAlte, 500kVA, 400V, 50Hz, cos φ 0,8, 1500obr/min.**
- Szafa sterownicza umożliwiająca nadzór oraz automatyczną pracę równoległą z siecią energetyki zawodowej lub z innym zespołem.
- Amortyzatory antywibracyjne.
- Chłodnica awaryjna montowana na dachu kontenera.
- Wymiary całkowite wersji kontenerowej: długość 6060mm, szerokość 2440mm, wysokość 2600mm (dodatkowo chłodnica z wentylatorami +1360mm wysokości).





Agregat kogeneracyjny w zabudowie kontenerowej



Wyposażenie pulpitu szafy sterowniczej:

- wyświetlacz graficzny sterownika głównego,
- przełącznik rodzaju pracy AUTO/MANUAL,
- przycisk awaryjnego zatrzymania,
- wyłącznik główny.
- wykonanie dodatkowych przyłączy odbioru energii elektrycznej (trzy gniazda 400V/32A, jedno gniazdo 400V/16A oraz cztery gniazda 230V/16A)





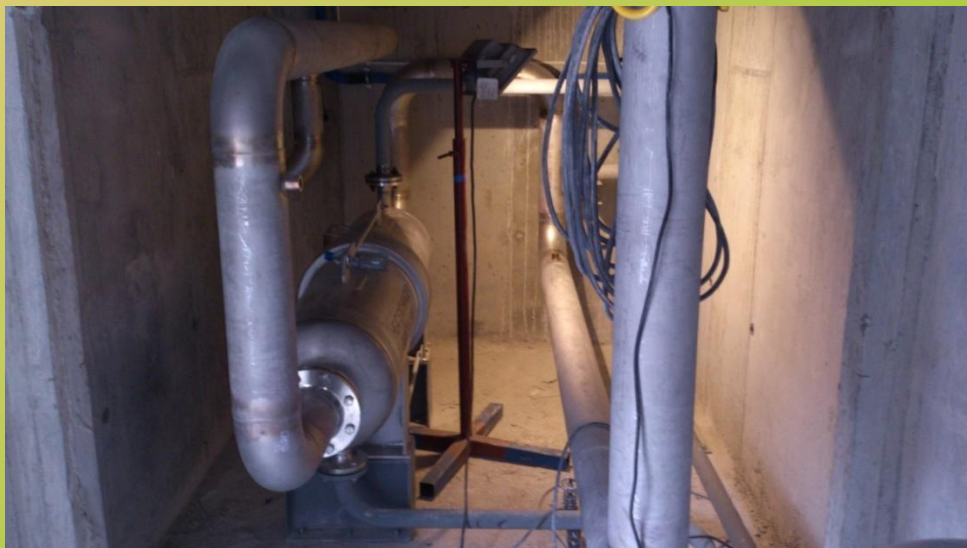
System odzysku ciepła.

Podstawowe elementy modułu odzysku ciepła:

- Wymiennik woda-woda do odzysku ciepła z silnika;
- Wymienniki spaliny-woda (olej termalny) do odzysku ciepła ze spalin wylotowych silnika;
- Chłodnica oleju.
- Dwustopniowa chłodnica mieszanki paliwowo-powietrznej.
- Możliwość rozdzielenia odzysku ciepła osobno z wymiennika spalin i wymienników wodnych.



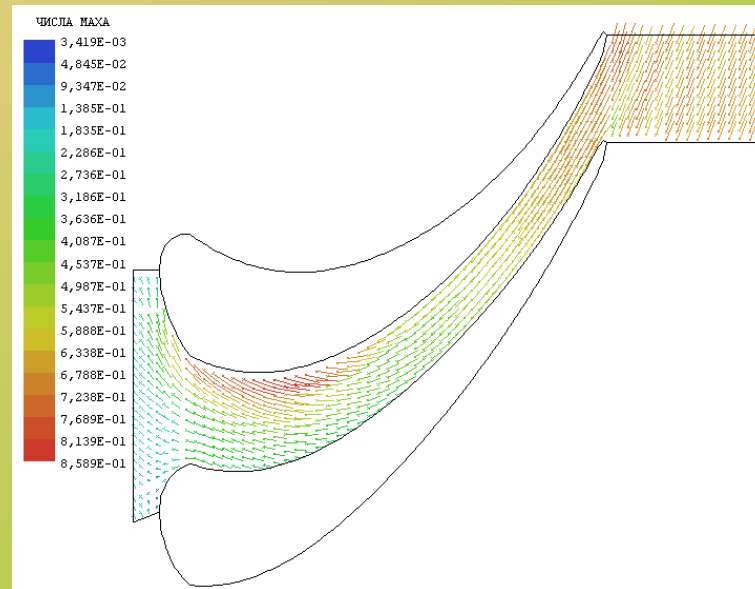
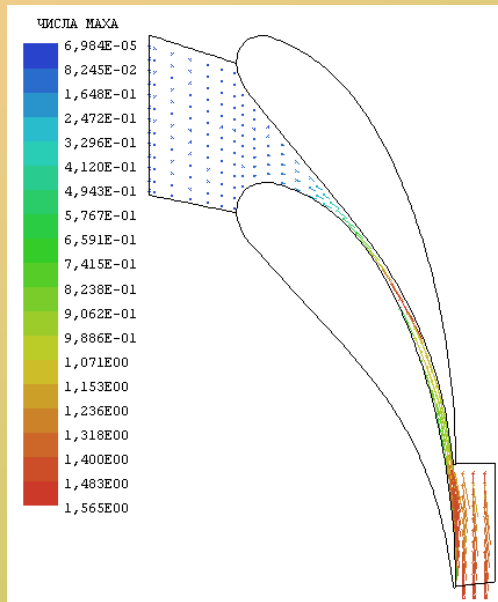
Wymiennik woda-woda



