

# SILNIK TURBINOWY – ANALIZA TERMO- GAZODYNAMICZNA OBIEGU „SILNIKA IDEALNEGO”-BEZ STRAT

Dr inż. Robert JAKUBOWSKI

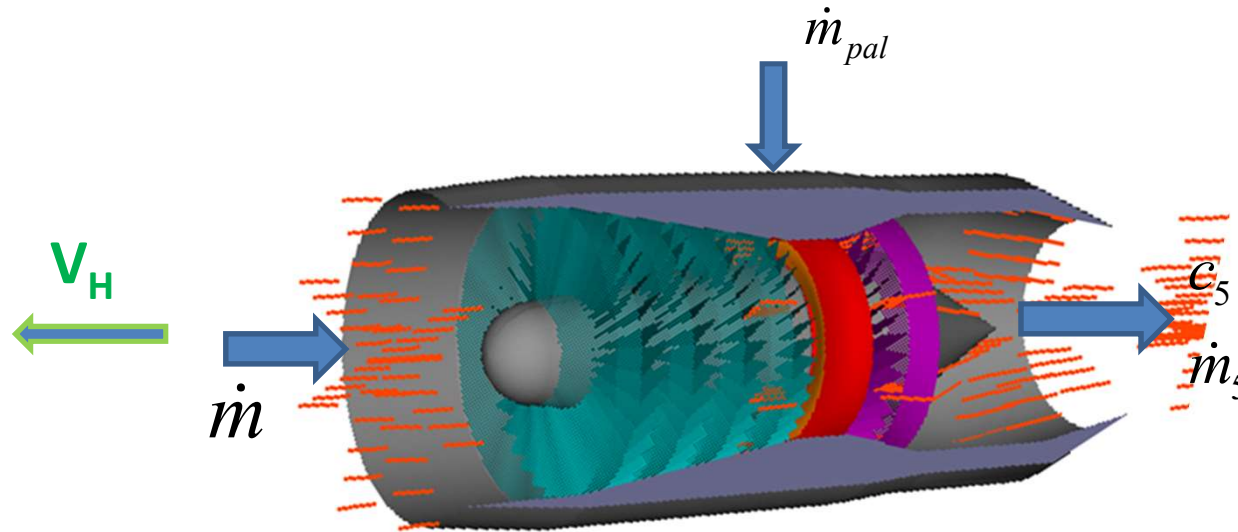
Wydział Budowy Maszyn i Lotnictwa PRz

Pok. 215 bud L 33

E-mail [robert.jakubowski@prz.edu.pl](mailto:robert.jakubowski@prz.edu.pl)

WWW [www.jakubowskirobert.sd.prz.edu.pl](http://www.jakubowskirobert.sd.prz.edu.pl)

# Ciąg silnika odrzutowego



**Ciąg silnika:**

$$K = \dot{m}_5 c_5 - \dot{m} V_H \quad [N]$$

$$\dot{m} = \frac{dm}{dt} \quad \text{- masowe natężenie przepływu powietrza na wlocie do silnika}$$

