



Energetyka

Prof. Maciej Chorowski

# Chłodnictwo & Kriogenika

## Wykład 10 – Skraplarki i chłodziarki Claude'a



**KAPITAŁ LUDZKI**  
NARODOWA STRATEGIA SPÓJNOŚCI



Politechnika Wrocławska

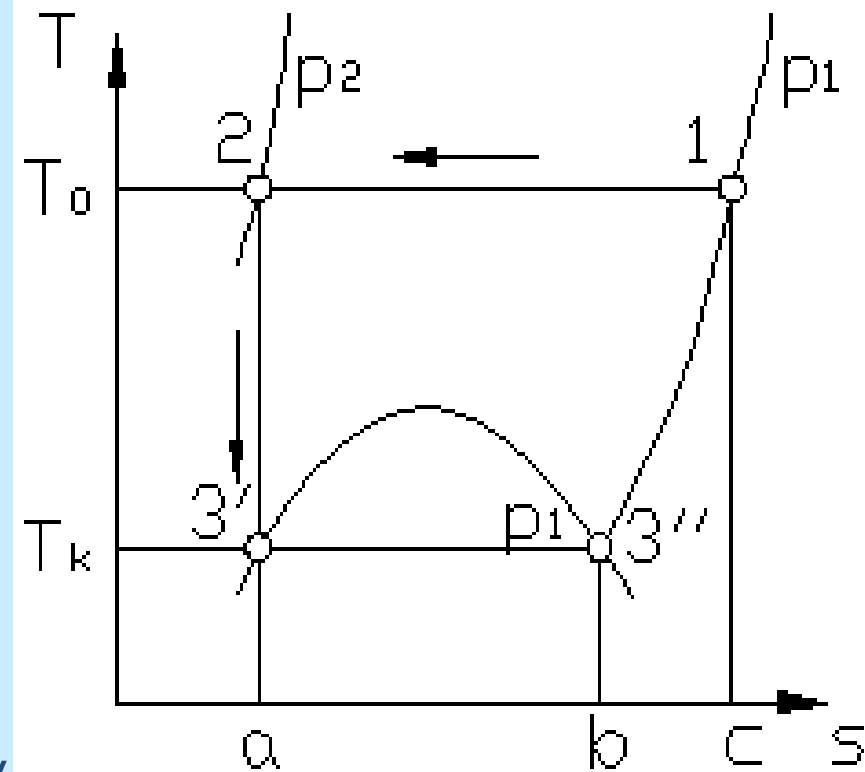
**UNIA EUROPEJSKA**  
EUROPEJSKI  
FUNDUSZ SPOŁECZNY





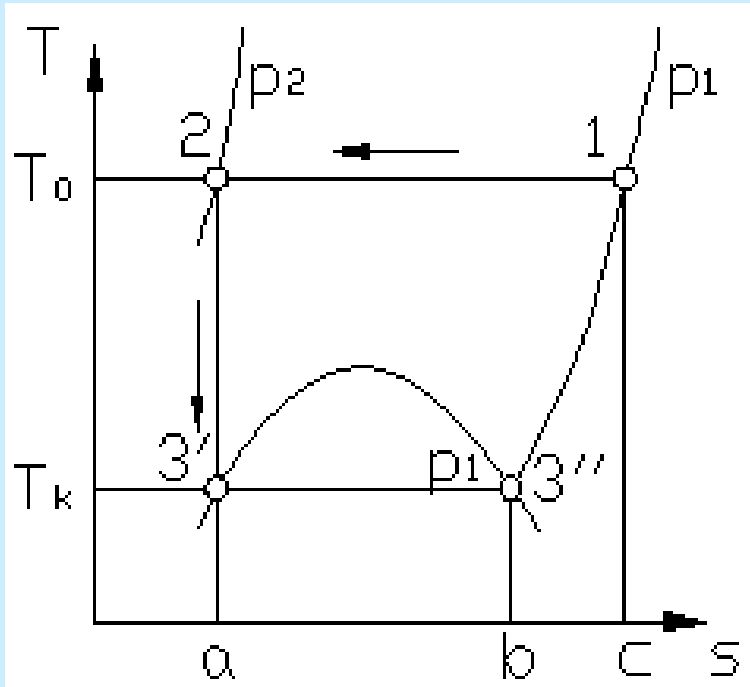
# Co zrobić żeby skroplić gaz? – idealny proces teoretyczny

Gaz o początkowym stanie oznaczonym przez punkt 1 ( $p_1, T_0$ ) zostaje najpierw izotermicznie sprężony do bardzo wysokiego ciśnienia  $p_2$  (przemiana 1-2). Ciśnienie  $p_2$  jest tak dobrane, aby entropia gazu w punkcie 2 była równa entropii cieczy wrzącej pod ciśnieniem  $p_1$ . Następnie gaz zostaje izentropowo rozprężony do ciśnienia  $p_1$  w przemianie 2-3', w trakcie której wykonuje pracę zewnętrzną równą. Po osiągnięciu punktu 3' cały gaz ulega skropleniu, jednak ciśnienie w punkcie 2 byłoby bardzo wysokie – **praktycznie niemożliwe do uzyskania przy zastosowaniu dostępnej techniki.**





Idealny proces skraplania gazów – pozwala na obliczenie minimalnej pracy skraplania gazów – nie jest stosowany w praktyce ze względu na zbyt wysokie ciśnienia punktu 2



Praca sprężania:

$$W_s = T_o (s_1 - s_2) - (h_1 - h_2)$$

Praca rozprężania  
(zewnątrzna):