Wymiennik odzysku ciepła spalin 250 kWt

Turbina promieniowo-osiowa 40 kW Projekt układu przepływowego

- wydatek masowy (SES36) – 1,162 kg/s,
- spadek ciśnienia z 14.64 do 2.20 bara,
- prędkość obrotowa – 15000 obr/min



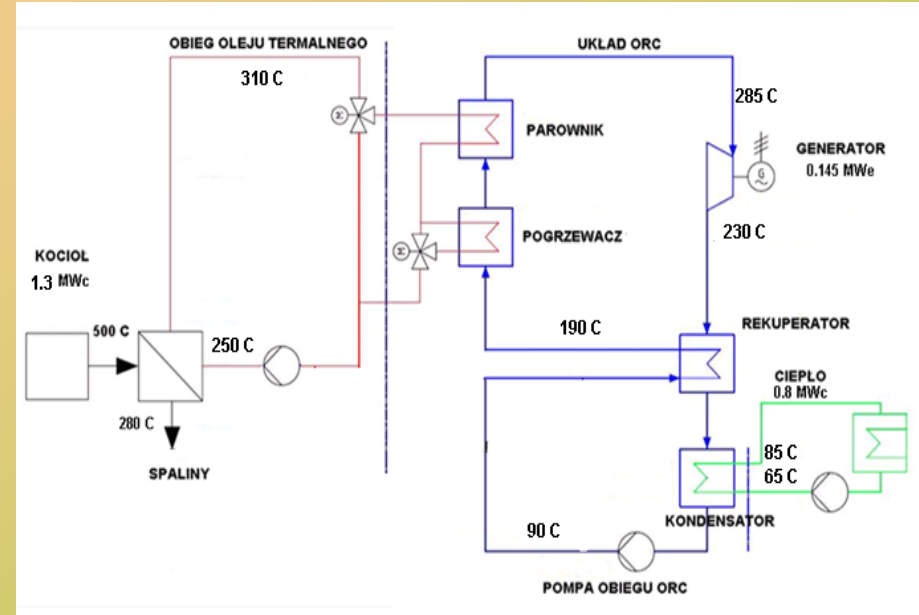
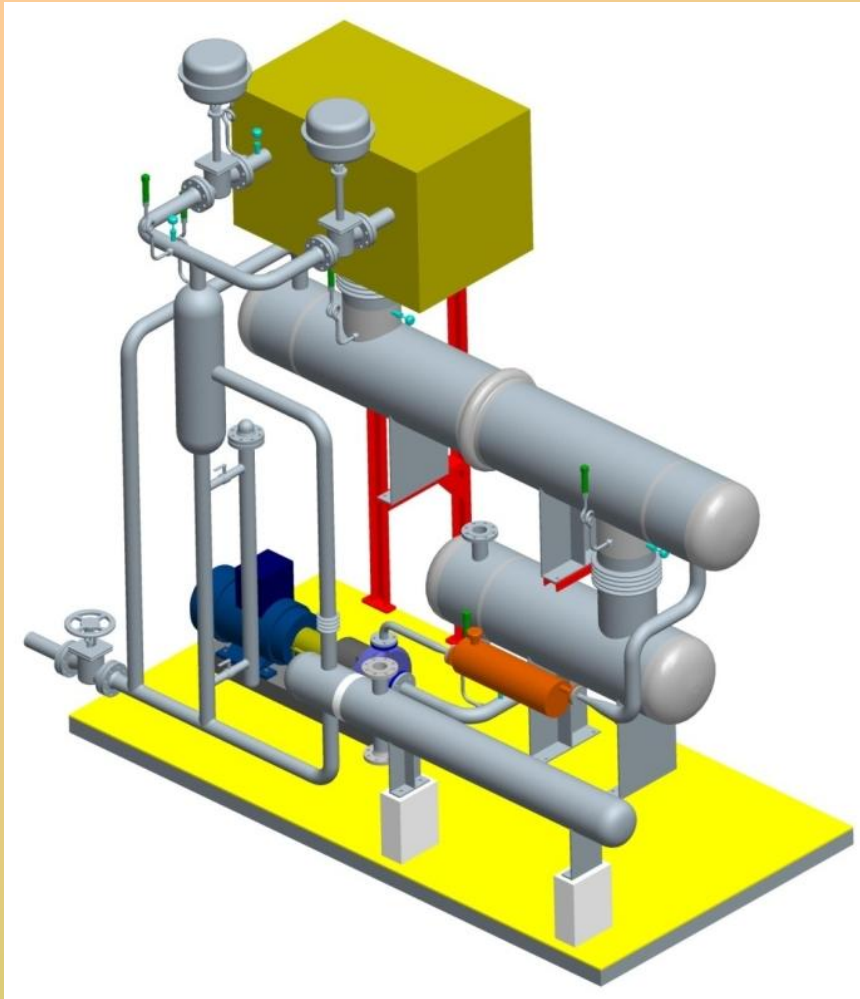
**Geometria turbiny oraz wektory pola prędkości
w kierownicy i wirniku w połowie szerokości kanału.**



