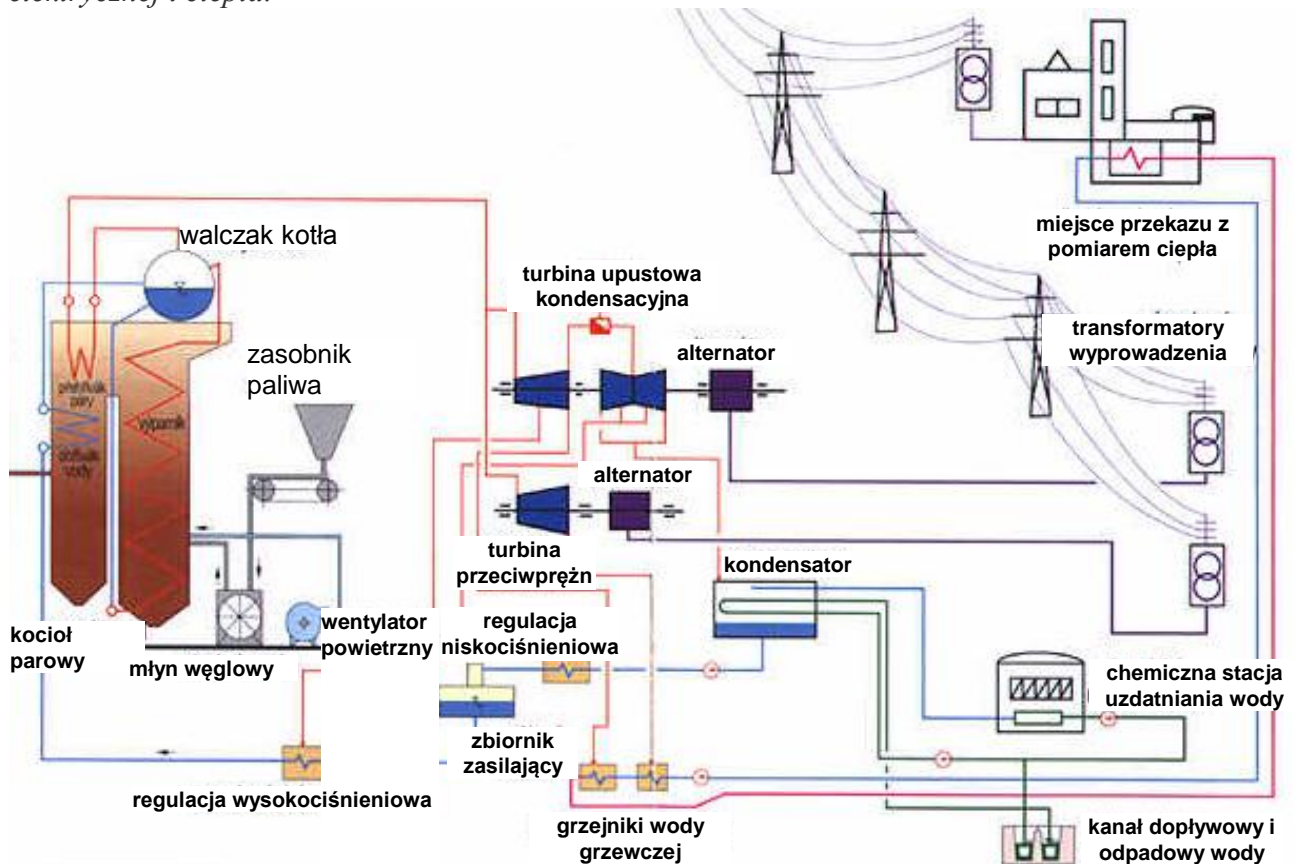


1.3. Zastosowanie turbin parowych dla szerokiego pasma trybów eksploatacyjnych, kombinowana produkcja energii elektrycznej i ciepła (KVET)

KVET w cyklu parowym wykonujemy za pośrednictwem pary wyprodukowanej w kotle parowym za pomocą paliw kopalnych lub niekopalnych. Para jest doprowadzana do przeciwprężnej lub kondensacyjnej upustowej turbiny parowej, które napędzają generator energii elektrycznej. Ciepło w formie pary, której ciśnienie odpowiada konstrukcji maszyny lub wymaganemu poziomowi temperatury energii cieplnej, jest odbierane z pary przeciwprężnej lub upustowej turbiny parowej.

Rys.1 Podstawowe parametry poszczególnych typów kombinowanej produkcji energii elektrycznej i ciepła.