$$W_r = h_2 - h_{3'}$$

$$W_{\min} = T_o (s_1 - s_{3'}) - (h_1 - h_{3'})$$



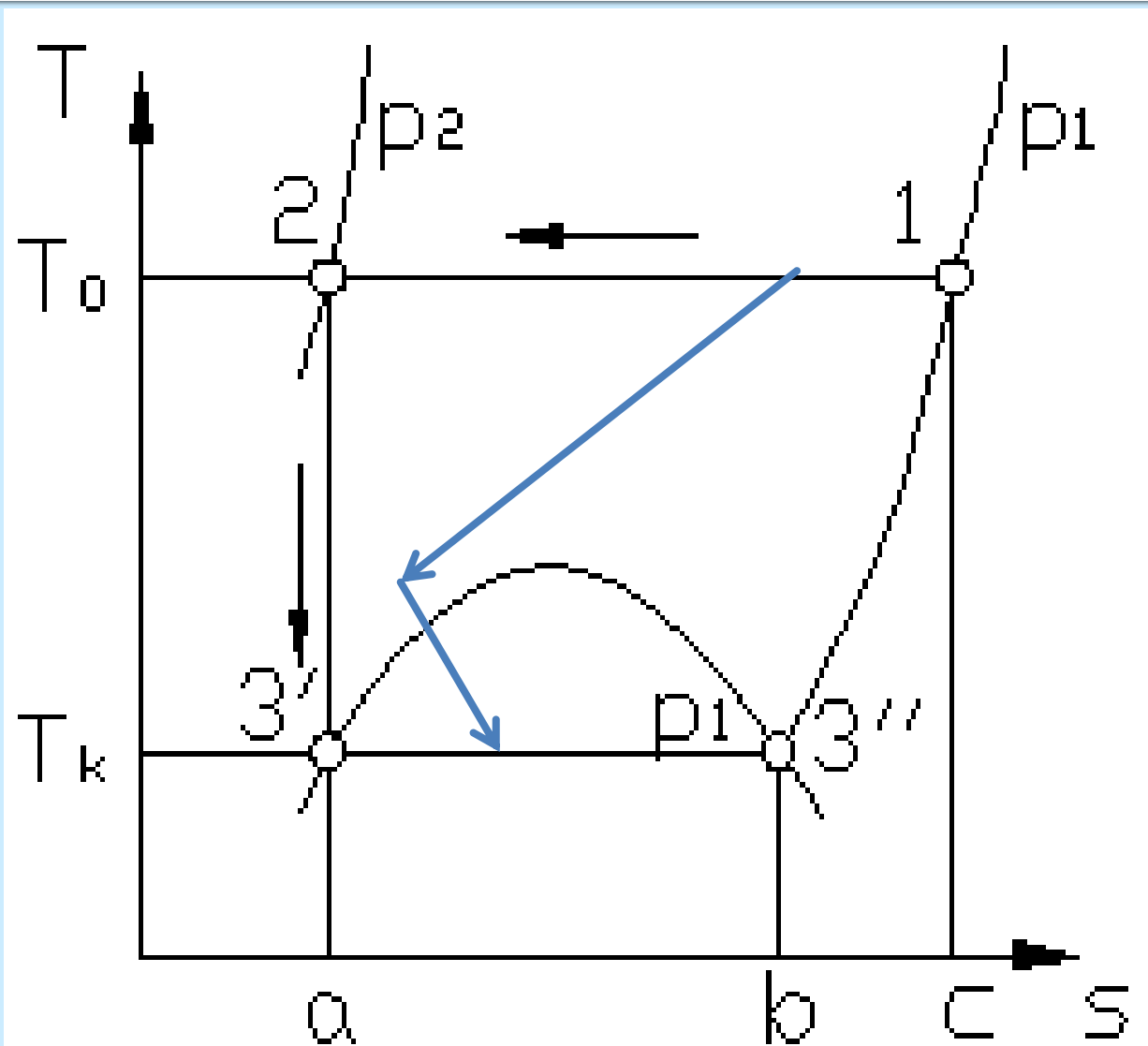
# Prace skraplania gazów

$W_{min}$  – minimalna,  $W$  - rzeczywista

Gaz	$h_1 - h_f$ kJ/kg	$W_{min}$		$W$	
		kWh/kg	kWh/l	kWh/kg	kWh/l
Hel	1563	1,9	0,237	16 - 32	2 - 4
Wodór	3953	3,4	0,238	22 - 42	1,5 – 3,0
Neon	368,6	0,372	0,445	3,5 – 5,5	3 – 4,5
Azot	433,3	0,213	0,172	1,2 – 1,8	1 – 1,5
Powietrze	428,3	0,205	0,179	1,2 – 1,8	1 – 1,5
Argon	273,1	0,134	0,186	0,8 - 1	1,1 – 1,4
Tlen	406,9	0,177	0,202	1 – 1,5	1,2 – 1,7
Metan	912,7	0,307	0,130	0,6 - 1	0,25 - 0,5



Obniżenie ciśnienia punktu 2 można uzyskać, jeżeli gaz zostanie wstępnie oziębiony w wymienniku ciepła do temperatury pozwalającej na jego skroplenie w procesie rozprężania od osiągalnych technicznie ciśnień (rzędu MPa)



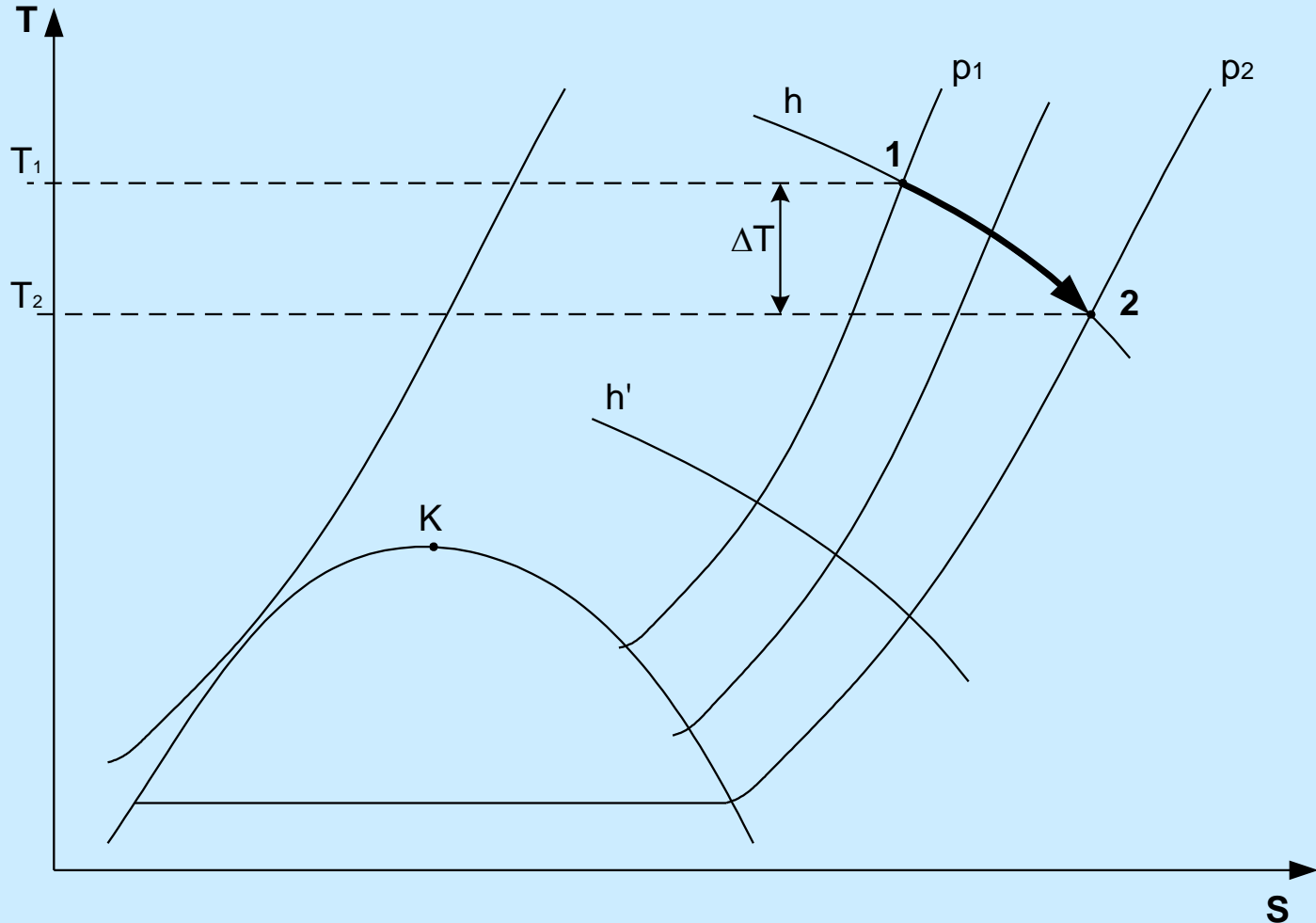


# Dławienie izentalpowe – maksymalne temperatury inwersji

Gaz	Maksymalna temperatura inwersji, K	
	eksperyment	z równania van der Walsa
Argon	765	-----
Azot	604	837
Hel – 3	39	-----
Hel – 4	46	34,3
Neon	230	-----
Powietrze	650	895
Metan	953	-----
Tlen	771	1090
Wodór	204,6	223

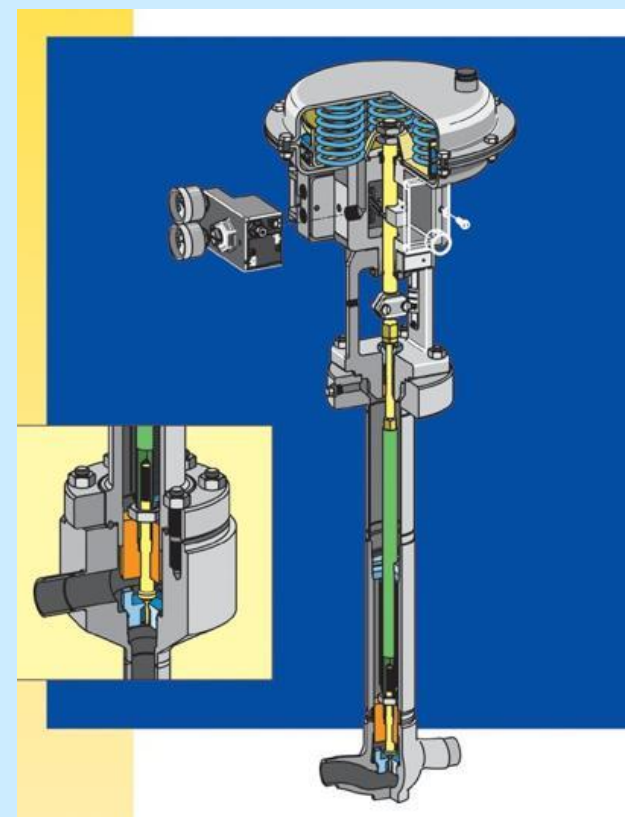
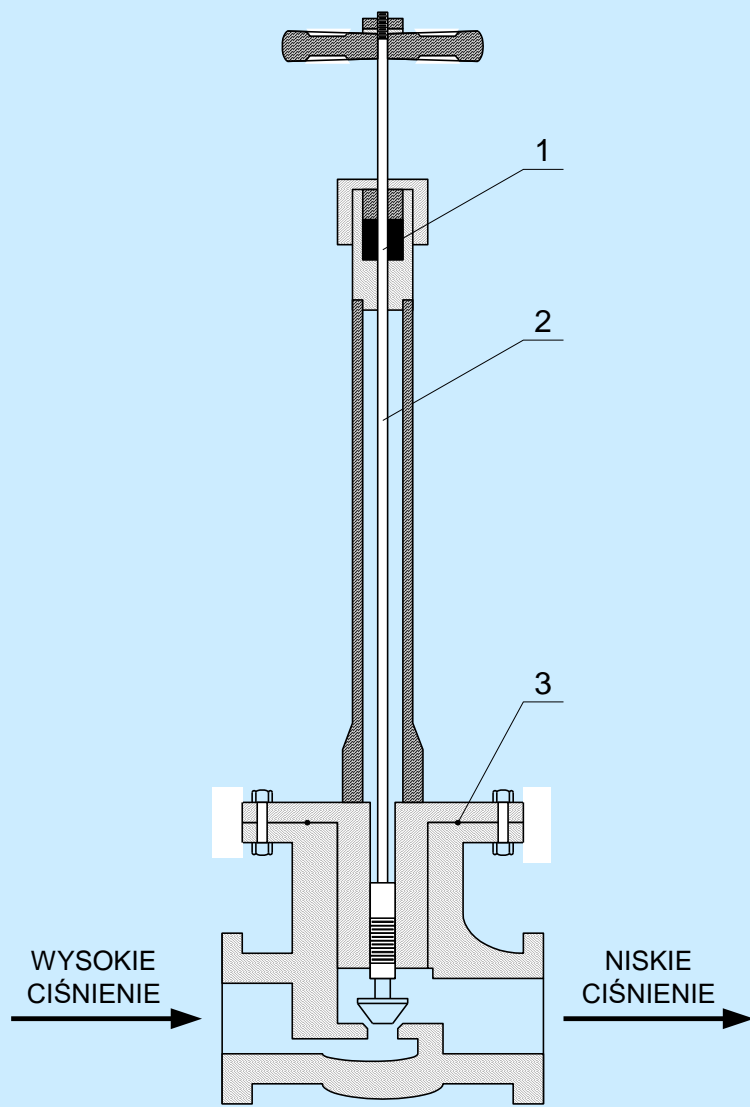