$V_H$  - prędkość lotu

$c_5$  - prędkość strumienia gazów na wyjściu z dyszy wylotowej

**Zużycie paliwa:**

$$\dot{m}_{pal} \quad \left[ \frac{kg}{s} \right]$$

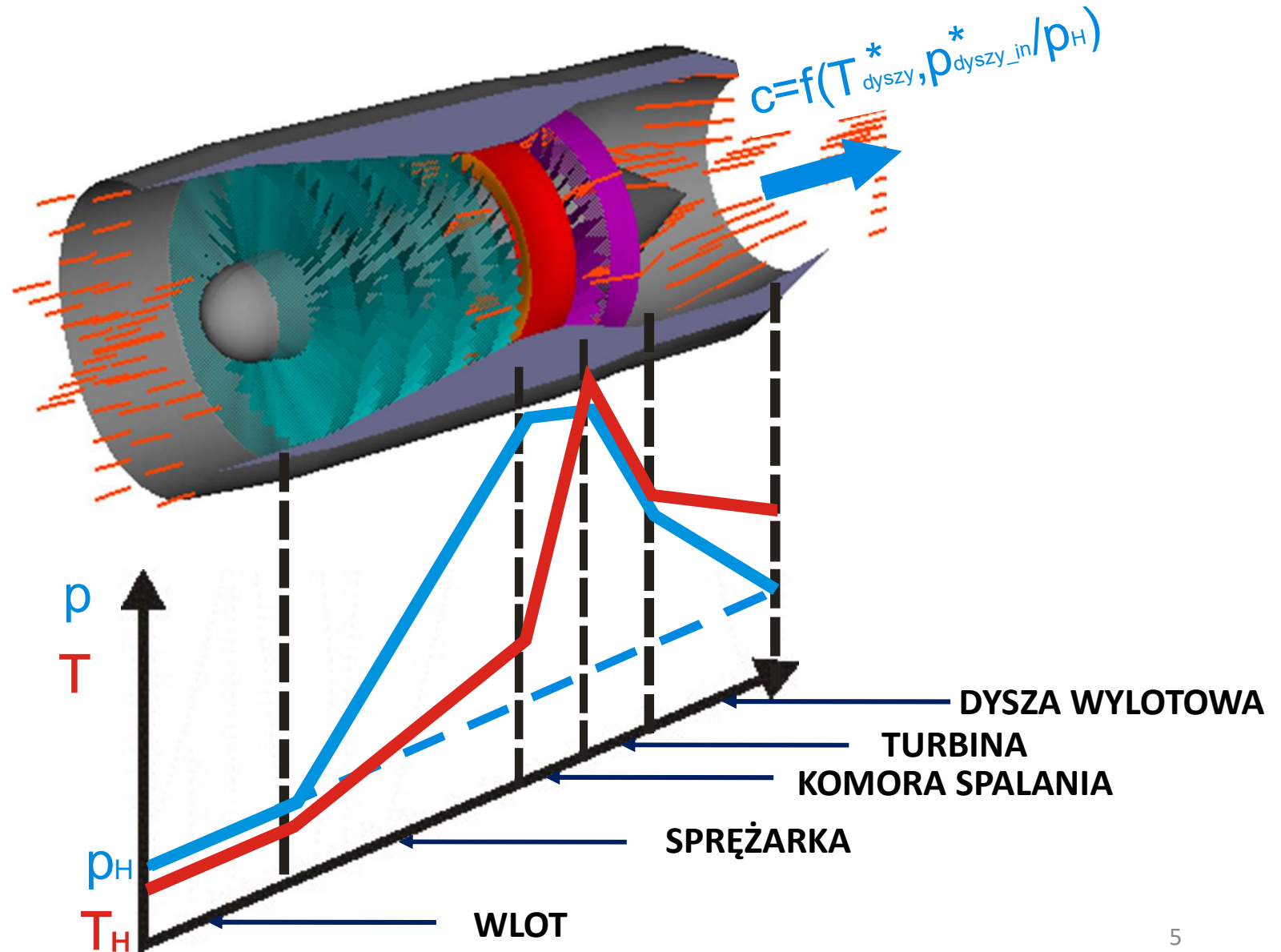
**Ciąg jednostkowy:**

$$k_j = K / \dot{m} \quad \left[ \frac{Ns}{kg} \right]$$

**Jednostkowe zużycie paliwa:**

$$c_j = \dot{m}_{pal} / K \quad \left[ \frac{kg}{Ns} \right]$$

# Zasada działania silnika odrzutowego



# Obliczenia i analiza silnika odrzutowego – silnik idealny

- Procesy wewnętrzne są opisane przemianami odwracalnymi,
- Model gazu jest opisany równaniami gazu doskonałego:

$$c_p, c_v, k = idem$$

Równanie Clapeyrona

$$pv = RT$$

$$k = \frac{c_p}{c_v}$$

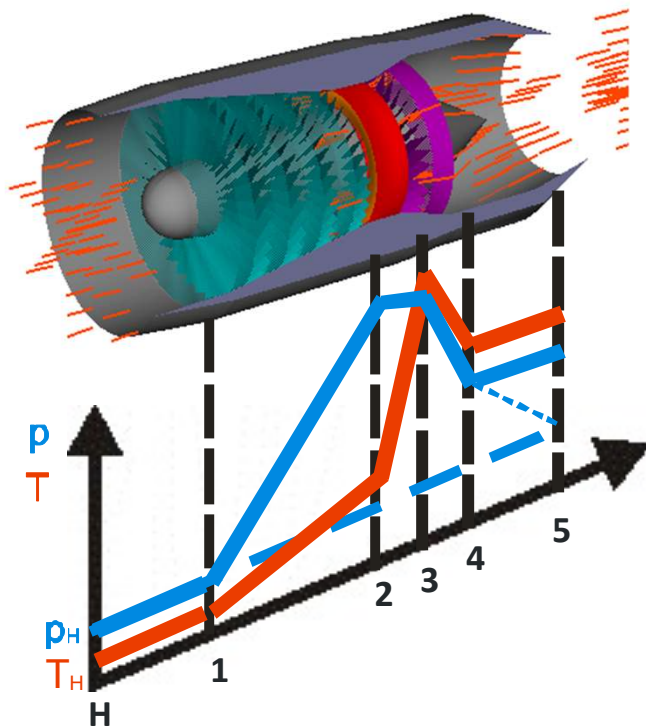
$$R = c_p - c_v$$

R [J/(kgK)] – indywidualna stała gazowa – zależy od składu gazu

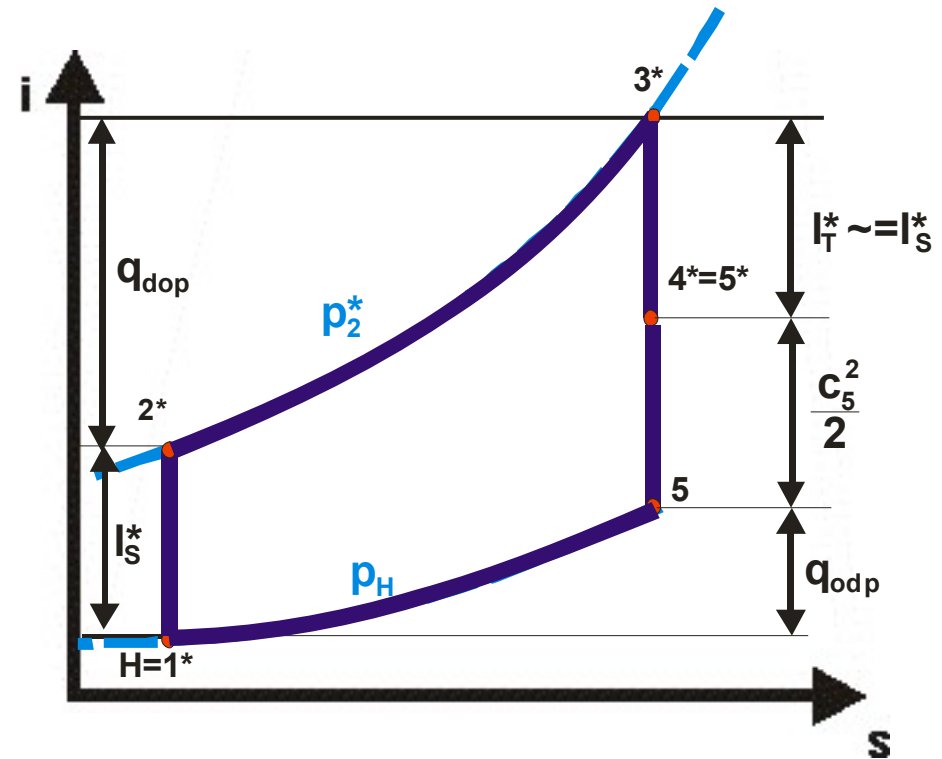
Dla powietrza

R=287 [J/(kgK)],  $c_p=1005$  [J/(kgK)],  $c_v=718$  [J/(kgK)],  $k=1,4$

# Silnik turbinowy a obieg Braytona



Prędkość lotu  $V_H = 0$



**ODPROWADZENIE CIEPŁA Z SILNIKA ZE SPALINAMI**

# Charakterystyka obiegu Braytona

Stopień podgrzania:

$$\Delta = \frac{T_3}{T_1}$$

Spręż całkowity:

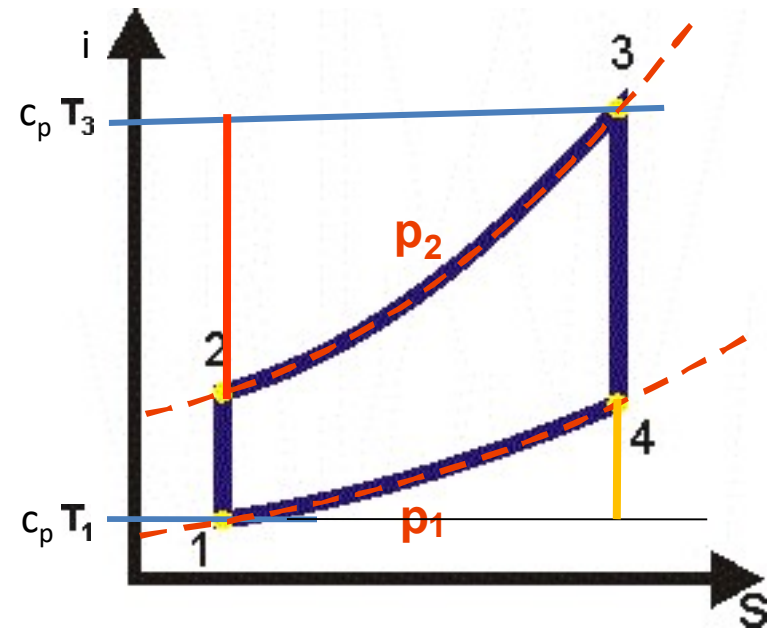
$$\pi = \frac{p_2}{p_1}$$

Praca właściwa obiegu Braytona:

$$l_{ob} = q_{dop} - q_{odp} = c_p T_1 \left( 1 - \frac{1}{\pi^{\frac{k-1}{k}}} \right) \left( \Delta - \pi^{\frac{k-1}{k}} \right)$$

Sprawność obiegu Braytona:

$$\eta_{ob} = \frac{l_{ob}}{q_{dop}} = 1 - \frac{1}{\pi^{\frac{k-1}{k}}}$$



**PRACA OBIEGU BRAYTONA** zależy od sprężu i stopnia podgrzania obiegu

**SPRAWNOŚĆ OBIEGU** zależy tylko od sprężu i jest tym bliższa jedności im większy jest spręż obiegu

# Parametry obiegu, a efektywność pracy silnika odrzutowego

Dla prędkości  $V_H=0$

$$l_{ob} = \frac{c_5^2}{2} = \frac{1}{2} k_j^2$$

$$\eta_{ob} = \frac{c_5^2}{2\tau_{pal}W_u} = \frac{c_5}{2c_jW_u} = A \frac{1}{c_j}$$

Dla prędkości  $V_H>0$

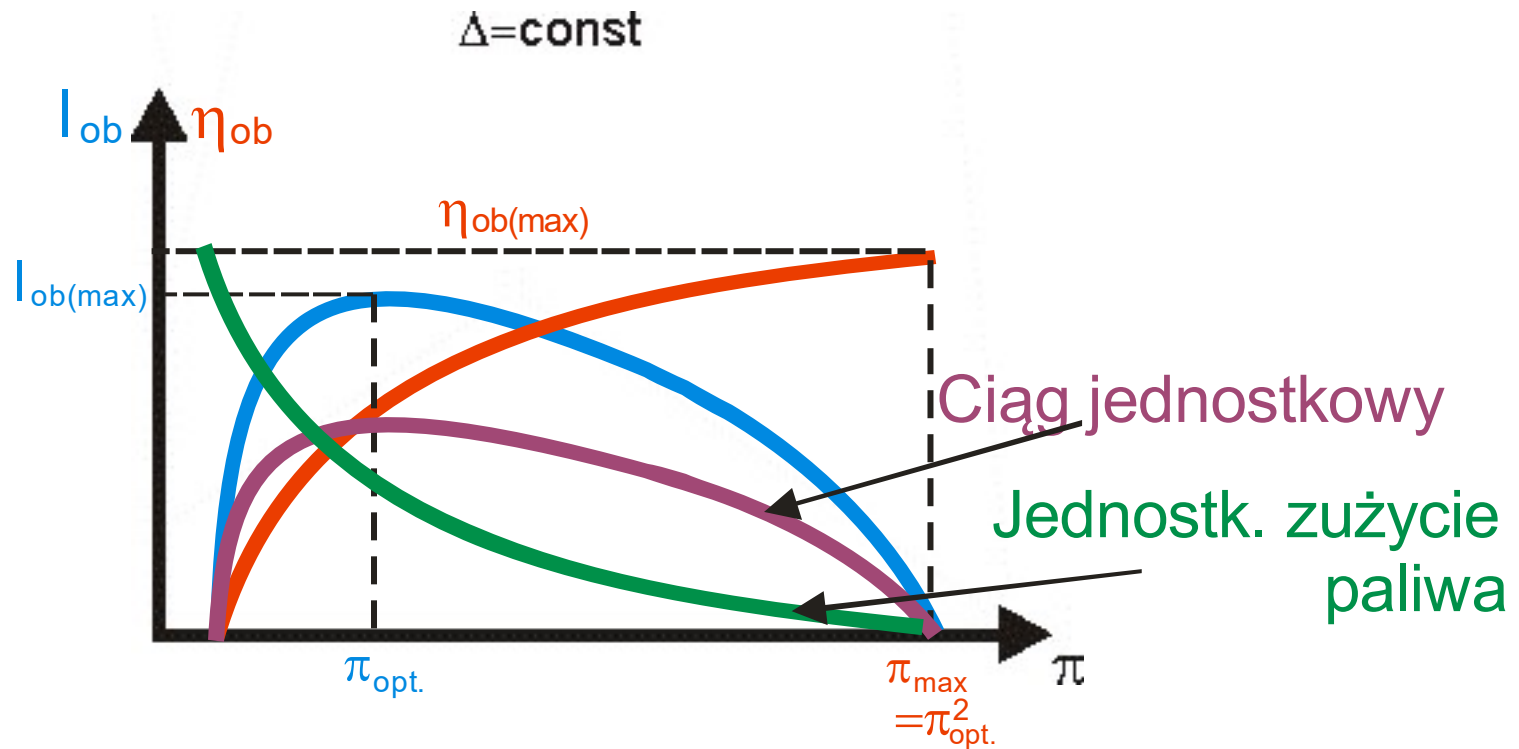
$$l_{ob} = \frac{c_5^2}{2} - \frac{V_H^2}{2} = \frac{1}{2} k_j (c_5 + V_H) = B k_j$$