PODSUMOWANIE

- ⇒ **Wysokosprawna kogeneracja energii elektrycznej i ciepła jest uwarunkowana realnym zapotrzebowaniem na ciepło.**
- ⇒ **Nadbudowa układu podstawowego generacji energii elektrycznej w biogazowni układem ORC i wykorzystanie dostępnego ciepła odpadowego pozwala na podniesienie sprawności produkcji energii elektrycznej o kolejne 10%.**

SIŁOWNIA ORC 100 kW w IMP PAN



Obieg oleju termalnego

Therminol66:

-pętla wysokotemperaturowa
310°C/250°C

Obieg czynnika roboczego

(oleju silikonowego MDM)

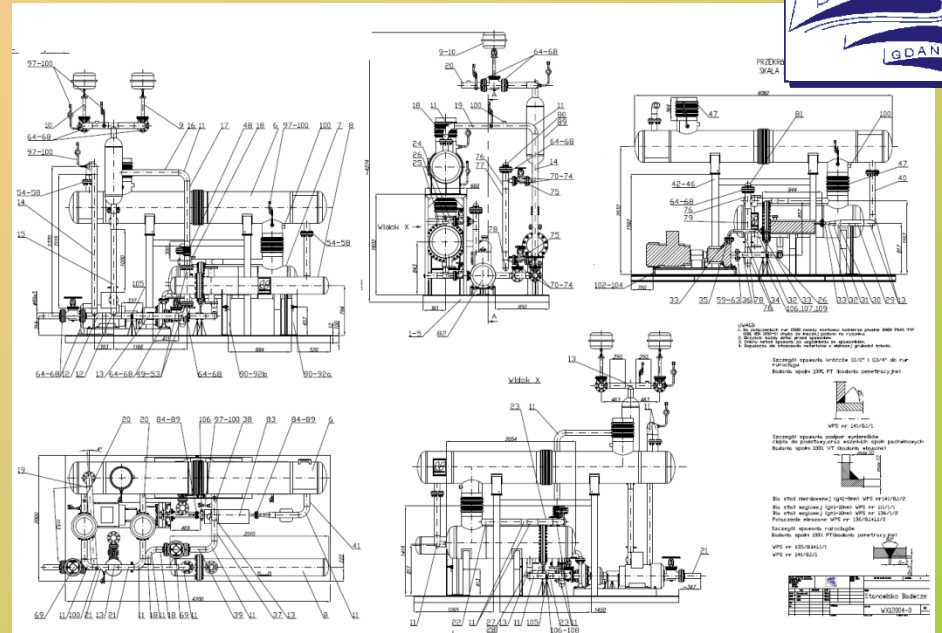
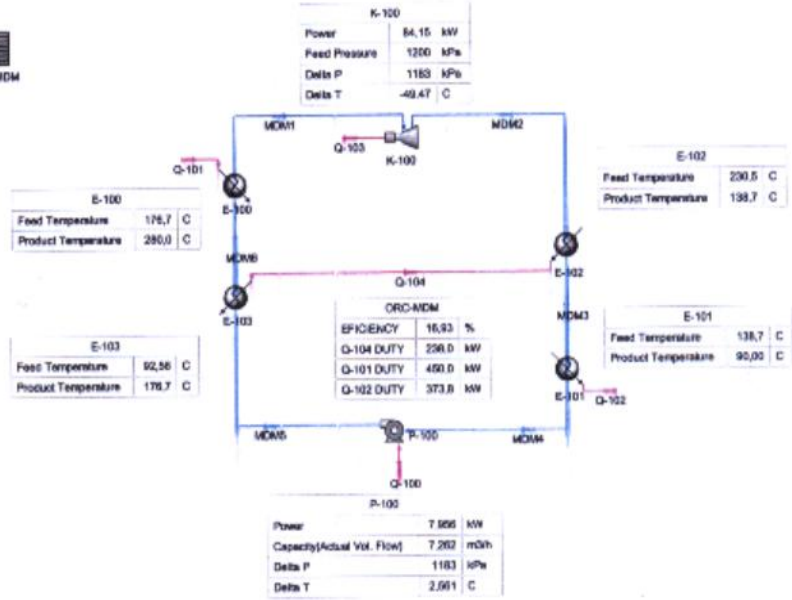
-turbina od 12 bar/285°C
do 0.17 bar/230°C
-rekuperator – para czynnika
230/120°C, ciecz 90/190°C
- podgrzewacz – 190°C/280°C
- parownik - 285°C
- kondensator - 90°C
- woda ciepła - 85°C/65°C,