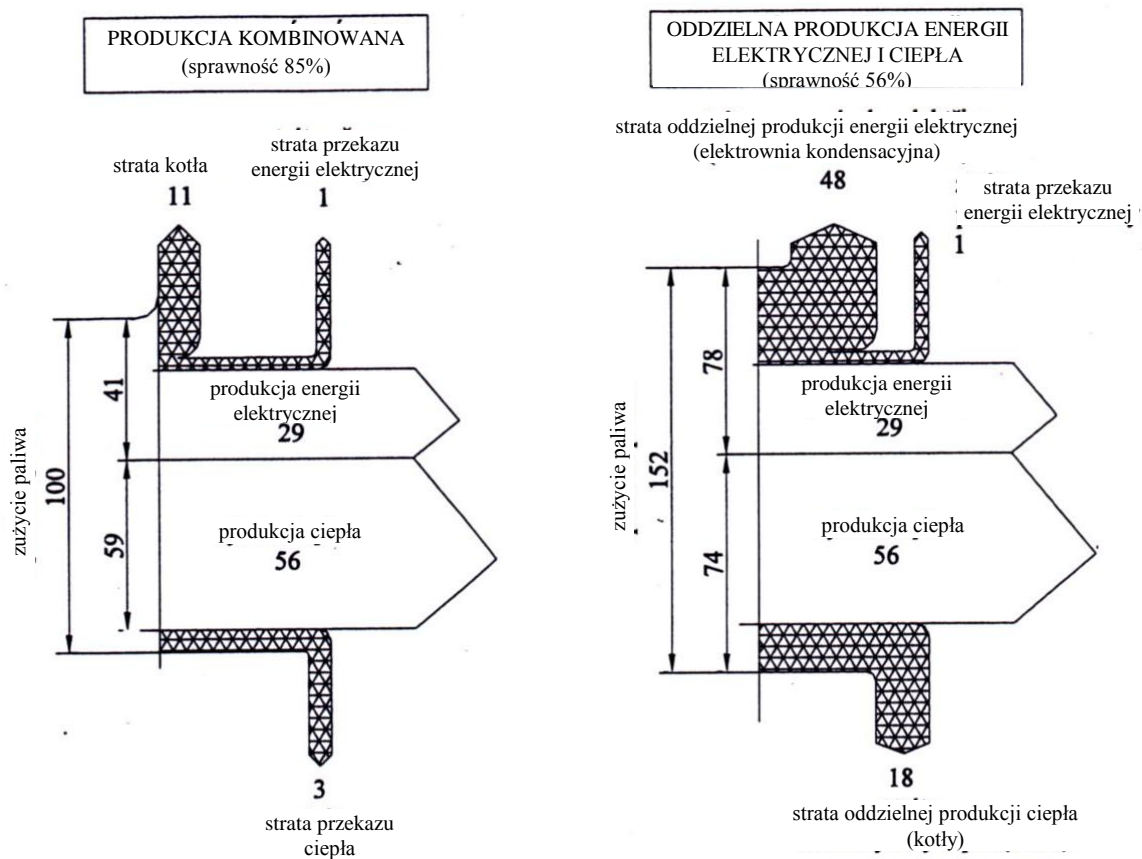
Turbiny parowe z najdogodniejszych technologii dla kombinowanej produkcji, ponieważ można konstrukcyjnie rozwiązywać upusty pary regulowane i nieregulowane wg wymagań klienta pod względem optymalizacji całego cyklu. Przez rozwiązanie konstrukcyjne upustów regulowanych i nieregulowanych można, więc zmieniać zarówno moc cieplną jak i elektryczną według potrzeb technologii lub dostawy ciepła dla ogrzewania.

Regulacja ciśnienia w upustach jest rozwiązana:

- zaworami regulacyjnymi (z reguły dla wyższych parametrów pary w upuście powyżej 10 barów)
- lub kryzą regulacyjną (dla niższych parametrów pary w upuście do 10 barów).

Na rys. 2 jest pokazany bilans energetyczny kombinowanej produkcji energii elektrycznej i ciepła (KVET) i bilans energetyczny produkcji oddzielnej

Rys.2 Bilans energetyczny kombinowanej i oddzielnej produkcji energii elektrycznej i ciepła



Z podanego rysunku wypływa, że kombinowana produkcja energii elektrycznej i ciepła jest jednoznacznie wygodniejsza. Należy także dalej podkreślić wyraźne korzyści z wprowadzenia KVET do obniżania emisji CO₂.