$$\eta_{ob} = \frac{c_5^2 - V_H^2}{2\tau_{pal}W_u} = \frac{c_5 + V_H}{2c_jW_u} = C \frac{1}{c_j}$$

**Ciąg jednostkowy zależy podobnie jak praca obiegu od parametrów pracy silnika.**

**Jednostkowe zużycie paliwa zmienia się odwrotnie niż sprawność obiegu od parametrów pracy silnika.**

# Charakterystyka obiegu Braytona i silnika odrzutowego



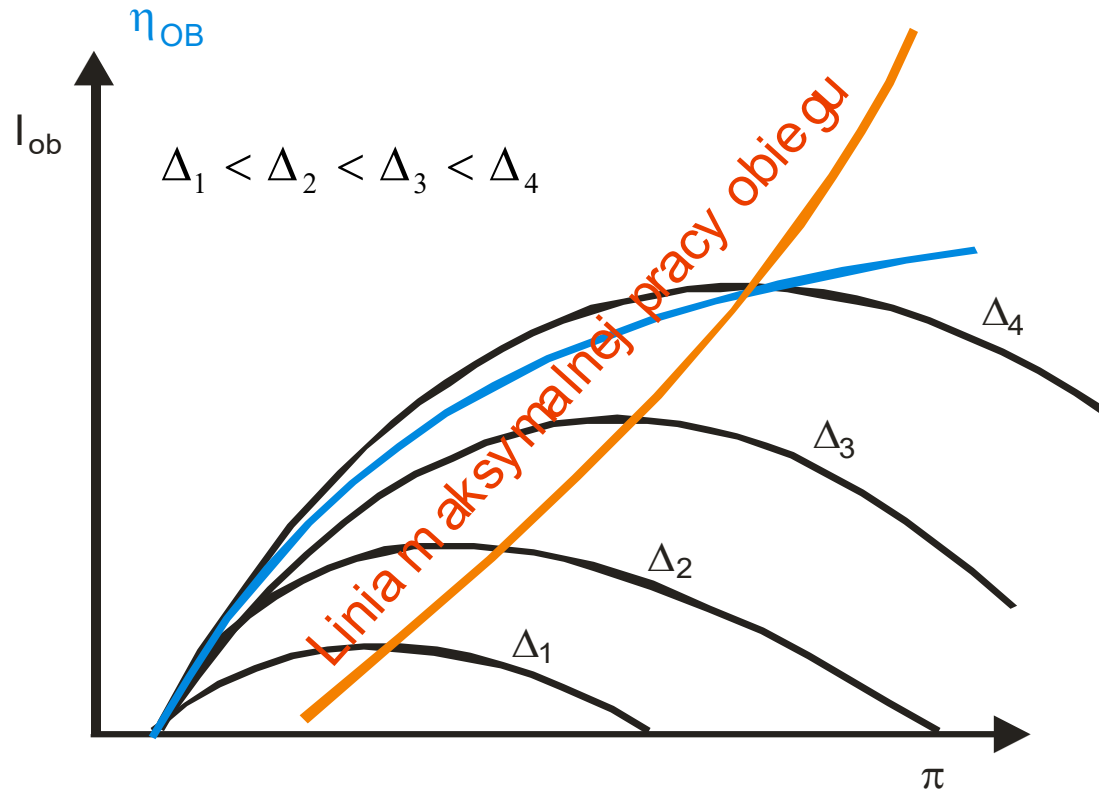
Maksymalna praca obiegu

$$\left. \frac{\partial l_{ob}}{\partial \pi_c} \right|_{\Delta = \text{idem}} = 0 \Leftrightarrow c_p T_1 \left( \Delta \left( \pi^{\frac{k-1}{k}} \right)^{-2} - 1 \right) = 0$$