Model siłowni ORC dla energetyki rozproszonej

SIŁOWNIA ORC w IMP PAN



ORC-MDM



Parametry układu ORC

Dokumentacja układu ORC

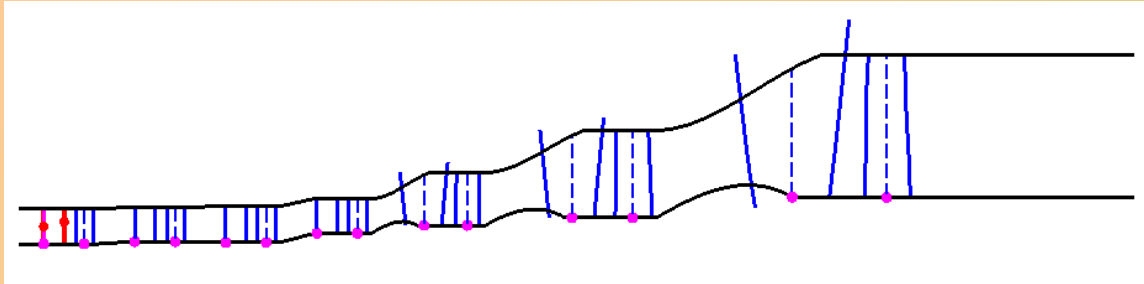


Kocioł podgrzewający olej termalny – źródło ciepła układu ORC

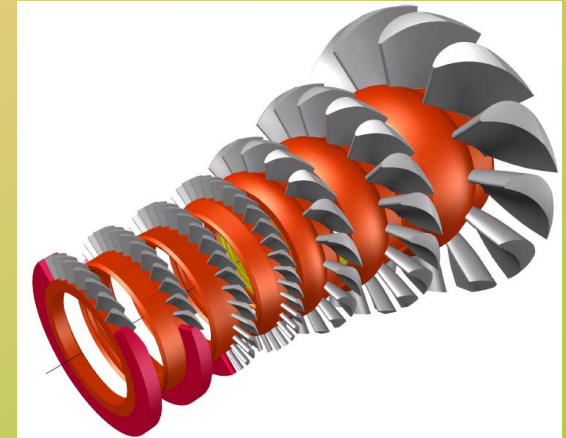


Układ ORC na Hali A

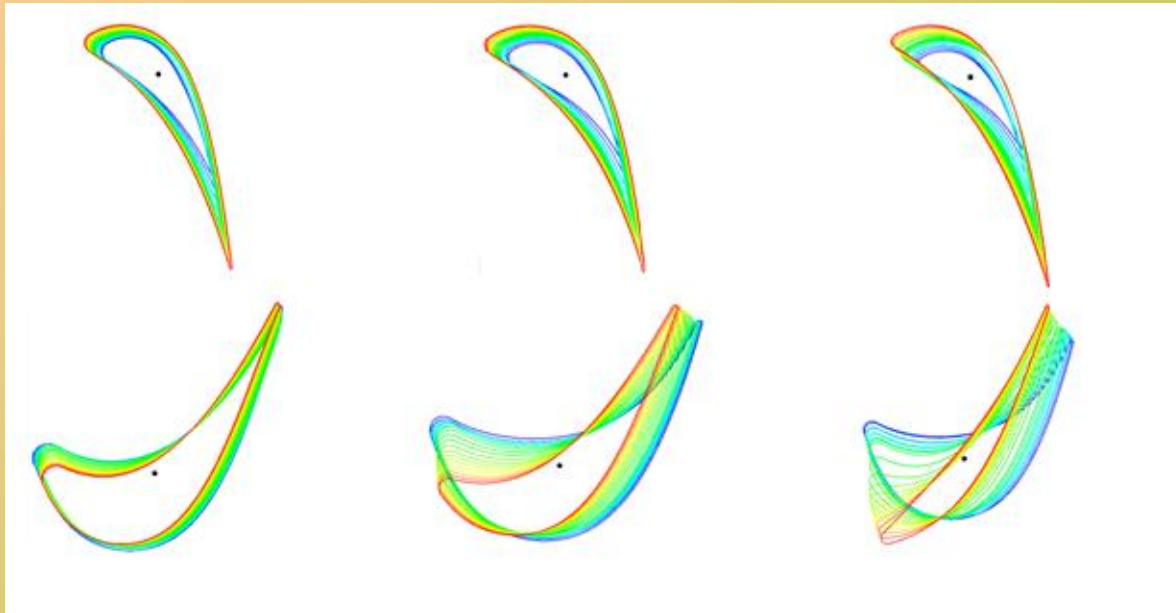
Turbina osiowa ORC 100kW - 9000 obr/min



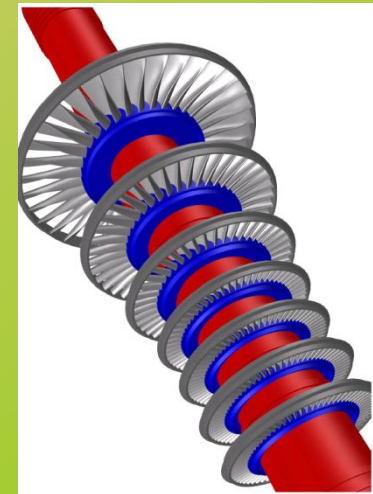
Przekrój merydionalny



Łopatk kierownicze



Profile łopatek kierowniczych i wirnikowych

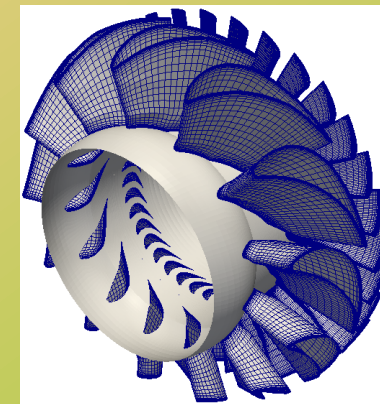


Wieńce wirnikowe

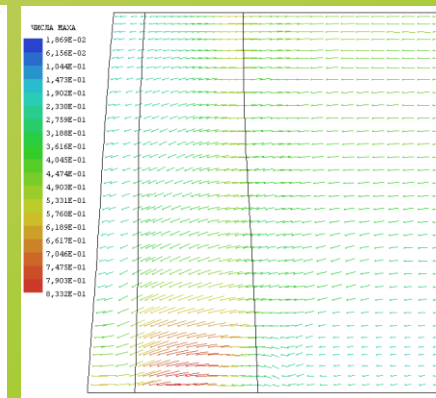
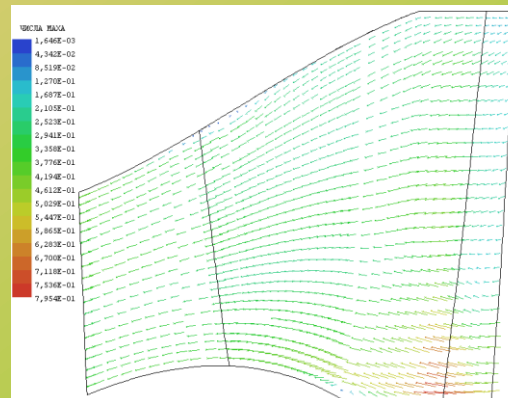