Tabela 2: Charakterystyczne wartości technologii kogeneracyjnych:

TECHNOLOGIA KOGENERACYJNA	NORMALNA SPRAWNOŚĆ CAŁKOWITA η_c (%)	NORMALNA SPRAWNOŚĆ ELEKTRYCZNA η_e (%)	NORMALNA SPRAWNOŚĆ PRODUKCJI CIEPŁA η_t (%)	NORMALNA MOC MWe + MWt
WĘGLOWA Z TURBINĄ KONDENSACYJNĄ Z UPUSTEM	90	42	48	500
WĘGLOWA Z TURBINĄ PRZECIWPREŻNĄ	90	38	52	100
MAŁA TURBINA GAZOWA	90	28	62	20
DUŻA TURBINA GAZOWA	90	35	55	150
CYKL GAZOWO- PAROWY	94	48	46	200
SILNIK GAZOWY WYSOKOPREŻNY	90	45	45	15

2. ROZWIĄZANIE TECHNICZNE WYBRANYCH CAŁOŚCI TURBIN PAROWYCH

Rozwiązanie techniczne całego turbozespołu jest podporządkowane maksymalnej wewnętrznej sprawności termodynamicznej, która w przypadku turbin **EKOL** waha się w zakresie 0,79 - 0,89 według typu turbiny, parametrów wejściowych i wyjściowych. **Wysoka wewnętrzna sprawność termodynamiczna jest osiągnięta przede wszystkim z powodu indywidualnego podejścia do każdego z projektów („szycie na miarę”).** Specyficzne wymagania Klienta są analizowane i zawsze jest zaprojektowane optymalne rozwiązanie. Do porównania wewnętrznych sprawności termodynamicznych turbin parowych światowych producentów firma **EKOL** wykonała badania marketingowe rynku z następującymi wynikami.

*Tabela 3: Porównanie sprawności wewnętrznej turbin różnych światowych producentów turbin parowych z turbinami firmy **EKOL***

Producent	Sprawność wewnętrzna turbiny
Kałużskij turbinowyj zawod Kaługa	0,78-0,82 *)
Siemens	0,85-0,89 *)
Škoda Power	0,78-0,89 *)
Fincantieri	0,75-0,85 *)
EKOL	0,79-0,89

*) Uwaga: Chodzi o nieoficjalne informacje uzyskane przez badania marketingowe rynku

Obecnie są konstruowane wyłącznie wysokoobrotowe turbiny parowe, które umożliwiają optymalizowanie kanału przepływowego turbiny. W uproszczony sposób można powiedzieć, że turbina wysokoobrotowa (około 10000 min⁻¹) ma około o ½ mniejsze wymiary w stosunku do turbiny klasycznej koncepcji n=3000 min⁻¹. Konsekwencją procesu optymalizacji wysokoobrotowych turbin parowych są następujące wyniki:

- niższa ilość stopni łopatek
- wyższa wewnętrzna sprawność termodynamiczna o 5 – 10% absolutnie w porównaniu z klasyczną koncepcją turbiny z obrotami n = 3000 min⁻¹
- około o ½ mniejsze wymiary
- cena turbin wysokoobrotowych wraz z wyposażeniem (przekładnia i generator) jest niższa niż w przypadku klasycznej koncepcji n = 3000 min⁻¹

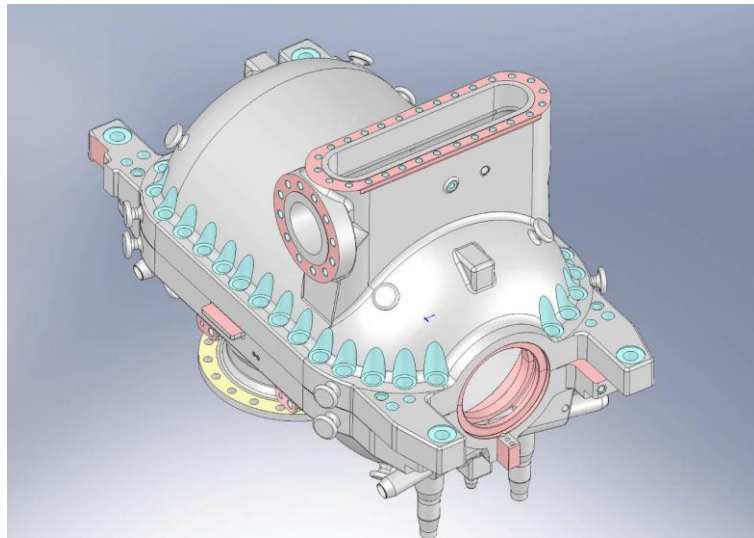
Jest niewątpliwe, że turbina jest skomplikowanym urządzeniem, co wymaga specjalizacji poszczególnych konstruktorów. Konstruktorzy f-my **EKOL** są rozdzieleni wg poszczególnych podzespołów turbiny parowej.