$$\pi_{opt} = \Delta^{\frac{k}{2(k-1)}}$$

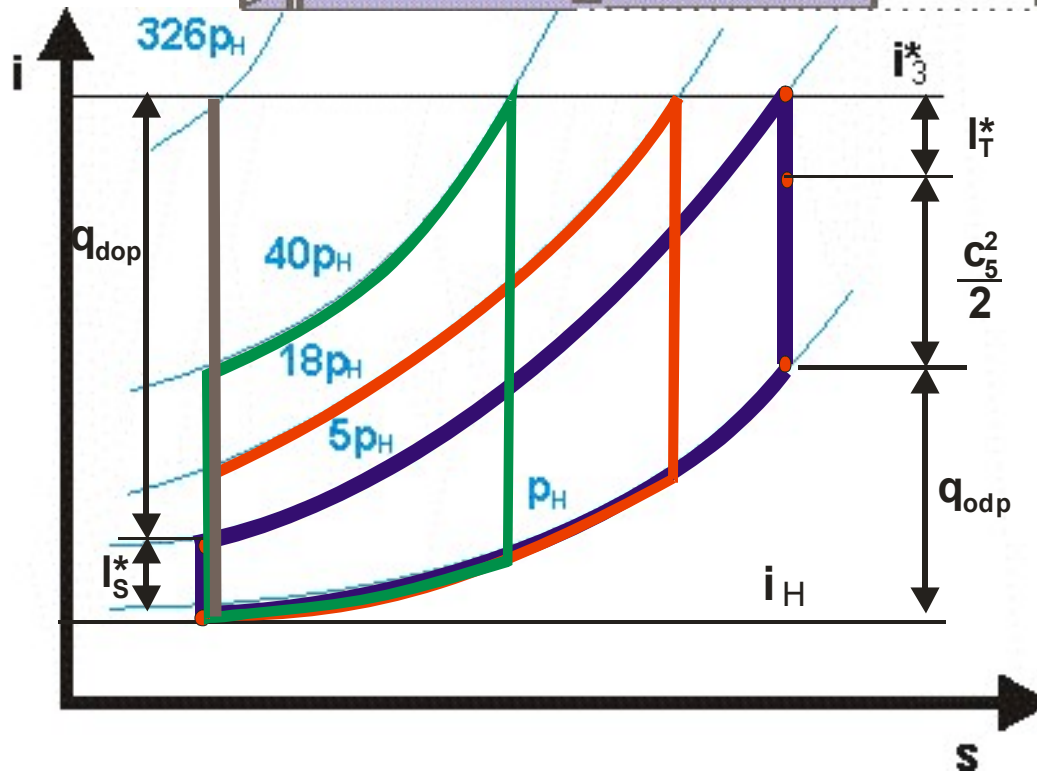
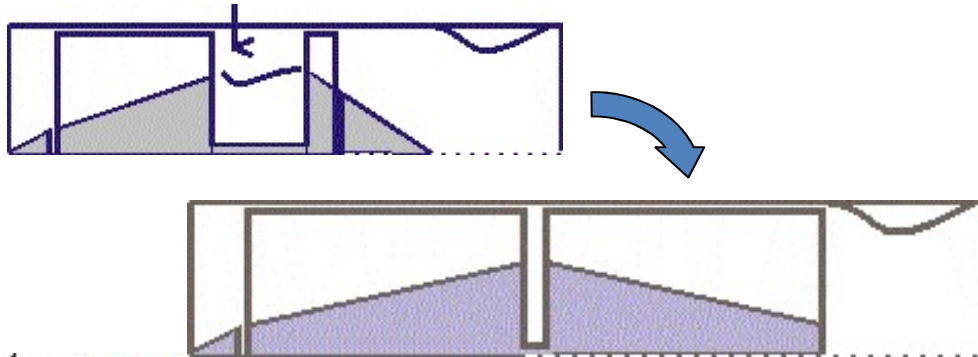


# Optymalizacja obiegu Braytona



Stopień podgrzania	Spręż optymalny	Spręż maksymalny
4	11,3	128
5	16,7	279,5
6	23	529