# Dławienie izentalpowe – wykres Ts





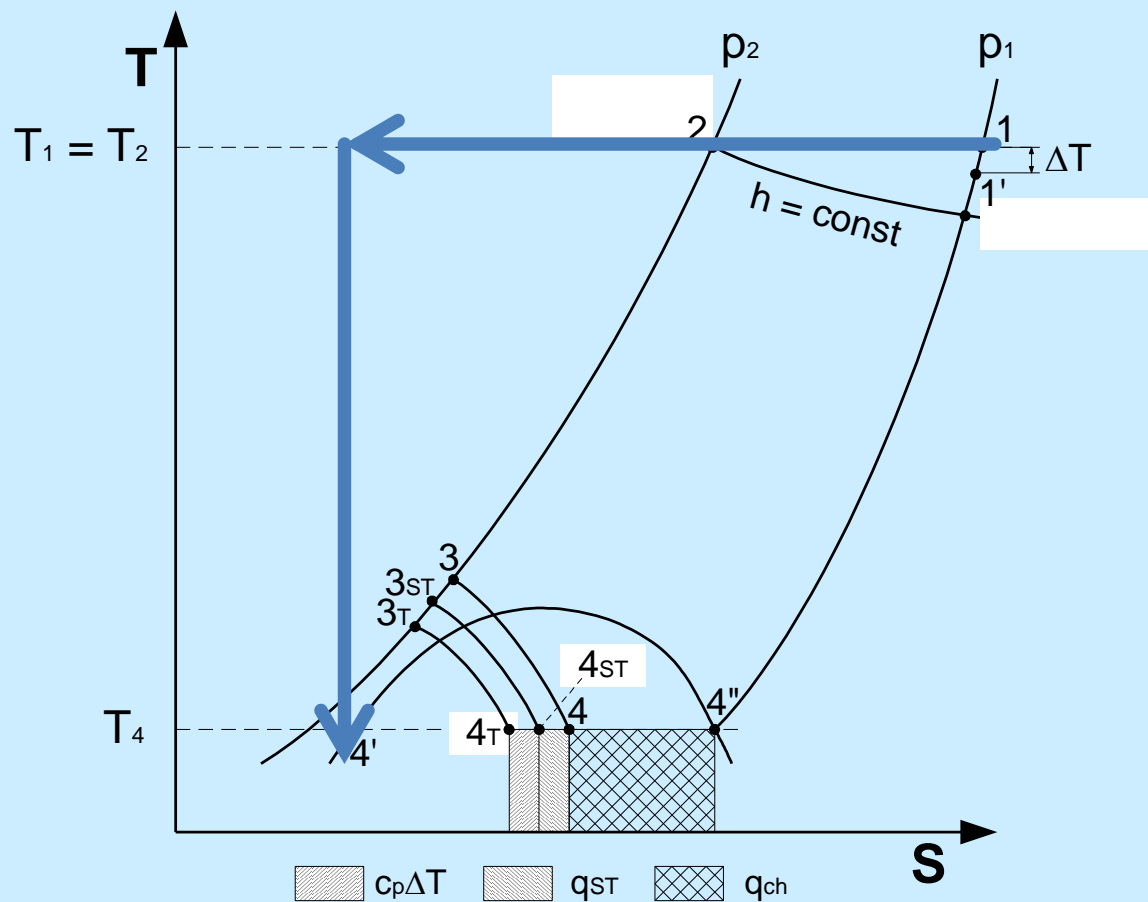
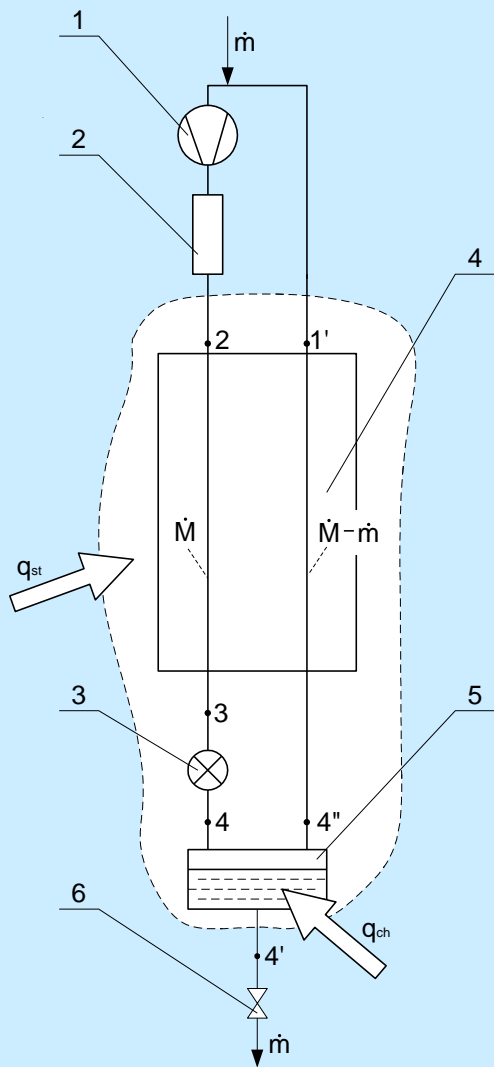
# Zawory Joule-Thomsona – stosowane w kriogenice