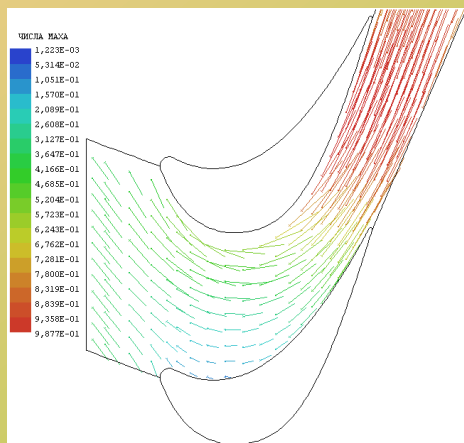
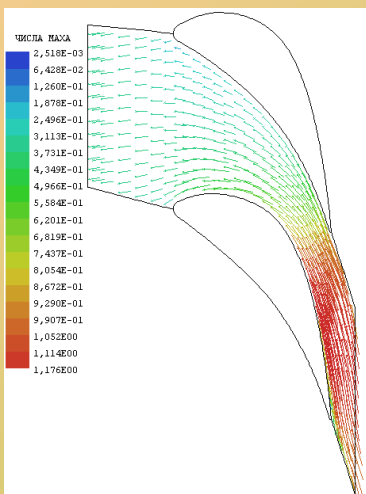
Turbina osiowa (ORC) 9000 obr/min



Stopień	1	2	3	4	5	6	7
Częściowe zasilanie	0,25	0,4	0,75	1	1	1	1
α_0 , deg	0	0	0	0	0	0	0
α_1 , deg	77,72	78	78	77	77	77	77
β_1 , deg	61,64875	64,77799	63,319066	63,56912	63,7599	62,15225	49,8569
β_2 , deg	-65,52	-67,86	-67,86	-67,86	-67,08	-65,52	-66,3
α_2 , deg	15,5785	-3,317	7,18631	-17,691	-13,43267	3,485	7,4917
r_{mid} mm	58	63,61	58,92	62,6	70	80,9	101,68
l , mm	15,283	15,3	15,7958	15,1035	23,08715	38,21	62,0338



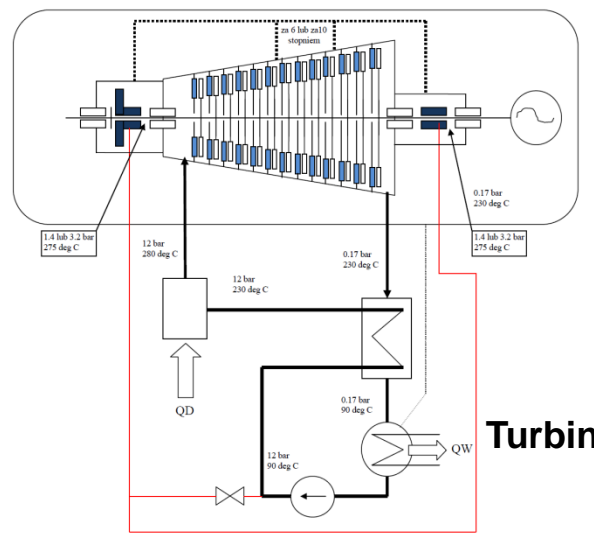
Parametry układu łopatkowego turbiny ORC 9000 obr/min