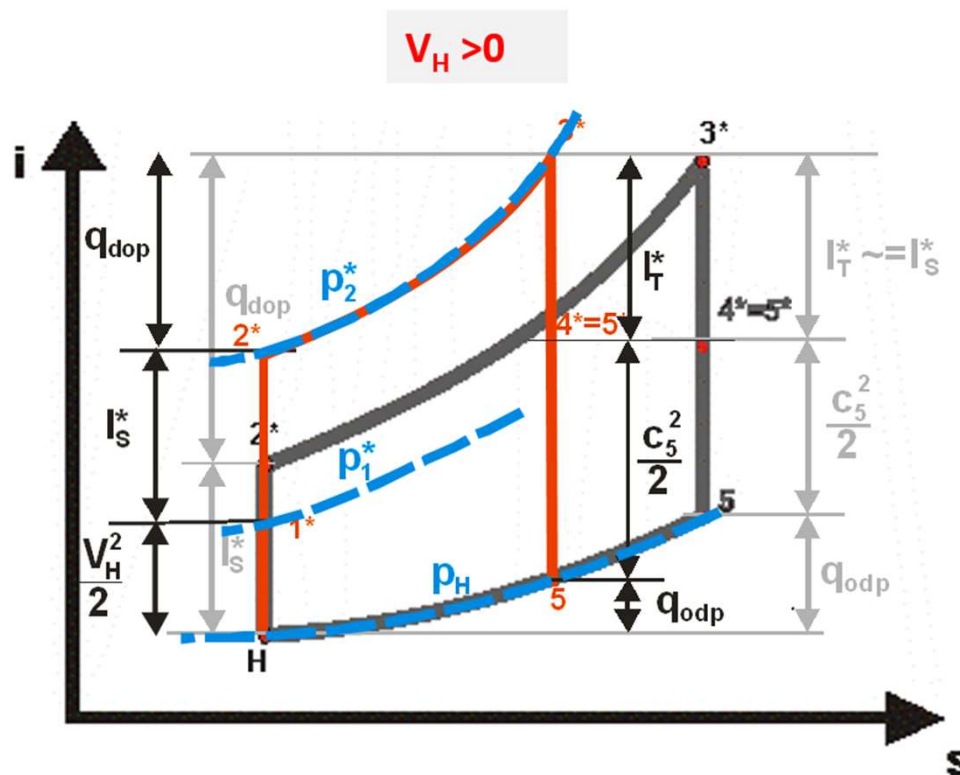
# Przykładowe obliczenia obiegu Braytona



Ph [Pa]	Th [K]	T3 [K]	$\Delta$	$\pi$
$10^5$	288	1500	5,21	5
$10^5$	288	1500	5,21	18
$10^5$	288	1500	5,21	40
$10^5$	288	1500	5,21	386

$l_{ob}$ [kJ/kg]	$\eta_{ob}$	kj [Ns/kg]	Cj [kg/daNh]
385	0,37	878	0,997
475	0,56	974	0,726
441	0,60	940	0,603
0	0,81	0	0

# Obieg silnika poruszającego się z prędkością $V_H$ względem otoczenia



$$\pi_c = \frac{p_2^*}{p_H} = \frac{p_1^*}{p_H} \frac{p_2^*}{p_1^*} = \pi_{DYN} \pi_s^*$$

$\pi_{DYN} = f(V_H)$  -spręż dynamiczny  
we wlocie silnika

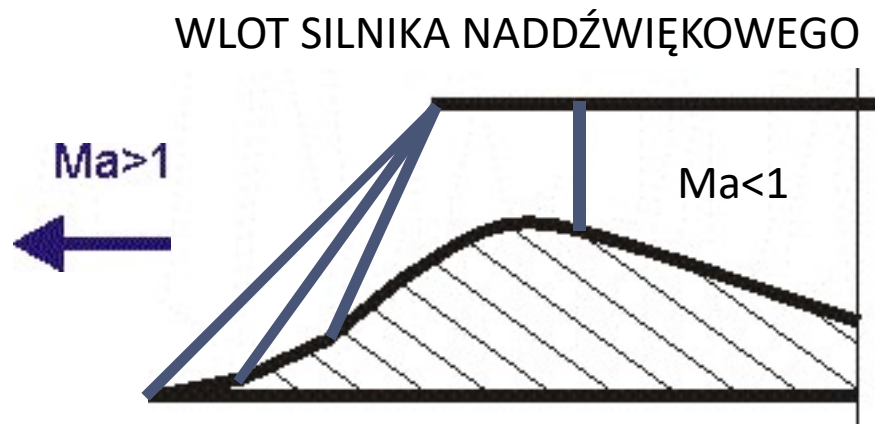
Praca obiegu turbinowego silnika odrzutowego:

dla  $V_H=0$        $l_{ob} = q_{dop} - q_{odp} = c_5^2/2$

dla  $V_H>0$        $l_{ob} = q_{dop} - q_{odp} = c_5^2/2 - V_H^2/2$



# Spręż dynamiczny silnika



Prędkość lotu Ma	Spręż dynamiczny
1	1,89
1,5	3,67
2	7,82
2,5	17,09
3	36,73

Spręż dynamiczny

$$\pi_{dyn} = \frac{p_H^*}{p_H} = \left( 1 + \frac{k-1}{2} Ma_H^2 \right)^{\frac{k}{k-1}}$$