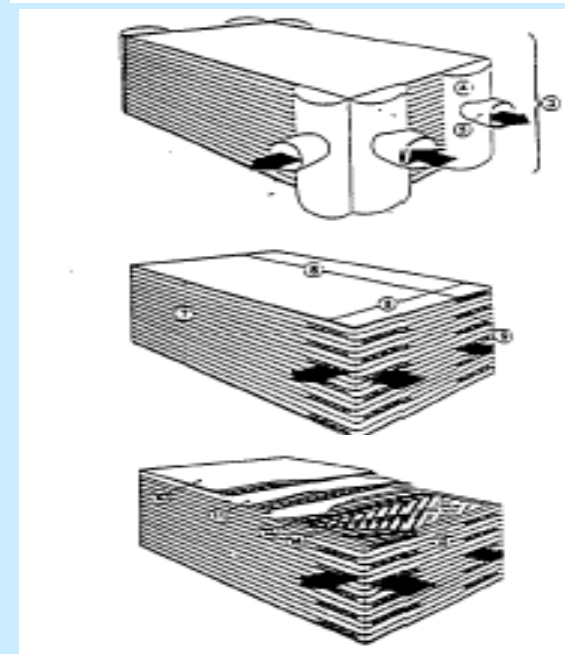
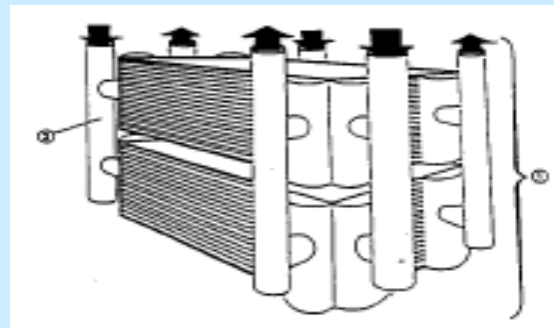
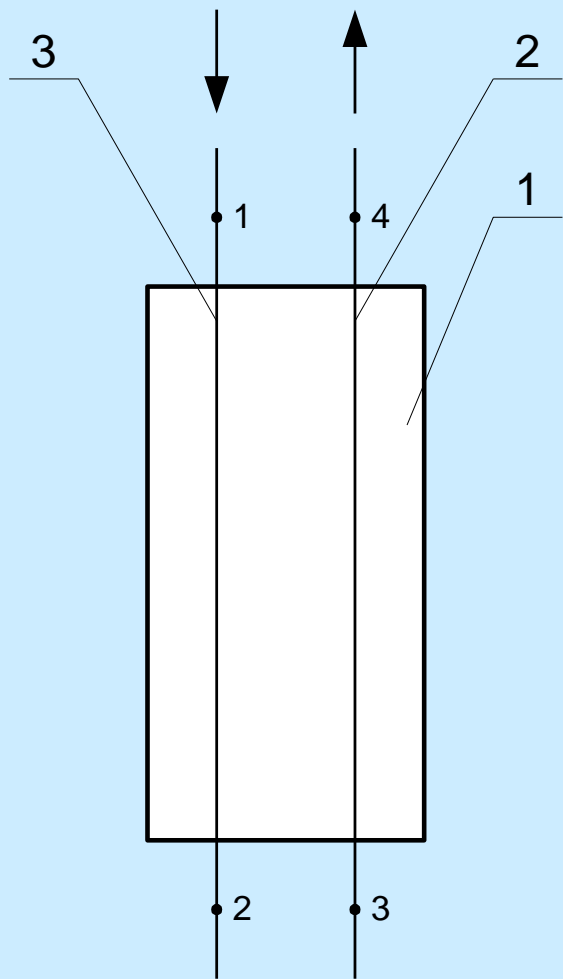


# Skraplarka Joule'a - Thomsona



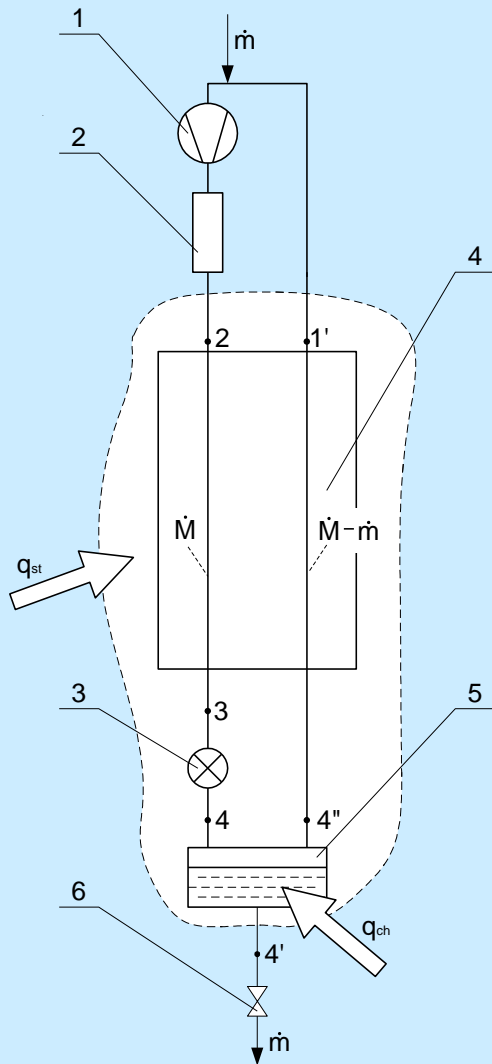


# Rekuperator – sposób na obniżenie temperatury gazu przed rozprężarką lub zaworem dławiącym





# Bilans skraplarki Joule'a - Thomsona



$$\dot{M} h_2 - \dot{m} h_{4'} - \left( \dot{M} - \dot{m} \right) h_{1'} + q_{st} = 0$$

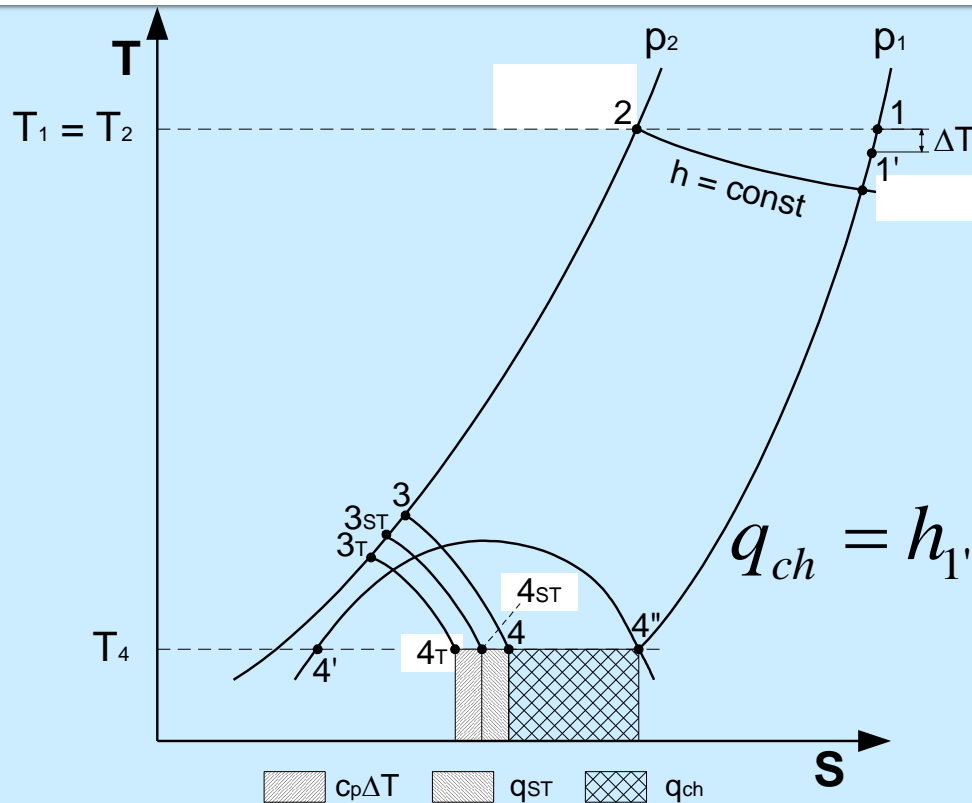
**Wydajność skraplania:**

$$x = \dot{m} / \dot{M}$$

$$x = \frac{h_1 - h_2 - c_p \Delta T - q_{st}}{h_{1'} - h_{4'}} = \frac{\Delta h_T - c_p \Delta T - q_{st}}{h_{1'} - h_{4'}}$$



# Bilans chłodziarki Joule'a-Thomsona



$$\dot{M} h_2 - \dot{M} h_{1'} + \dot{M} q_{ch} + \dot{M} q_{st} = 0$$

$$q_{ch} = h_{1'} - h_2 - q_{st} = \Delta h_T - c_p \Delta T - q_{st}$$

Maksymalna moc chłodnicza chłodziarki jest równa izotermicznemu efektowi dławienia. Rzeczywista moc chłodnicza jest niższa z powodu strat wynikających z różnicy temperatur na ciepłym końcu wymiennika oraz dopływów ciepła z otoczenia  $q_{st}$ .

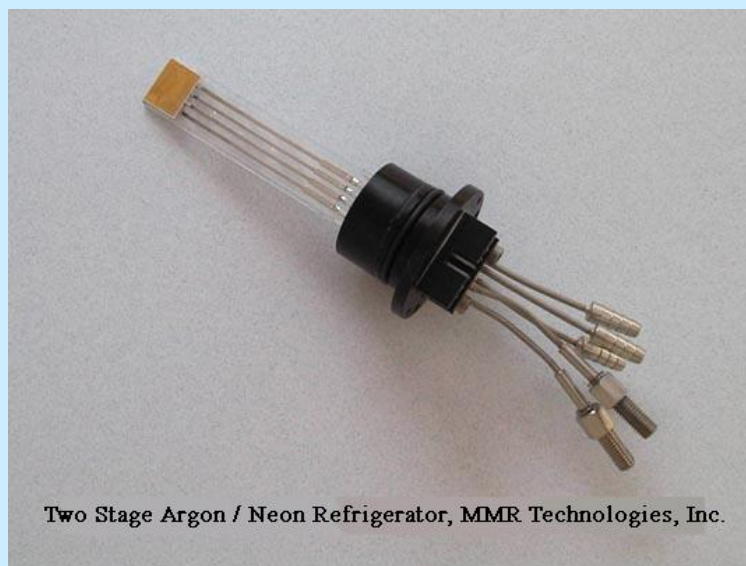


# Chłodziarki Joule'a – Thomsona

1. Moce chłodnicze chłodziarek nie przekraczają kilku procent wydajności obiegów Carnota – wykorzystuje się tam, gdzie rozwijane moce chłodnicze są niewielkie (często poniżej 1 W).
2. Straty wynikają ze skończonej różnicy temperatur na ciepłym końcu wymiennika ciepła oraz z dopływów ciepła z otoczenia.
3. Urządzenia mogą podlegać miniaturyzacji
4. Urządzenia niezawodne (brak jakichkolwiek części ruchomych)
5. Krótki czas rozruchu
6. Nie generują szumów
7. Wykorzystywane się w elektronice, technice wojskowej (chłodzenie detektorów podczerwieni), astronomii.