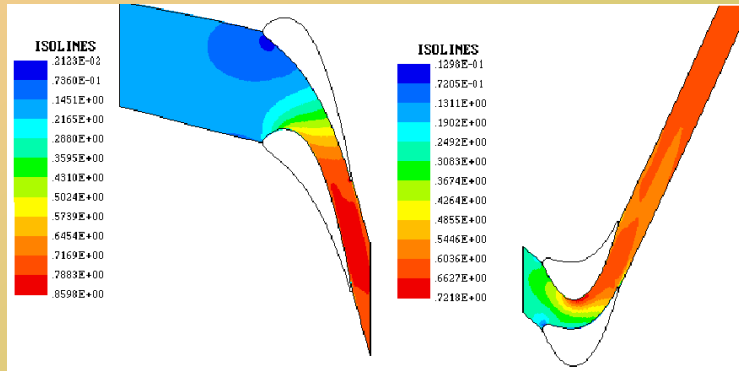
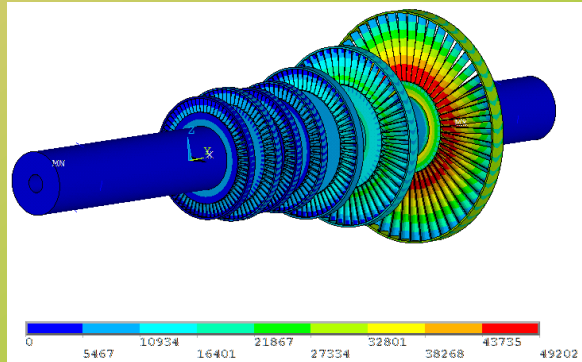
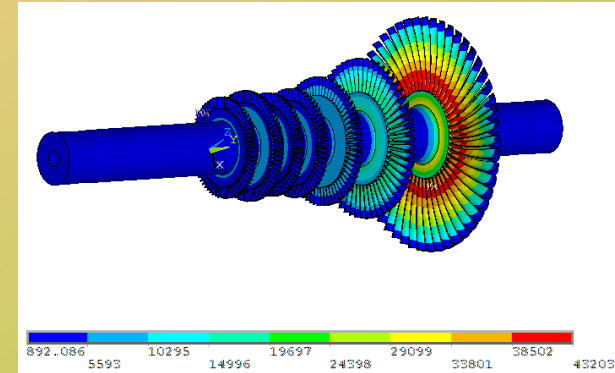
Wektory pola prędkości w stopniu wylotowym
Sprawność przepływowa – 84.2%