2.1. Części statorowe

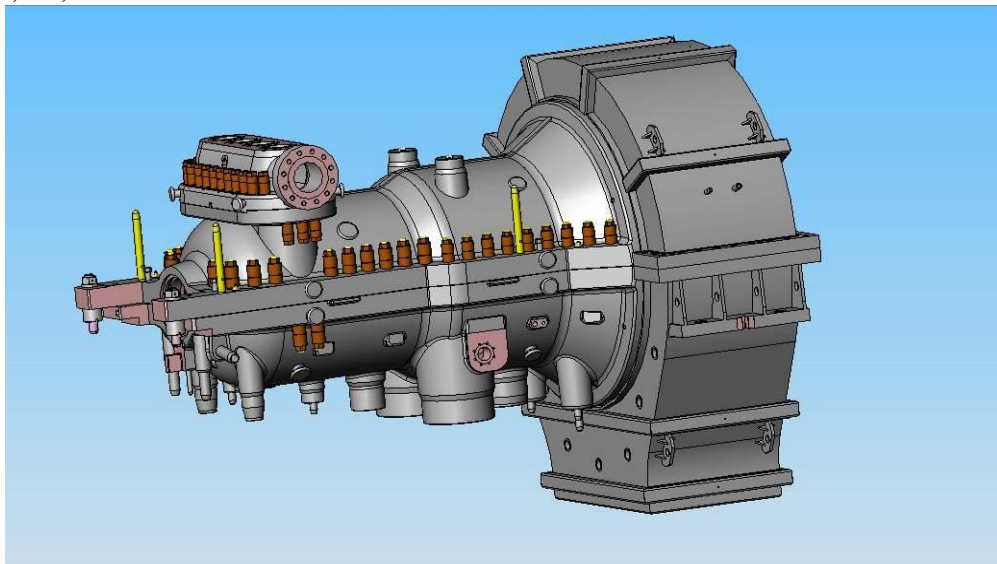
2.1.1. Kadłub turbiny

Kadłub turbiny rozwiązujemy dla zakresu parametrów pracy, co oznacza, że można ten sam odlew kadłuba użyć dla typoszeregu wydajności.

Rys.3 Kadłub turbiny przeciwprężnej typu R8 – 4,5/0,3

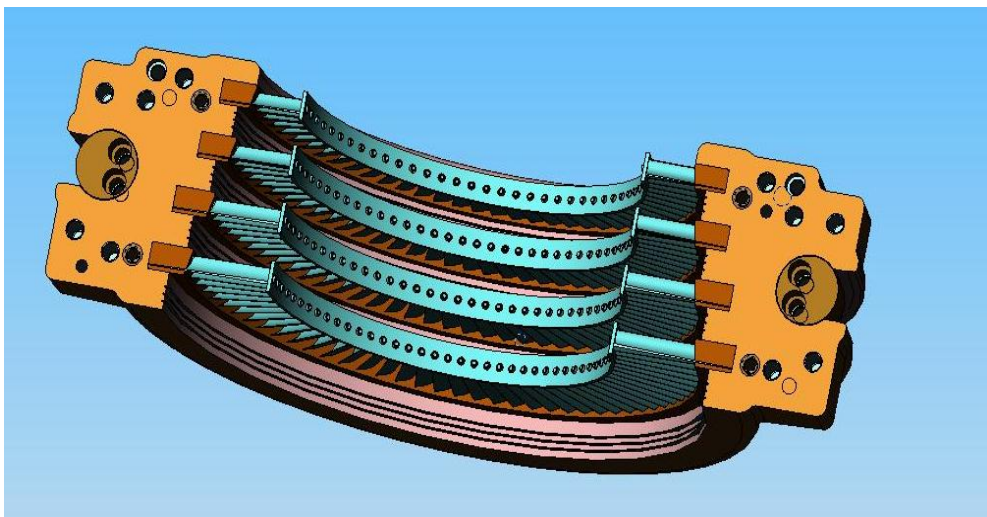


Rys.4 Kadłub turbiny z gardzielą wylotową turbiny kondensacyjnej
T10-4,0/0,2 - model



2.1.2. Obejmy łopatek

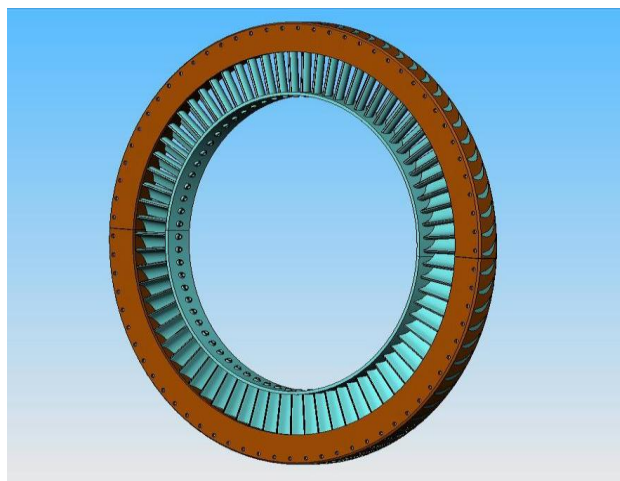
Rys. 5: Obejma łopatek - widok na płaszczyznę podziałową i włożone pierścienie statorowe - model