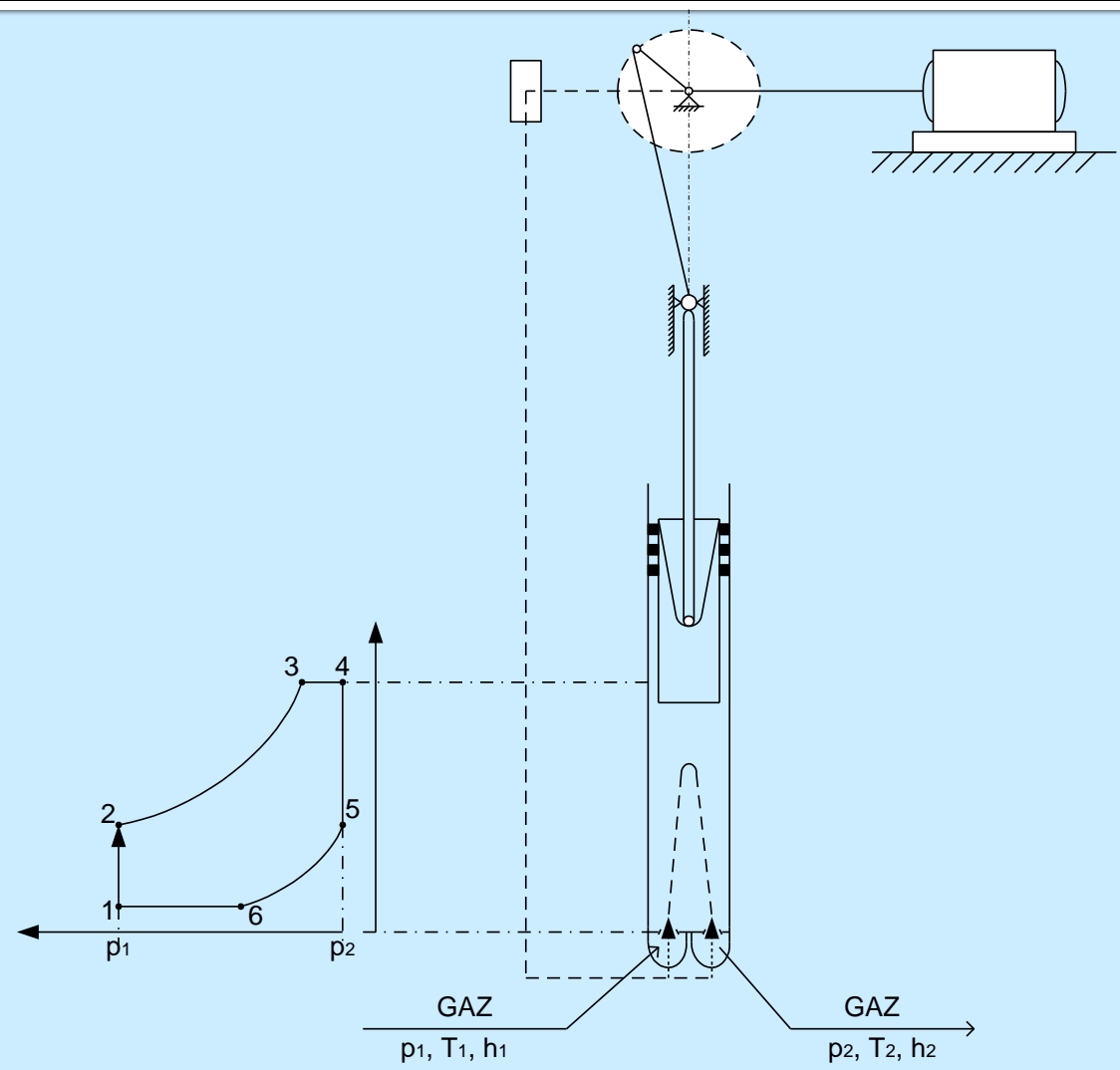
# Miniatururowe chłodziarki Joule'a-Thomsona



Two Stage Argon / Neon Refrigerator, MMR Technologies, Inc.