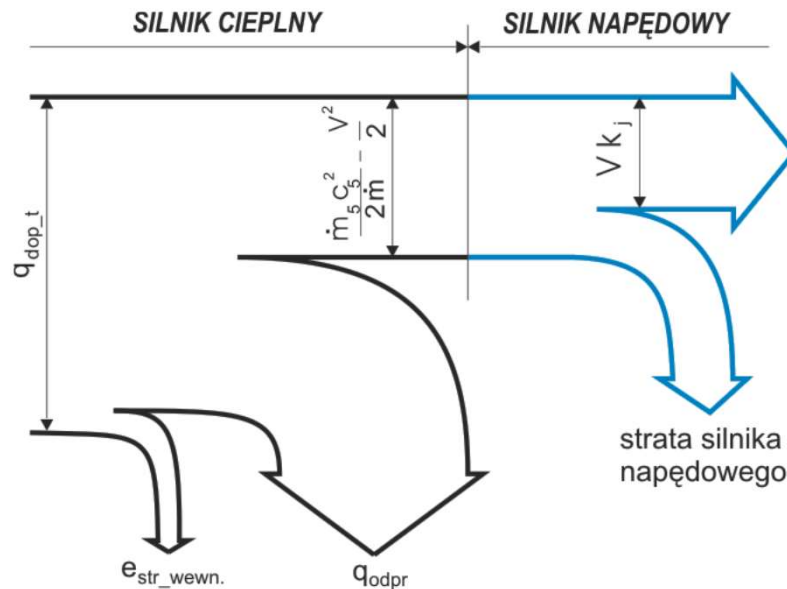
Przyrost temperatury

$$\frac{T_H^*}{T_H} = 1 + \frac{k-1}{2} Ma_H^2$$

# Parametry charakteryzujące pracę silnika

## Energetyczne

- Sprawność cieplna:  $\eta_c = \frac{l_{ob}}{q_{dop}} = \left( \frac{\dot{m}_5 c_5^2}{\dot{m} 2} - \frac{V^2}{2} \right) / \left( \frac{\dot{m}_{pal}}{\dot{m}} W_u \right)$
- Sprawność napędowa:  $\eta_k = \frac{k_j V_H}{l_{ob}} = k_j V_H / \left( \frac{\dot{m}_5 c_5^2}{\dot{m} 2} - \frac{V^2}{2} \right)$
- Sprawność ogólna:  $\eta_o = \frac{k_j V_H}{q_{dop}} = k_j V_H / \left( \frac{\dot{m}_{pal}}{\dot{m}} W_u \right)$



$$q_{dop\_t} = \frac{\dot{m}_{pal}}{\dot{m}} W_u = e_{str\_wewn.} + \left( \frac{\dot{m}_5 c_5^2}{\dot{m} 2} - \frac{V^2}{2} \right) + q_{odpr}$$

# Sprawności silnika

Sprawność cieplna

$$\eta_c = \frac{l_{ob}}{q_{dop}} = \left( \frac{\dot{m}_5 c_5^2}{\dot{m} 2} - \frac{V^2}{2} \right) / \left( \frac{\dot{m}_{pal}}{\dot{m}} W_u \right)$$

Sprawność napędowa

$$\eta_k = \frac{k_j V_H}{l_{ob}} = k_j V_H / \left( \frac{\dot{m}_5 c_5^2}{\dot{m} 2} - \frac{V^2}{2} \right)$$

Sprawność ogólna

$$\eta_o = \frac{k_j V_H}{q_{dop}} = k_j V_H / \left( \frac{\dot{m}_{pal}}{\dot{m}} W_u \right)$$

**Dla  $V_H=0$**

$$\eta_c = \frac{c_5^2}{2}$$

$$\eta_k = 0$$

$$\eta_o = 0$$

**Dla  $V_H>0$**

$$\eta_c = \frac{c_5^2}{2} - \frac{V^2}{2}$$

$$\eta_k = (c_5 V_H - V_H^2) / \left( \frac{c_5^2}{2} - \frac{V_H^2}{2} \right)$$

$$\eta_o = (c_5 V_H - V_H^2) / (\tau_{pal} W_u)$$

**Dziękuję za uwagę**