2.1.2.1. Pierścień statorowy - obniżenie strat w porównaniu z koncepcją statorowego układu łopatkowego łopatka z przekładką

- skrajnych
- profilowych
- niewłaściwym kątem natarcia strumienia pary
- podwyższenie wewnętrznej sprawności termodynamicznej o 2 – 4 %
- wzór przemysłowy **EKOL**
- istotne skrócenie czasów montażowych nawet o 75% w porównaniu z koncepcją łopatka + przekładka

Rys. 6: Pierścień statorowy



2.1.3. Dławnice

Dławnice zapewniają uszczelnienie nadciśnieniowych i podciśnieniowych przestrzeni turbiny wobec ciśnienia atmosferycznego. Używamy z reguły dławnice labiryntowe, w których nie występuje bezpośredni kontakt między nieruchomą częścią statora i ruchomą częścią wirnika. Przepływ masy jest określony przez wyrażenie

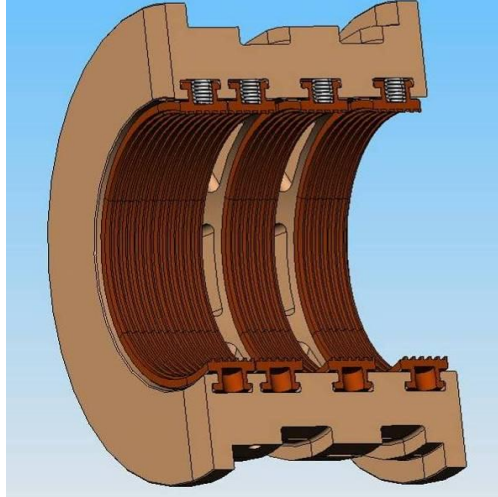
$$\dot{m}_u = f(A, \mu, z, p1/v1) \quad (1)$$

gdzie A jest powierzchnią przepływową, która jest funkcją średnicy i luzu promieniowego, μ jest współczynnikiem przepływu, z jest ilością blaszek a $p1/v1$ są parametrami (ciśnienie, objętość znamionowa) na wejściu do dławnicy. Przy konstrukcji dławnicy są istotne wielkości A , z , za pomocą, których można obniżyć straty mechaniczne, definiowane przez równanie

$$\eta_{vol} = \frac{\dot{m}_u}{\dot{m}_0} \quad (2)$$

gdzie \dot{m}_0 jest przepływ masy pary do turbiny. Sprężyste ułożenie dławnic wg rys. 5 umożliwia obniżyć wolumetryczne straty, które zazwyczaj wynoszą $\eta_{vol} = 0,97 - 0,99$. Użycie tego typu dławnic także wyraźnie podwyższa niezawodność eksploatacyjną.

Rys. 7: Przednia dławnica parowa - dzielone pierścienie odskakujące



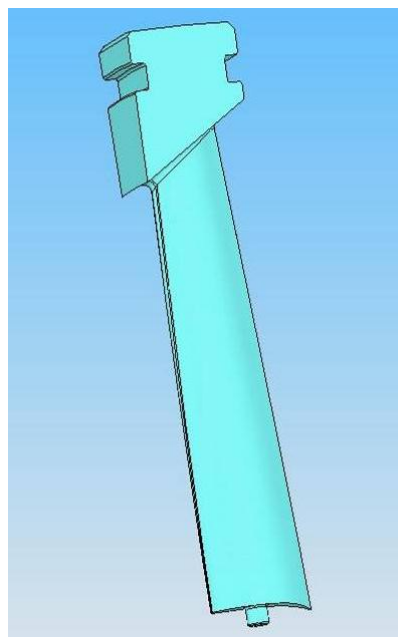
2.2. Układ łopatkowy

Sprawą oczywistą jest projekt 3D i obliczenia profili, zawiesi i bandażów łopatek, obniżanie strat, ekonomika produkcji i montażu. Układ łopatkowy rozwiązujemy, jako bandażowany, ponieważ przez aplikację bandażowanych łopatek podwyższamy wewnętrzną sprawność termodynamiczną nawet o 2-5% przez obniżenie strat krawędziowych i strat szczelności wewnętrznej.