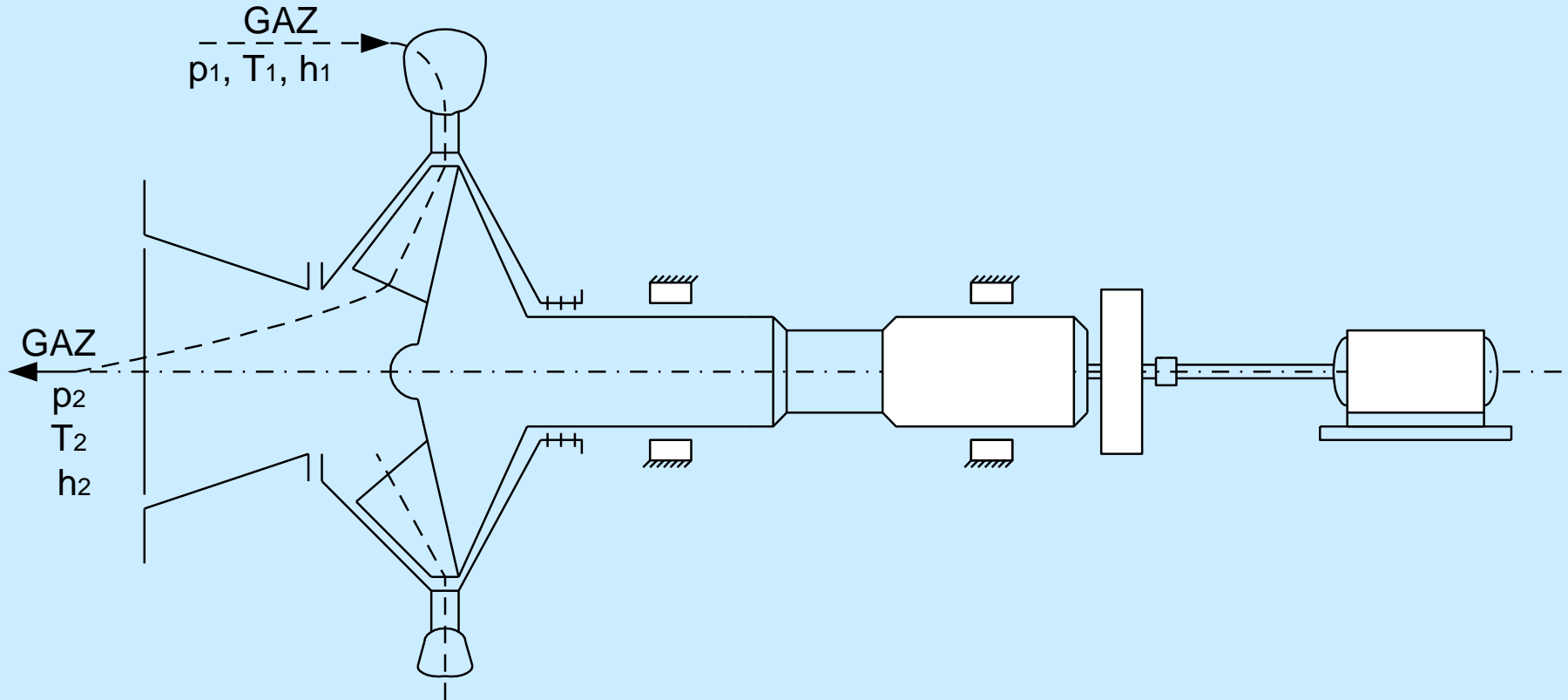


# Rozprężarka tłokowa





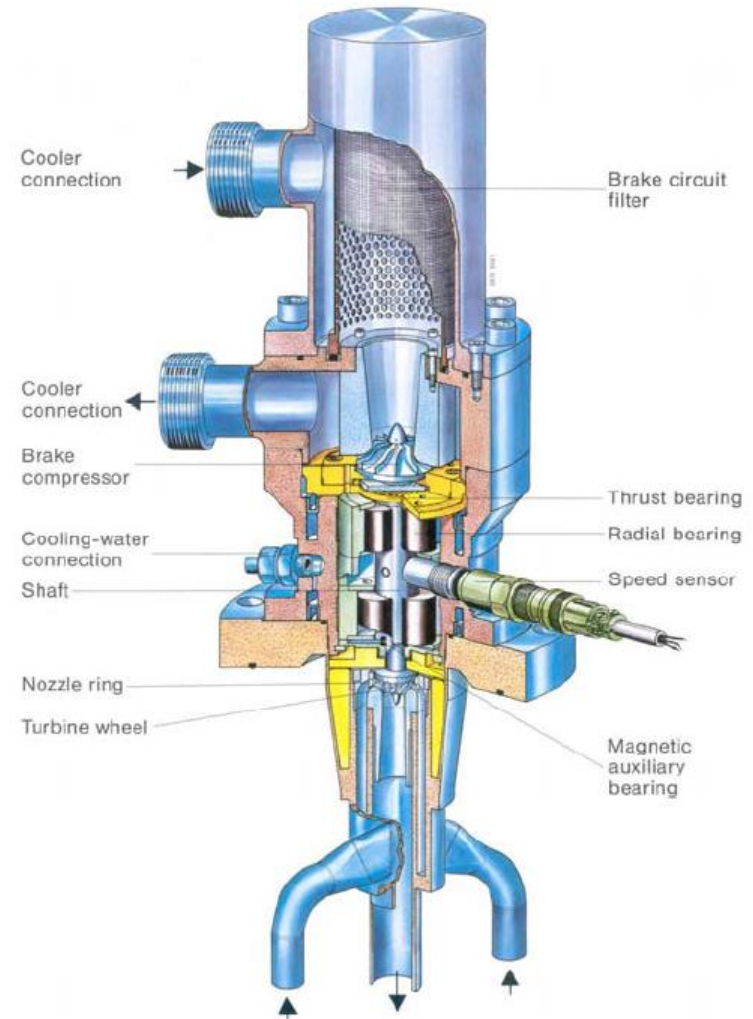
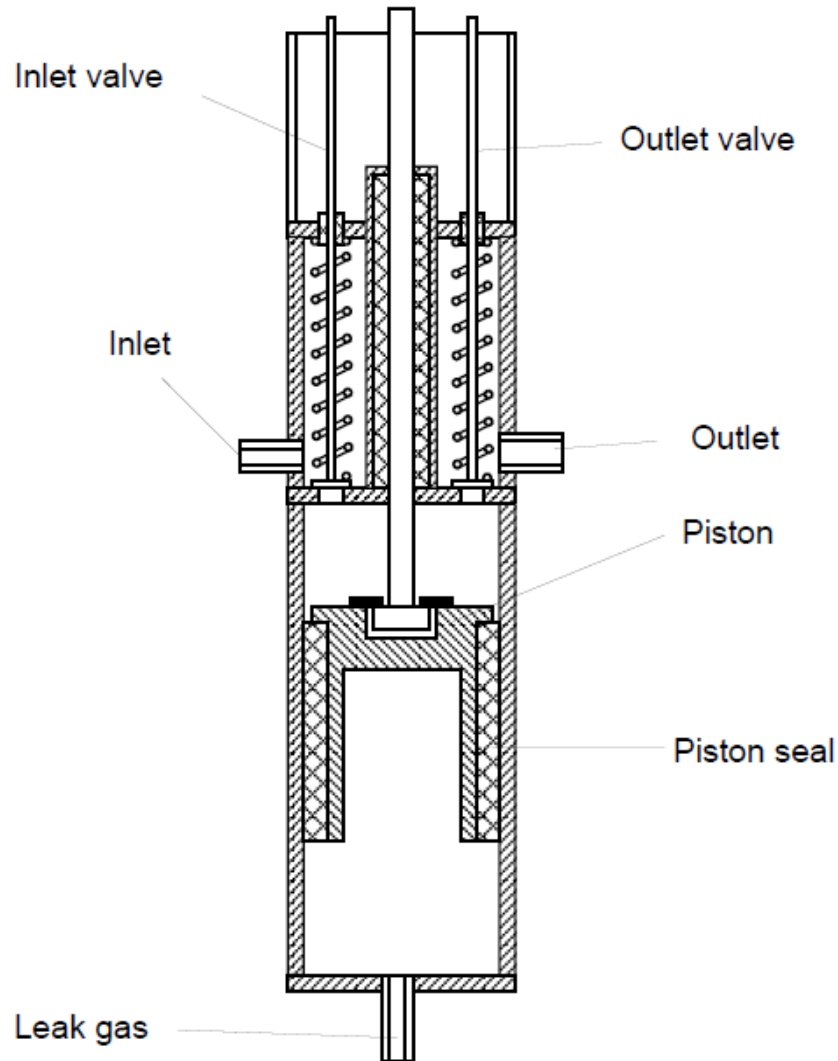
# Rozprężarka turbinowa





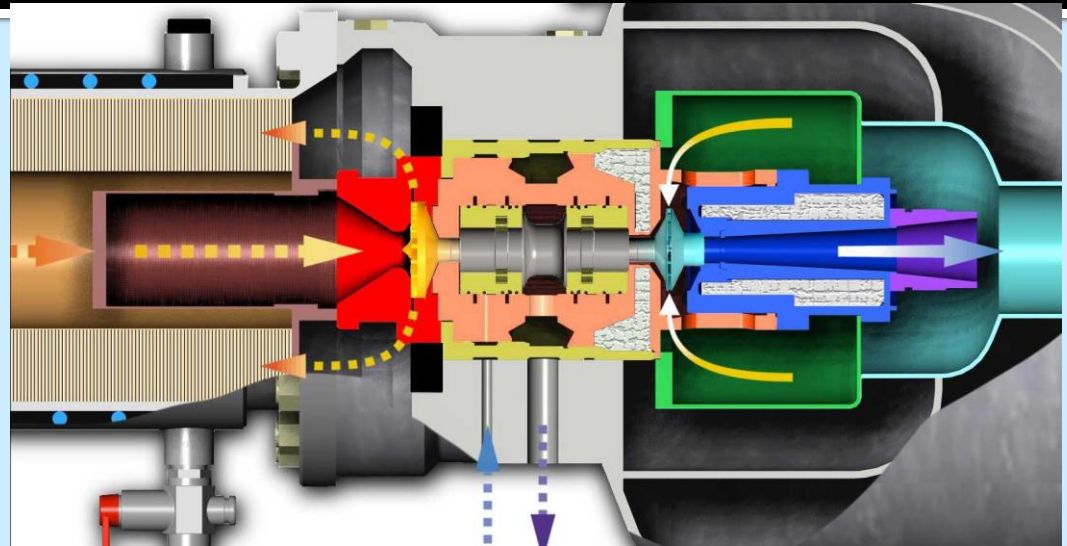
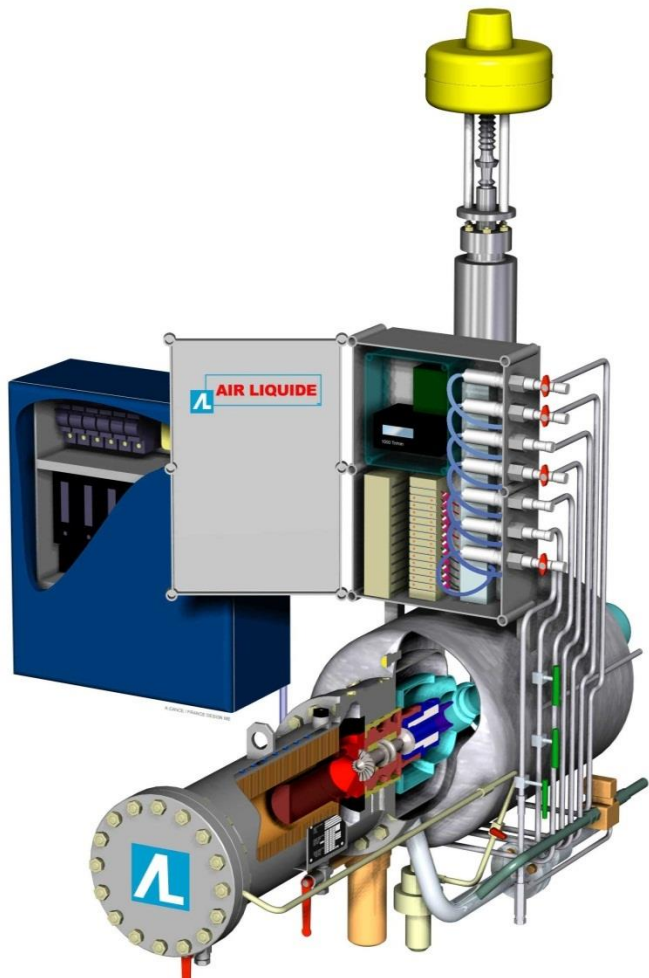


