



Energetyka

Prof. Maciej Chorowski

Chłodnictwo & Kriogenika

Wykład 9 – Wyptyw swobodny, porównanie procesów obniżania temperatury, chłodziarki i skraplarki Joule'a-Thomsona.



KAPITAŁ LUDZKI
NARODOWA STRATEGIA SPÓJNOŚCI



Politechnika Wrocławska

UNIA EUROPEJSKA
EUROPEJSKI
FUNDUSZ SPOŁECZNY

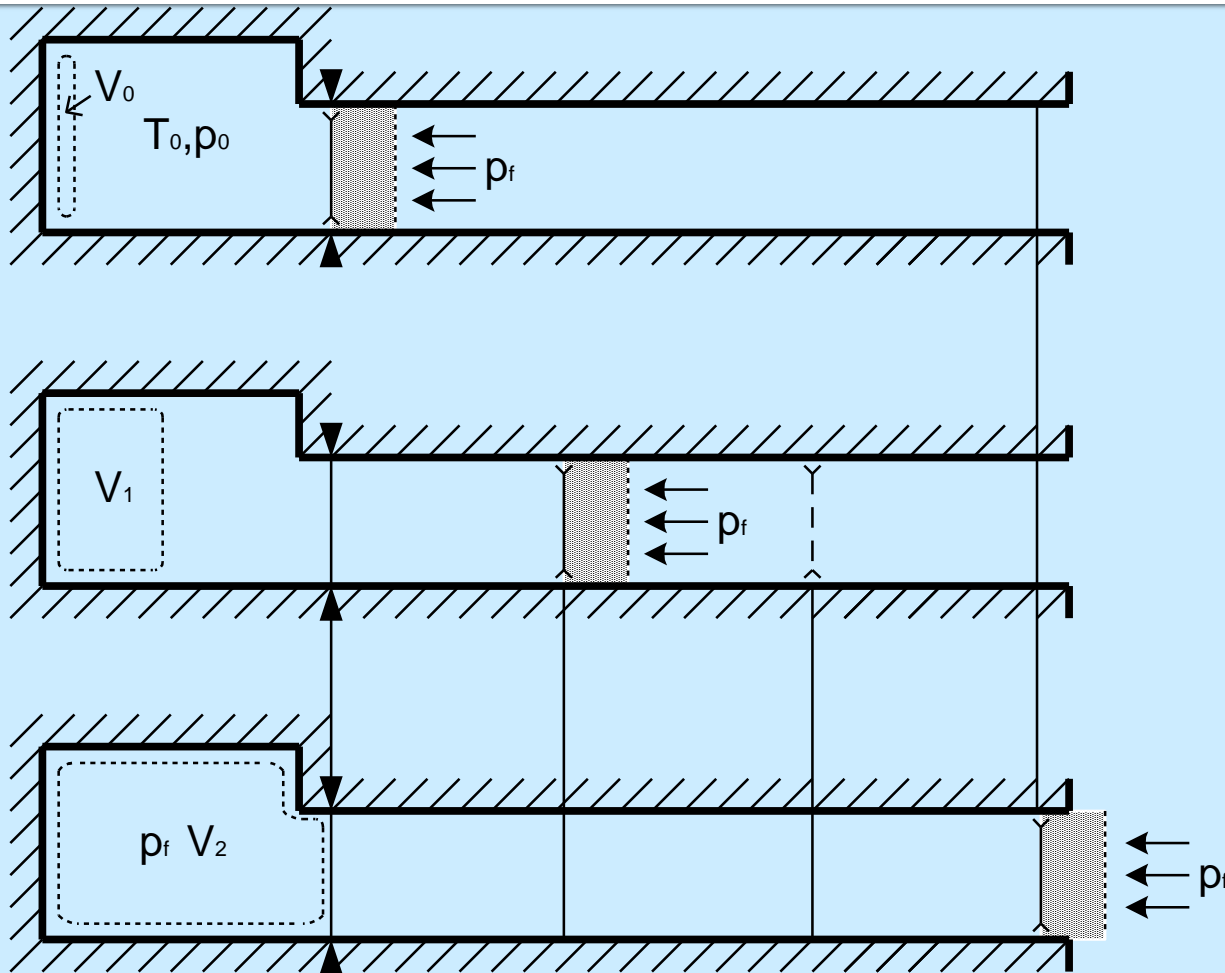




Treść wykładu

- Wyptyw swobodny
- Porównanie procesów wewnętrznego obniżania temperatury

Wyptyw swobodny ze stałej objętości



Gaz wykonuje pracę zewnętrzną przeciwko sile pochodzącej od ciśnienia p_f
Praca nie jest pracą użyteczną – zostaje rozproszona w otoczeniu