2.2.1. Statorowy układ łopatkowy

- Układ łopatkowy reakcyjny jest rozwiązany za pomocą pierścieni statorowych patrz 2.1.2.1. - Rys. 4
- Ostatnie stopnie statorowych łopatek w przypadku turbin kondensacyjnych rozwiązujemy za pomocą frezowanych łopatek ze zmiennym profilem po wysokość pióra łopatki, z tamowanym bandażem

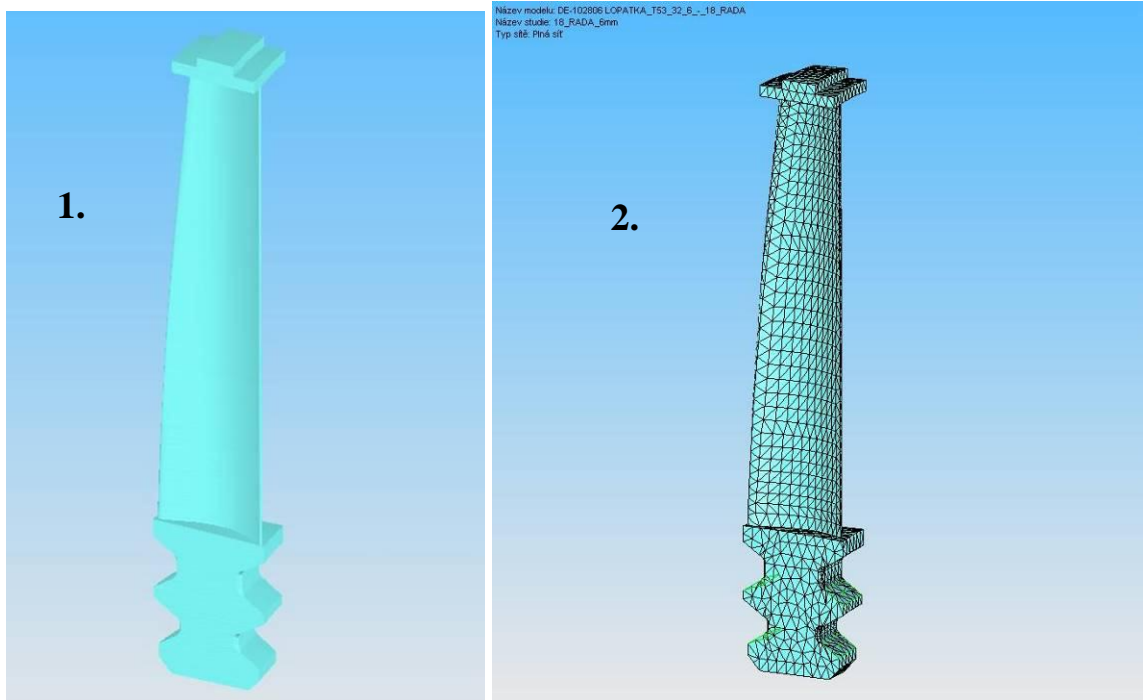
Rys. 8: Łopaska statorowa ostatnich stopni w razie turbin kondensacyjnych