# Rozprężarki: tłokowa i turbinowa z łożyskami gazowymi





# Turborozprężarka – przykład konstrukcji

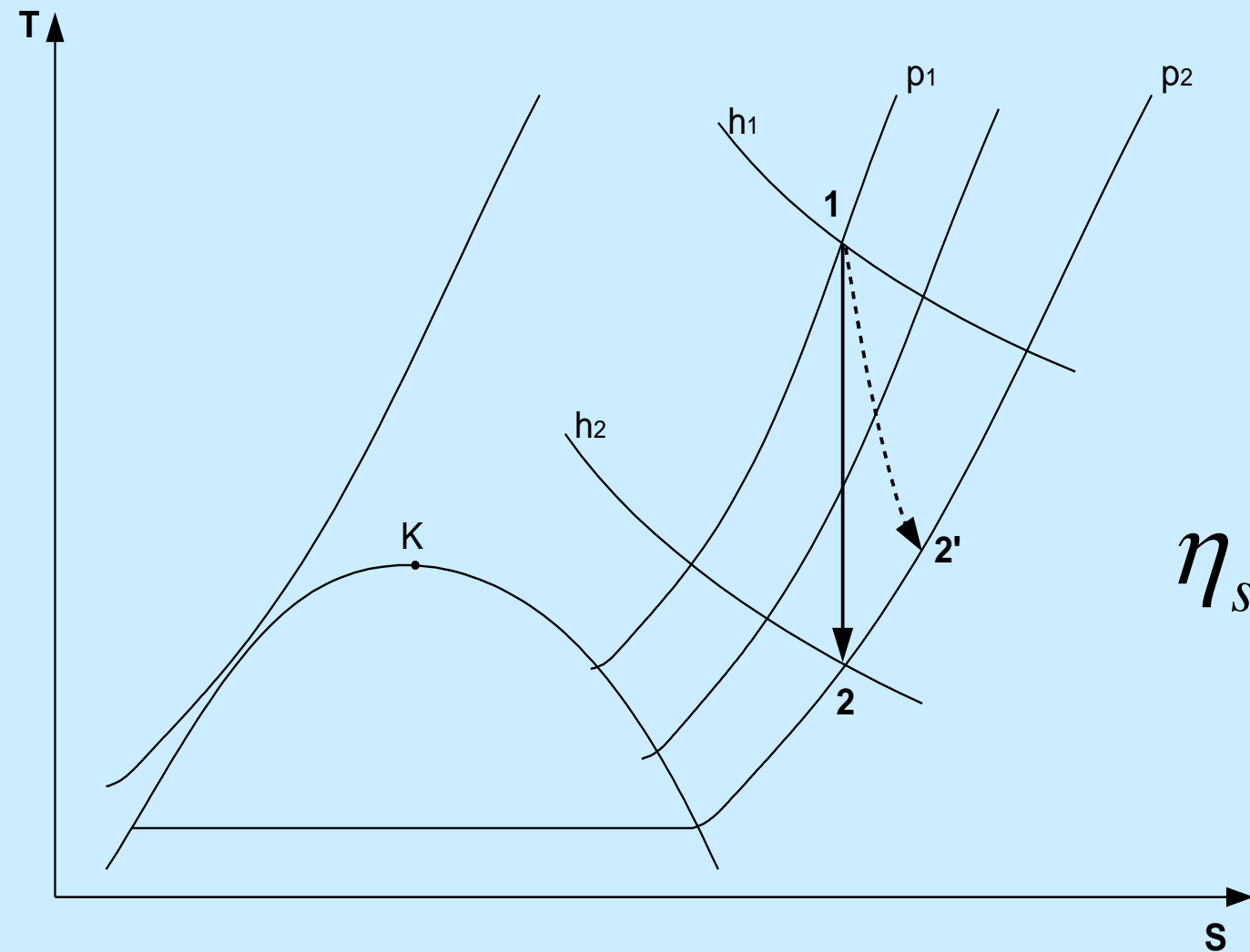


3 2 1

Kriogeniczna rozprężarka helowa: 1  
– sekcja z turbiną rozprężną,  
2 – łożysko gazowe,  
3 – sekcja z hamulcem gazowym



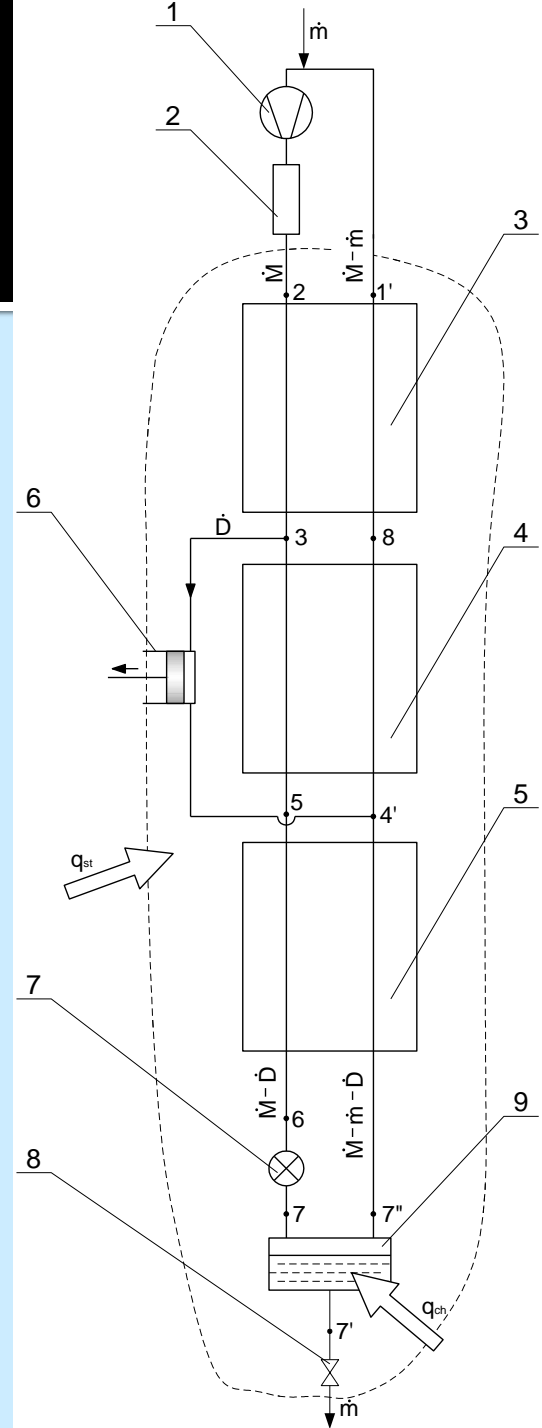
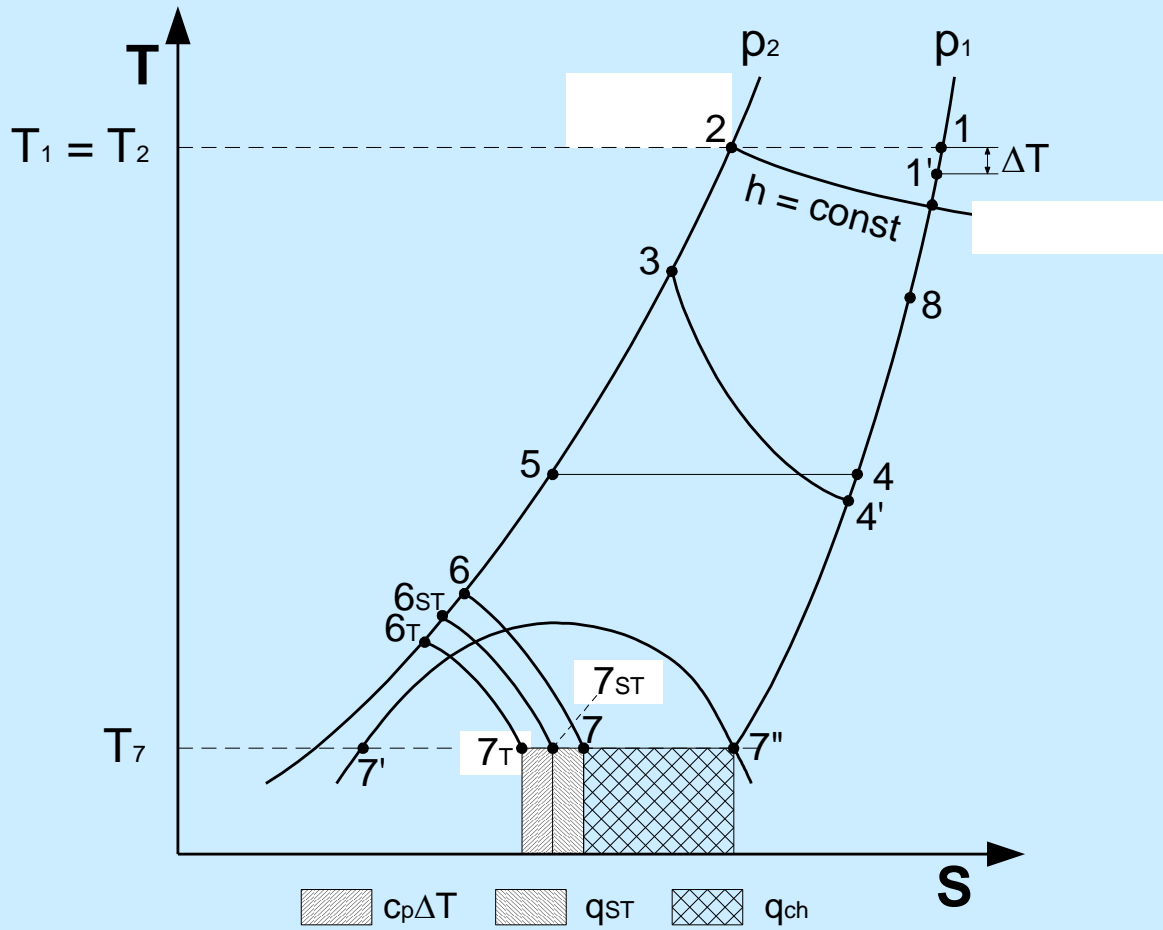
# Rozprężanie izentropowe z wykonaniem pracy zewnętrznej – sprawność izentropowa rozprężarki