Wyptyw swobodny ze stałej objętości

1. Adyabatyczna ekspansja gazu (nie ma wymiany ciepła między gazem a ściankami naczynia)
2. Proces nierównowagowy (ciśnienie panujące w rozprężanym gazie nie jest równoważone przez ciśnienie zewnętrzne)
3. Stała objętość naczynia
4. Ciśnienie otoczenia stałe ($p_f = \text{const.}$)
5. Gaz wykonuje pracę zewnętrzną przeciwko sile pochodzącej od ciśnienia p_f
6. Praca nie jest pracą użyteczną – przekazywana do otoczenia i tam rozpraszana



Wyptyw swobodny ze stałej objętości

Wyznaczenie końcowej temperatury gazu:

I zasada termodynamiki dla jednostkowej ilości gazu (proces jest adiabatyczny – zmiana energii wewnętrznej gazu jest równa wykonanej pracy)

$$u_f - u_0 = - p_f (v_f - v_0)$$

gdzie:

u_0, u_f – początkowa i końcowa energia wewnętrzna gazu

v_0, v_f – początkowa i końcowa objętość gazu



Wyływ swobodny ze stałej objętości

Dla gazu doskonałego:

$$u_f - u_0 = c_v (T_f - T_0) \quad p_0 v_0 = R T_0$$

$$p_f v_f = R T_f \quad c_v = R / (\kappa - 1)$$

Po podstawieniu powyższych

do :

$$u_f - u_0 = - p_f (v_f - v_0)$$

Otrzymujemy:

$$T_f - T_0 = \frac{\kappa - 1}{\kappa} T_0 \left(\frac{p_f}{p_0} - 1 \right)$$

$$\frac{T_0}{T_f} = \frac{\kappa}{1 + \left(p_f / p_0 \right) (\kappa - 1)}$$



Wyptyw swobodny ze stałej objętości

Wyznaczenie quasi różniczkowego współczynnika swobodnego wyptywu zależnego tylko od parametrów początkowych gazu:

$$\mu_w = \left(\frac{dT}{dp} \right)$$

$$\mu_w = \frac{T_0}{p_0} \frac{\kappa - 1}{\kappa} = \text{idem}$$

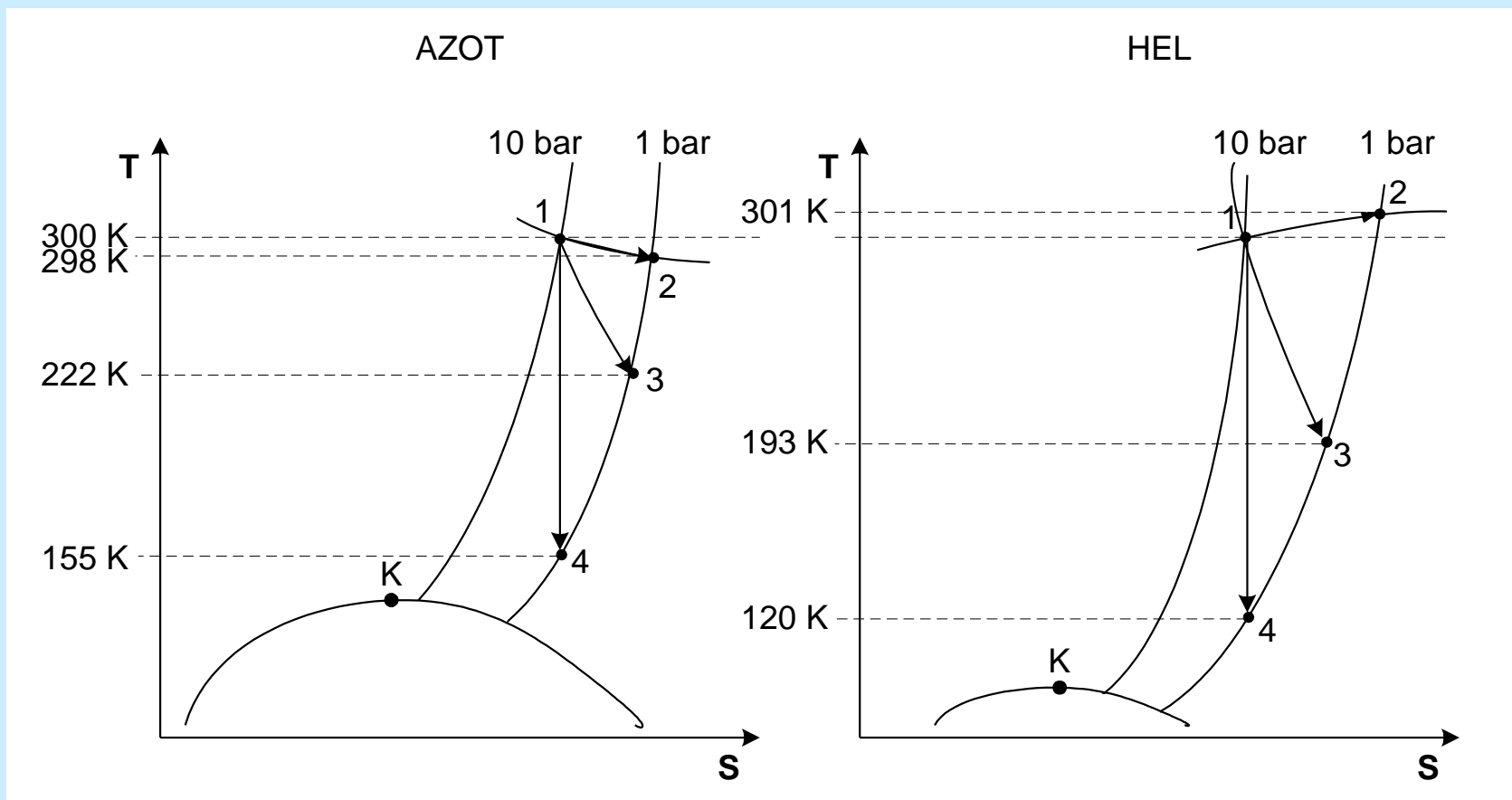
Jednostkowa zmiana entalpii gazu pozostałego w naczyniu:

$$h_0 - h_f = v_0 (p_0 - p_f) \quad \text{gaz rzeczywisty}$$

$$h_0 - h_f = RT_0 \left(1 - \frac{p_f}{p_0} \right) \quad \text{gaz doskonały}$$



Porównanie metod oziębiania wewnętrznego z wykorzystaniem gazów



1-4 – rozprężanie izentropowe, 1 – 3 – wpływ swobodny, 1 – 2 - dławienie



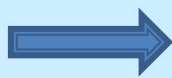
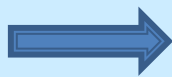
Treść wykładu

- Skraplanie gazów w zależności od temperatury krytycznej
- Idealny obieg skraplania gazów
- Minimalna praca skraplania gazów
- Skraplarki i chłodziarki Joule'a-Thomsona
- Skraplarki i chłodziarki Claude'a




Gazy kriogeniczne charakteryzują się niskimi normalnymi temperaturami wrzenia (poniżej 120 K)

Temperatury krytyczne i punktu potrójnego gazów kriogenicznych

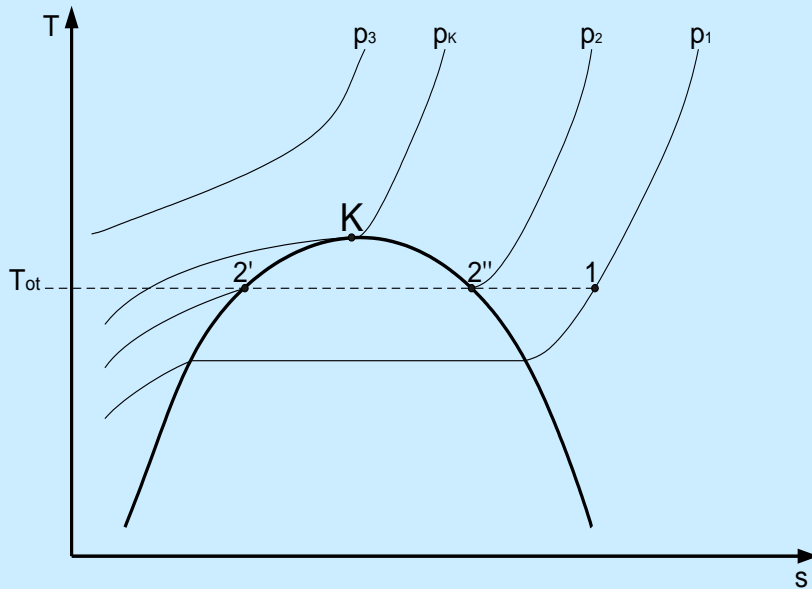


		Hel	Wodór	Neon	Azot	Powietrze	Fluor	Argon	Tlen	Metan	Krypton	Ksenon
		He	H ₂	Ne	N ₂	---	F ₂	Ar	O ₂	CH ₄	Kr	Xe
	Masa cząsteczkowa [g]	4,003	2,016	20,18	28,02	28,96	38,00	39,95	32,00	16,04	83,30	131,30
Ciecz w normalnej temp. wrzenia	Normalna temperatura wrzenia T _N [K]	4,2	20,3	27,1	77,3	78,8	84,9	87,3	90,2	111,6	119,8	165,0
	Gęstość cieczy [kg/m ³]	124,9	70,8	1207	808	874	1507	1395	1140	423	2413	2941
	Gęstość par w T _N [kg/m ³]	16,90	1,34	9,58	4,62	---	5,63	5,77	4,47	1,82	8,33	10,00
	Ciepło parowania [kJ/kg]	20,7	445,6	86,6	198,3	205,1	166,3	161,6	212,9	511,5	108,0	95,6
	Ciepło właściwe [kJ/kg · K]	4,56	9,78	1,84	2,04	1,97	1,54	1,14	1,70	3,45	0,46	0,44
	Lepkość × 10 ⁶ [kg/m · s]	3,57	13,06	124,00	157,90	168,00	244,70	252,10	188,00	118,60	372,00	450,00
	Przewodność cieplna [mW/m · K]	27,2	118,5	113,0	139,6	141,0	148,0	123,2	151,4	193,1	89,2	43,5