TURBOGENERATORY ORC

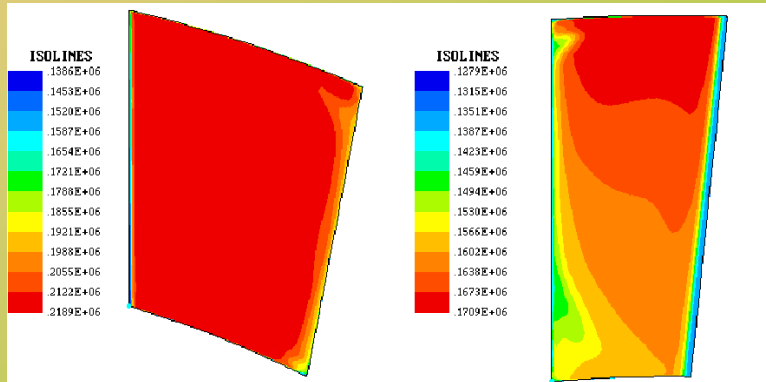
IMP



Turbina osiowa (ORC) 9000 obr/min



Izoliny liczb Macha w stopniu 5



Izoliny ciśnienia całkowitego w stopniu 5

Naprężenia kinetostatyczne w wirniku Wersja bez bandaża i z bandażem

Card code: Object: L38r38w		Date: 14.03.2012																								
Defect description:		File: o3o_2000																								
Variable data:		Rotational speed [rpm]: 2000																								
ABSOLUTE VIBRATIONS OF BEARINGS																										
BEARING no.1	<table border="1"> <tr><td>A_{max}</td><td>0.0 mm</td></tr> <tr><td>A_{min}</td><td>-0.195 rad</td></tr> <tr><td>A_{avg}</td><td>0.0 mm</td></tr> <tr><td>A_y</td><td>0.0 mm</td></tr> <tr><td>V_{max}</td><td>0.00 mm/s</td></tr> <tr><td>V_{avg}</td><td>0.00 mm/s</td></tr> </table>	A _{max}	0.0 mm	A _{min}	-0.195 rad	A _{avg}	0.0 mm	A _y	0.0 mm	V _{max}	0.00 mm/s	V _{avg}	0.00 mm/s	<table border="1"> <tr><td>A_{max}</td><td>5.3 mm</td></tr> <tr><td>A_{min}</td><td>-0.572 rad</td></tr> <tr><td>A_{avg}</td><td>4.9 mm</td></tr> <tr><td>A_y</td><td>3.1 mm</td></tr> <tr><td>A_{ppm}</td><td>3.7 mm</td></tr> <tr><td>A_{ppm}</td><td>10.8 mm</td></tr> </table>	A _{max}	5.3 mm	A _{min}	-0.572 rad	A _{avg}	4.9 mm	A _y	3.1 mm	A _{ppm}	3.7 mm	A _{ppm}	10.8 mm
A _{max}	0.0 mm																									
A _{min}	-0.195 rad																									
A _{avg}	0.0 mm																									
A _y	0.0 mm																									
V _{max}	0.00 mm/s																									
V _{avg}	0.00 mm/s																									
A _{max}	5.3 mm																									
A _{min}	-0.572 rad																									
A _{avg}	4.9 mm																									
A _y	3.1 mm																									
A _{ppm}	3.7 mm																									
A _{ppm}	10.8 mm																									
BEARING no.2	<table border="1"> <tr><td>A_{max}</td><td>0.0 mm</td></tr> <tr><td>A_{min}</td><td>0.932 rad</td></tr> <tr><td>A_{avg}</td><td>0.0 mm</td></tr> <tr><td>A_y</td><td>0.0 mm</td></tr> <tr><td>V_{max}</td><td>0.00 mm/s</td></tr> <tr><td>V_{avg}</td><td>0.00 mm/s</td></tr> </table>	A _{max}	0.0 mm	A _{min}	0.932 rad	A _{avg}	0.0 mm	A _y	0.0 mm	V _{max}	0.00 mm/s	V _{avg}	0.00 mm/s	<table border="1"> <tr><td>A_{max}</td><td>15.4 mm</td></tr> <tr><td>A_{min}</td><td>-0.107 rad</td></tr> <tr><td>A_{avg}</td><td>12.3 mm</td></tr> <tr><td>A_y</td><td>4.9 mm</td></tr> <tr><td>A_{ppm}</td><td>20.5 mm</td></tr> <tr><td>A_{ppm}</td><td>24.4 mm</td></tr> </table>	A _{max}	15.4 mm	A _{min}	-0.107 rad	A _{avg}	12.3 mm	A _y	4.9 mm	A _{ppm}	20.5 mm	A _{ppm}	24.4 mm
A _{max}	0.0 mm																									
A _{min}	0.932 rad																									
A _{avg}	0.0 mm																									
A _y	0.0 mm																									
V _{max}	0.00 mm/s																									
V _{avg}	0.00 mm/s																									
A _{max}	15.4 mm																									
A _{min}	-0.107 rad																									
A _{avg}	12.3 mm																									
A _y	4.9 mm																									
A _{ppm}	20.5 mm																									
A _{ppm}	24.4 mm																									

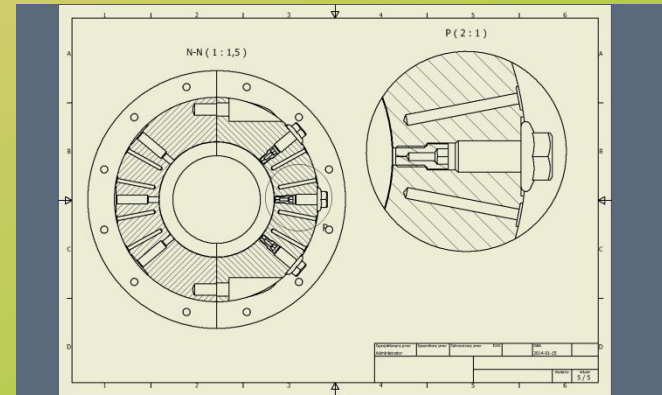
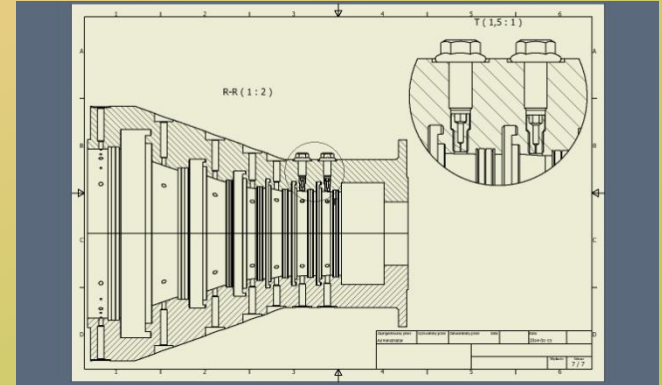
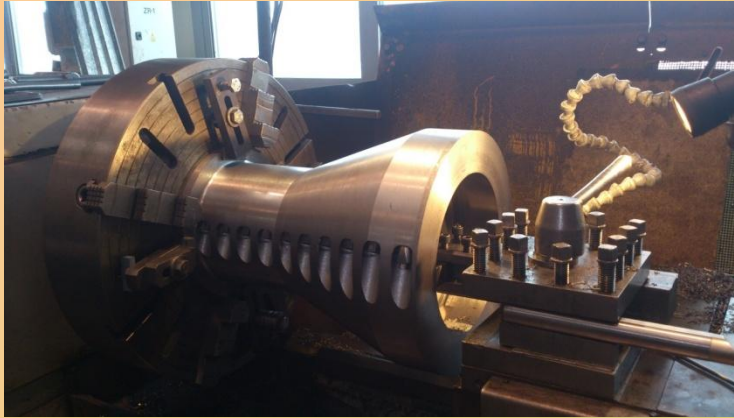
Notation: A= displacement amplitude, V= velocity RMS, φ= angle of the location of maximum diameter of orbit
 min: minimum value, ppk: peak to peak, x, y: axes name, and ppk: size at an angle ppk to x, y
 diagrams of vib: yellow = dir x, blue = dir y