$$\eta_s = \frac{h_1 - h_{2'}}{h_1 - h_2}$$



# Skraplarki Claude'a

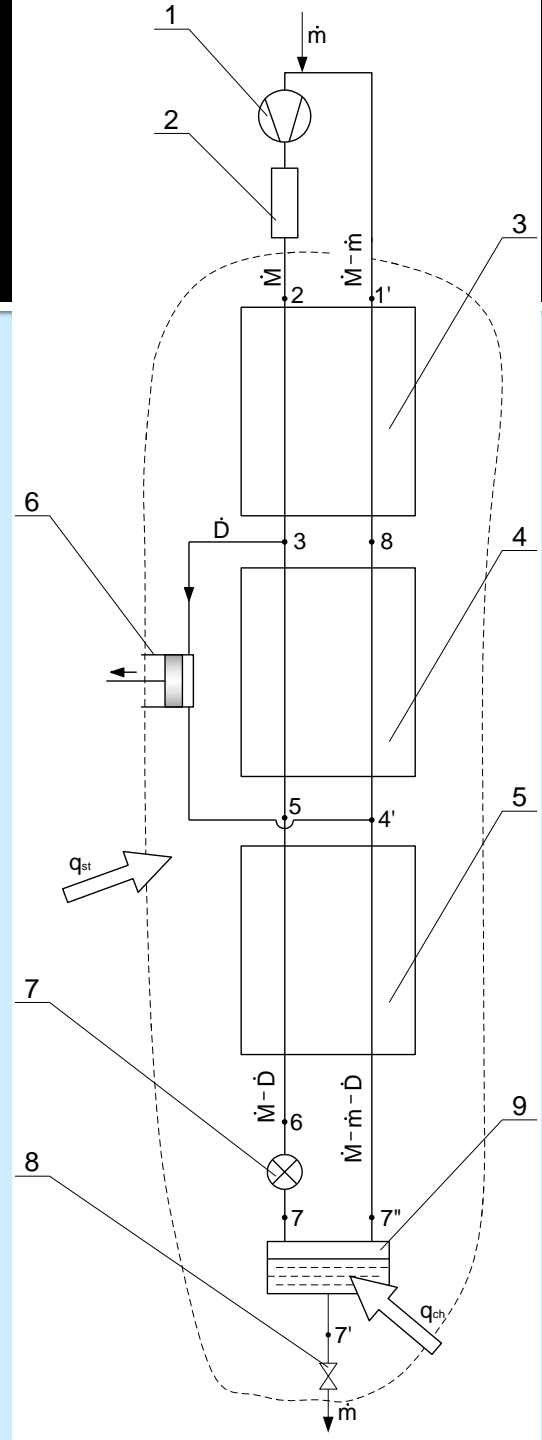




# Skraplarki Claude'a

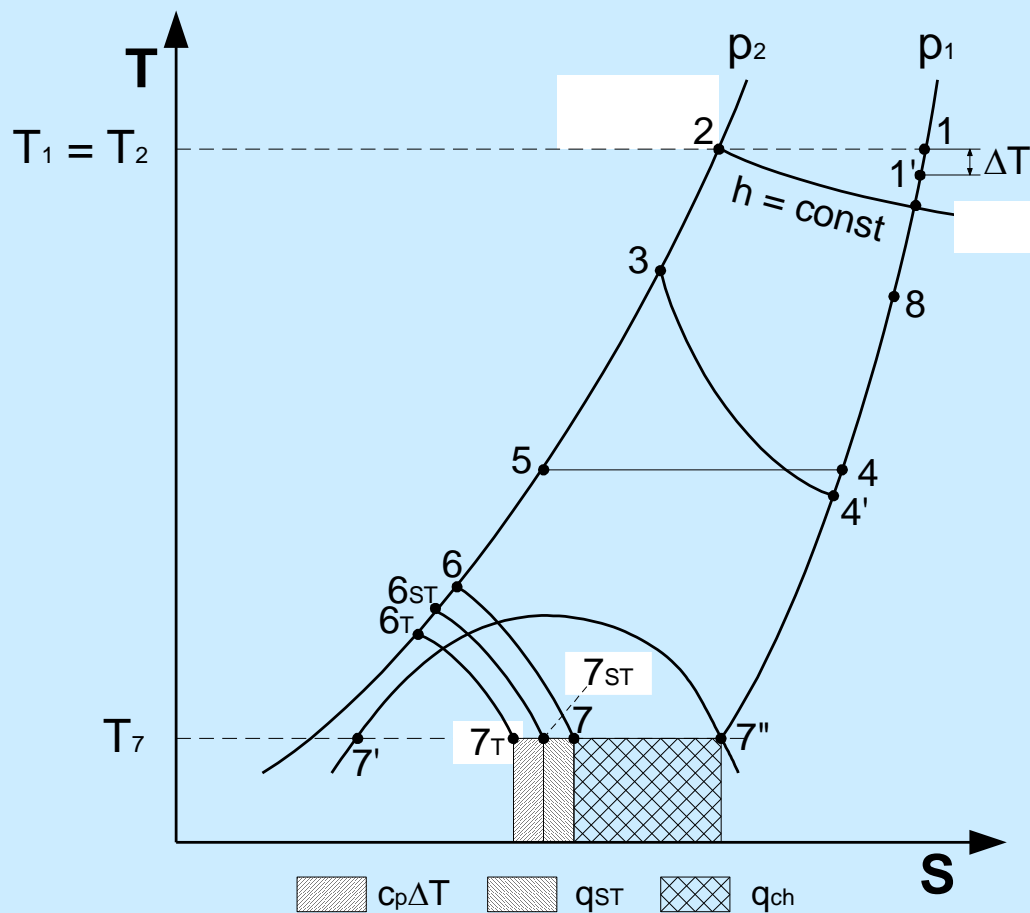
$$\dot{M} h_2 - \dot{m} h_{4'} - \left( \dot{M} - \dot{m} \right) h_{1'} + q_{st} - \dot{M}_D (h_3 - h_{4'}) = 0$$

$$x = \frac{\Delta h_T + \left( \dot{M}_D / \dot{M} \right) (h_3 - h_{4'}) - c_p \Delta T_1 - q_{st}}{h_{1'} - h_{4'}}$$





# Chłodziarki Claude'a



Wydajność skraplania skraplarki Claude'a jest większa od wydajności skraplarki Joule-Thomsona o składnik będący pracą zewnętrzną wykonaną przez rozprężarkę. Obecnie cykle Claude'a i ich modyfikacje są podstawowymi cyklami skraplarek i chłodziarek kriogenicznych o dużych wydajnościach (rzędu setek lub tysięcy watów).



# Chłodziarka 12 kW @ 4,5 K