	Stała dielektryczna [-]	1,0492	1,226	1,188	1,434	1,445	1,43	1,52	1,4837	1,6758		
Gaz	Temperatura krytyczna [K]	5,20	32,98	44,40	126,20	133,30	144,31	150,70	154,58	190,70	209,39	289,74
	Ciśnienie krytyczne [MPa]	0,227	1,29	2,71	3,39	3,90	5,57	4,87	5,04	4,63	5,51	5,84
	Gęstość gazu przy p=0,1 MPa i T= 273,15 K [kg/m ³]	0,178	0,089	0,90	1,25	1,29	1,53	1,79	1,43	0,717	3,75	5,90
	Współczynnik odparowania V _{odp} [K · cm ³ /J] *	117,0	8,9	2,6	1,4	1,2		0,94	0,86	0,87	0,69	0,41
	Temperatura w punkcie potrójnym [K]	--	13,803	24,56	63,148	---	53,5	83,8	54,35	88,7	115,76	161,35
	Ciśnienie w punkcie potrójnym [kPa]	--	7,042	43,0	12,53	---	0,22	68,6	0,15	10,1	73,2	81,6
	V ₂ /V ₁ [-]	7,4	52,8	126,0	175,0	---	269,1	242,0	255,0	232,0	289,0	294,9
	V ₃ /V ₁ [-]	701	788	1341	646	678	977	779	797	590	643	518

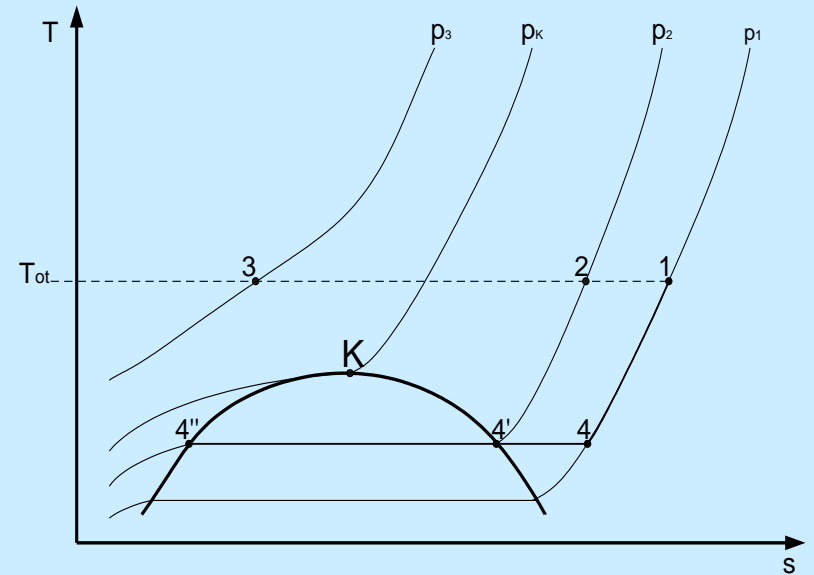


Tematyka wykładu – jak można osiągnąć temperatury kriogeniczne


a



b



Izotermiczne sprężanie gazów a) nietrwałych, podlegających skropleniu przez sprężenie przy temperaturze otoczenia, b) trwałych, niepodlegających skropleniu przez izotermiczne sprężenie



Jak skropić gazy: wg Jonathana Swifta, Podróże Guliwera, 1726

Jedni z tych pracowników naukowych napętliali powietrzem ogromne, skórzane wory, a następnie z nagła na nich siadali, gwałtownie je ugniatając... Sztukmistrz generalny wyjaśnił nam krótko, że pierwsi z jego asystentów zajmowali się zgęszczaniem powietrza, aby uczynić z niego substancję twardą jak kamień.

(Podróże Guliwera, wg Jonathana Swifta opracowali Jacek Bocheński i Marian Brandys, Nasza Księgarnia, 1967).