Turbina osiowa (ORC)
9000 obr/min

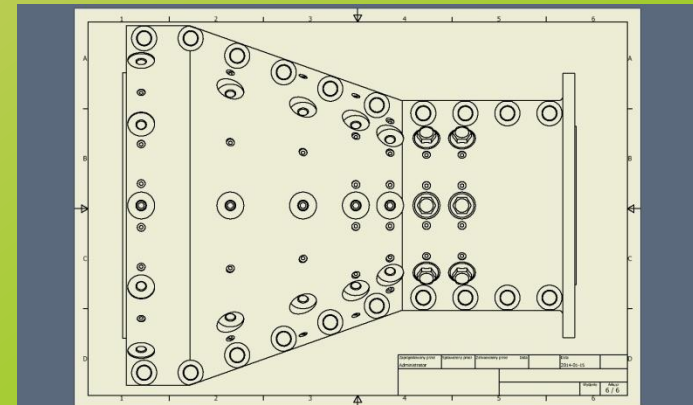


Turbina osiowa 100 kW

Opomiarowanie

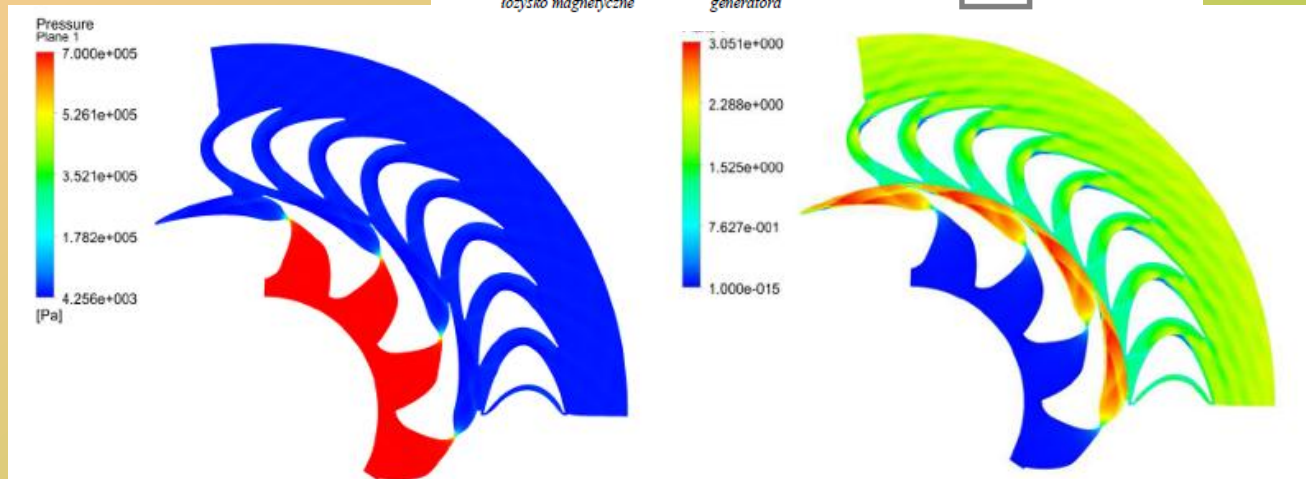
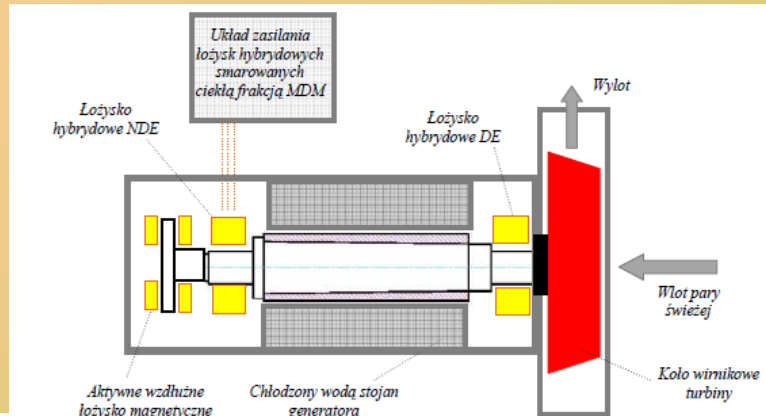


Korpus i wirnik turbiny



TURBINA PROMIENIOWA ORC 100 kW

Turbogenerator hermetyczny



Rozkład ciśnienia statycznego i liczby Macha

Obliczenia wytrzymałościowe stalowego wirnika turbiny promieniowej z bandażowanymi i wolnonośnymi łopatkami