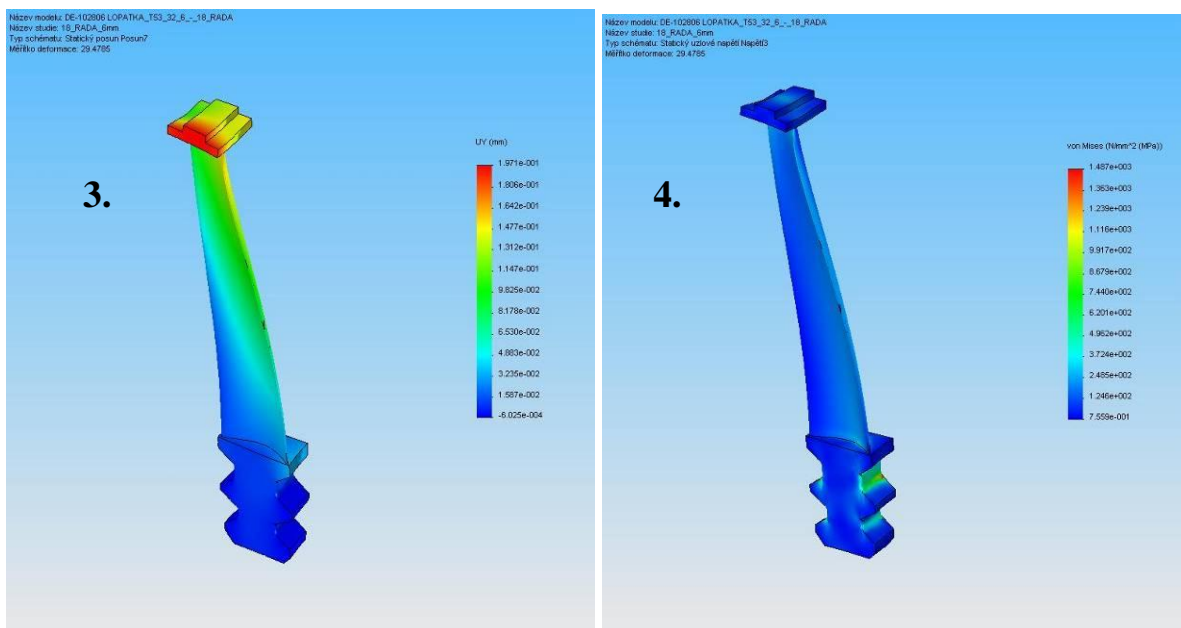
2.2.2. Układ łopatkowy wirnika

Rys. 9: Postępowanie projektu i obliczenia łopatki ostatnich stopni

- 1 – 3D Model łopatki wirnika, zadanie warunków skrajnych
- 2 – wytworzenie sieci obliczeniowej modelu i ewentualne udelikatnienie sieci w eksponowanych miejscach



- 3 – odkształcenia łopatki włącznie bandażu
- 4 – obciążenie poszczególnych części łopatki



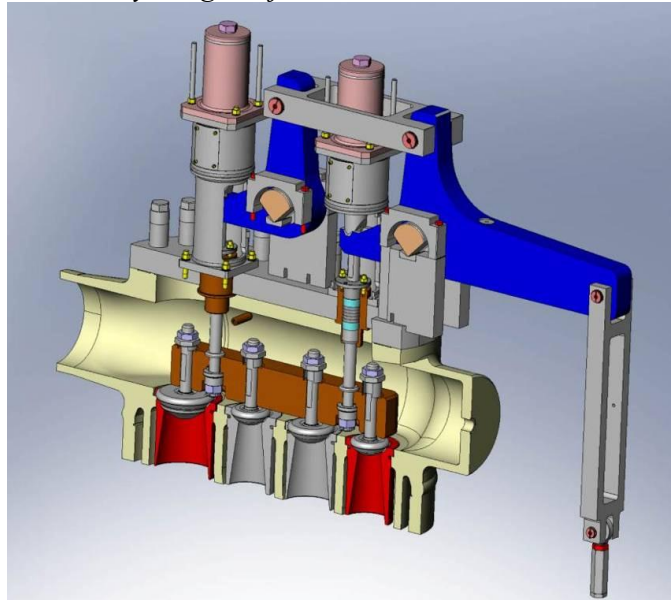
2.3. Zawory regulacyjne i kryzy regulacyjne

Stosujemy dwie podstawowe koncepcje rozwiązania zaworów regulacyjnych :

3.3.1 Regulacja belkowa:

Koncepcję regulacji belkowej używamy minimalnie dla 4 grzybków regulacyjnych a także w razie niskonapięciowego napędu regulacji. Zaletą tej koncepcji jest niższa ilość części, prostsza konstrukcja, jeden napęd dla całego układu. Niewygodą jest przy zmianie skoku poszczególnych grzybków konieczność demontażu całego zespołu.

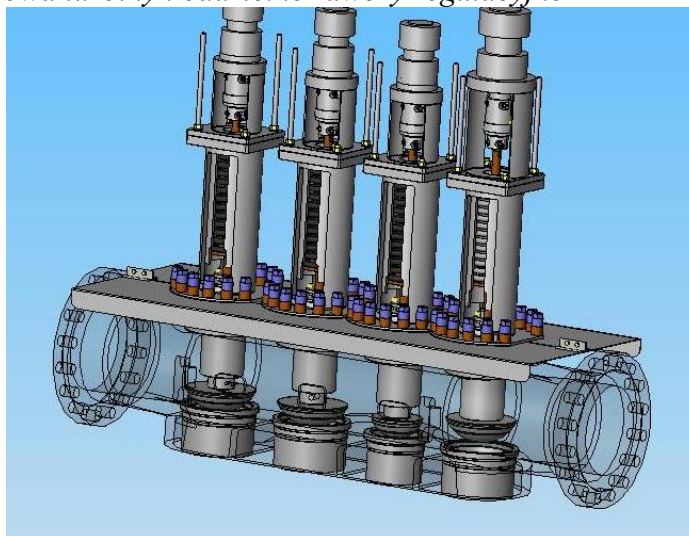
Rys. 10: Część wejściowa turbiny i regulacja belkowa



3.3.2 Oddzielne zawory regulacyjne:

Koncepcję oddzielnych zaworów używamy najwyżej dla 4 grzybków regulacyjnych a także przy wymaganiu na wysokoprężny napęd zaworów. Zaletą tej koncepcji jest możliwość operacyjnego reagowania na zmianę wymagań skoków lub jego przestawienia bez dużego demontażu, możliwość sterowania poszczególnymi grzybkami regulacyjnymi niezależnie od siebie, w dodatku można dokładnie sprawdzać położenie poszczególnych grzybków. Niewygodą jest większa ilość części, bardziej skomplikowana konstrukcja, konieczność napędu dla każdego zaworu.

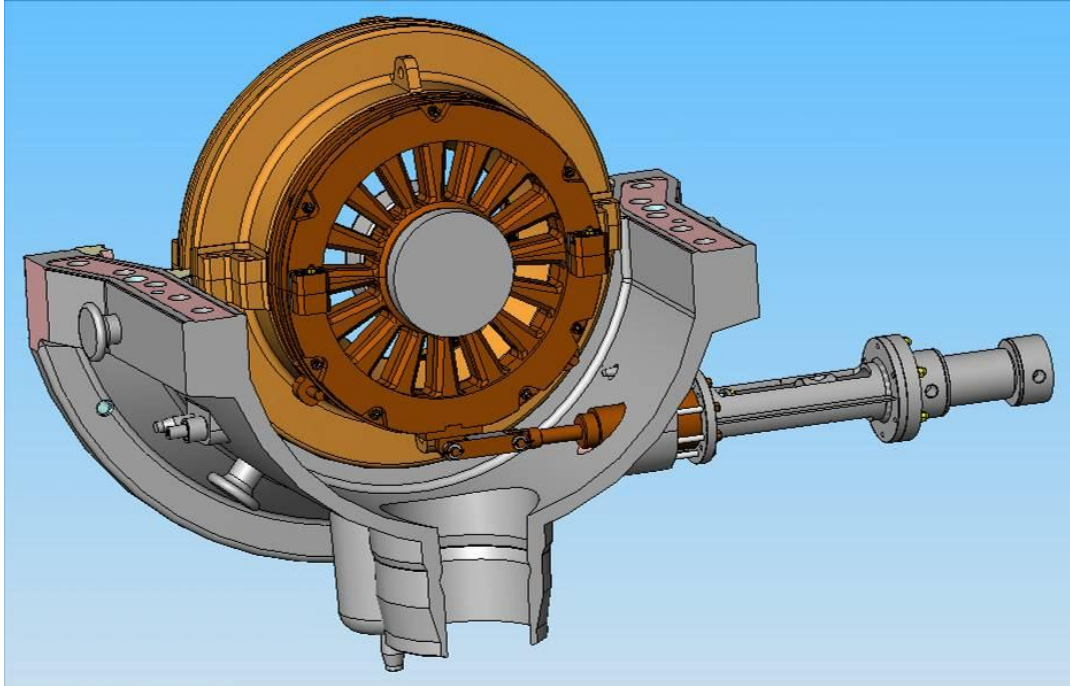
Rys. 11: Część wejściowa turbiny i oddzielne zawory regulacyjne



3.3.3 Kryza regulacyjna:

Kryzą regulacyjną regulujemy parametry pary w upuście regulowanym. Kryzę używamy dla parametrów pary w upuście regulowanym do 10 barów.

Rys. 12: Kryza regulacyjna z napędem



3. PODSUMOWANIE

Celem prezentacji było przedstawienie różnorodności typów i możliwości użycia turbin parowych **EKOL**. Turbiny parowe firmy **EKOL** są szyte na miarę poszczególnym wymaganiom klienta, co **EKOL**-owi umożliwia być godnym konkurentem istotnych europejskich i światowych producentów. Od 2009 roku firma **EKOL** poszerzyła się o znaczący wydział kotłów, co obecnie umożliwia **EKOL**-owi oferować kompletne elektrownie - kocioł, turbinę parową i całe pozostałe wyposażenie.

Następnym zamiarem było zapoznać słuchaczy z podziałem i możliwościami turbin parowych, rozwiązaniem technicznym niektórych węzłów turbin parowych i zaprezentowanie niektórych aplikacji turbin parowych ze zrealizowanych zleceń.

Kombinowana produkcja energii elektrycznej i ciepła jest najbardziej zaawansowaną metodą dla efektywnego wykorzystania energii. Turbiny parowe są odpowiednią aplikacją dla produkcji kombinowanej. **EKOL** oferuje turbiny parowe dla miejskich i zakładowych elektrociepłowni do mocy 70 MWe. Główna uwaga jest poświęcana wymaganiom Klienta z celem osiągnięcia maksymalnej sprawności całego urządzenia, tj. wyprodukowaniu maksimum energii elektrycznej, ciepła lub chłodu przy minimalnym zużyciu paliwa.

LITERATURA

- [1] Veselý, S. : “Turbiny parowe dla kombinowanej produkcji energii elektrycznej i ciepła” Dni ciepłownicze, H. Králové, 2004
- [2] Materiały techniczne i prospektowe firmy **EKOL**, spol. s r.o., Brno