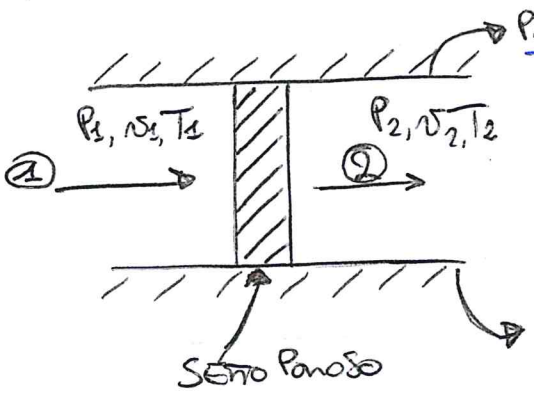
*CICLO JOULE - [illegible]

GAS REALE E GAS REALE

- CONSIDERIAMO UN GAS AD ALTA PRESSIONE FORZATO ATTRAVERSO UN SETTO POROSO AL DI LÀ DEL QUALE LA PRESSIONE È INFERIORE



$\Rightarrow$ CONDIZIONI STAZIONARIE $\dot{m}_1 = \dot{m}_2$

$P_2 < P_1$ (CADUTA DI PRESSIONE, ES. VALVOLA)

- APPLICHIAMO IL PRINCIPIO DI CONSERVAZIONE DELL'ENERGIA X I SISTEMI APERTI IN CONDIZIONI STAZIONARIE

$$h_1 + \frac{V_1^2}{2} + g z_1 + \dot{Q} + \dot{W} = h_2 + \frac{V_2^2}{2} + g z_2$$

HP: $g z_1 = g z_2$

$\frac{V_1^2}{2} - \frac{V_2^2}{2} \simeq 0$

$$\Downarrow$$

$$h_1 = h_2 \Rightarrow$$ TRASFORMAZIONE ISOENTALPICA

- IN CASO L'ESPANSIONE ADIABATICA L'ENTALPIA RIMANE COSTANTE
- CONSIDERIAMO UN GAS REALE $\Rightarrow h = h(P,T)$ (X LA REGOLA DELLE FASI NO BISOGNA DI 2 VARIABILI INDIPENDENTI X DEFINIRE LO STATO)

$$dh = \left(\frac{\partial h}{\partial P}\right)_T dP + \left(\frac{\partial h}{\partial T}\right)_P dT$$

$\left(\frac{\partial h}{\partial T}\right)_P = c_p$ (CALORE SPECIFICO A PRESSIONE COSTANTE)

$$\Downarrow$$

$$dh = \left(\frac{\partial h}{\partial P}\right)_T dP + c_p dT$$

$\rightarrow$ RICORDANDO $T ds = dh - v dP$ (SOSTITUISCO NELLA RELAZIONE SOPRA dh)

$$\underbrace{dh}_{} \quad T ds + v dP = \left(\frac{\partial h}{\partial P}\right)_T dP + c_p dT \quad \text{(DIVIDO PER } T\text{)}$$

$$ds = \left[\left(\frac{\partial h}{\partial P}\right)_T dP - v dP + c_p dT\right] \frac{1}{T}$$

$$ds = \frac{1}{T}\left\{\left[\left(\frac{\partial h}{\partial P}\right)_T - v\right]dP + c_p\,dT\right\} \quad \bullet$$

$$\rightarrow ds = \left(\frac{\partial s}{\partial P}\right)_T dP + \left(\frac{\partial s}{\partial T}\right)_P dT \quad \bullet \quad s = s(P,T)$$

→ CONFRONTO LE 2 ESPRESSIONI DI ds

$$\Downarrow$$

$$\left(\frac{\partial s}{\partial P}\right)_T = \frac{1}{T}\left[\left(\frac{\partial h}{\partial P}\right)_T - v\right] \quad *$$

$$\left(\frac{\partial s}{\partial T}\right)_P = \frac{1}{T}\cdot c_p = \frac{c_p}{T} \quad ** = \left(\frac{\partial h}{\partial T}\right)_P \frac{1}{T}$$

→ DERIVO LA $*$ RISPETTO A T, DERIVO LA $**$ RISPETTO A P

$$\frac{\partial^2 s}{\partial T\,\partial P} = -\frac{1}{T^2}\left[\left(\frac{\partial h}{\partial P}\right)_T - v\right] = \frac{\partial}{\partial T}\left(\frac{\partial s}{\partial P}\right)$$

$$** \quad \frac{\partial^2 s}{\partial P\,\partial T} = \frac{\partial}{\partial P}\left(\frac{\partial s}{\partial T}\right)_P = \frac{1}{T}\left(\frac{\partial^2 h}{\partial P\,\partial T}\right)$$

$$* \quad \frac{\partial^2 s}{\partial T\,\partial P} = \frac{\partial}{\partial T}\left(\frac{\partial s}{\partial P}\right)_T = -\frac{1}{T^2}\left[\left(\frac{\partial h}{\partial P}\right)_T - v\right] + \frac{1}{T}\frac{\partial^2 h}{\partial P\,\partial T} - \frac{1}{T}\left(\frac{\partial v}{\partial T}\right)_P$$

RICORDANDO CHE $\frac{\partial}{\partial x}\left(\frac{\partial z}{\partial y}\right)_x = \frac{\partial}{\partial y}\left(\frac{\partial z}{\partial x}\right)_y$ POSSO EGUAGLIARE I 2 TERMINI SOPRA

$$-\frac{1}{T^2}\left[\left(\frac{\partial h}{\partial P}\right)_T - v\right] + \frac{1}{T}\frac{\partial^2 h}{\partial P\,\partial T} - \frac{1}{T}\left(\frac{\partial v}{\partial T}\right)_P = \frac{1}{T}\frac{\partial^2 h}{\partial P\,\partial T}$$

$$\Downarrow$$

$$* \quad \boxed{\left(\frac{\partial h}{\partial P}\right)_T = -T\left(\frac{\partial v}{\partial T}\right)_P + v} \quad * \rightarrow \text{SOSTITUISCO NELLA RELAZIONE DEL DIFFERENZIALE DI } dh = \left(\frac{\partial h}{\partial P}\right)_T dP + \left(\frac{\partial h}{\partial T}\right)_P dT$$

$$dh = \left[-T\left(\frac{\partial v}{\partial T}\right)_p + v \right] dP + c_p\, dT$$

$\Downarrow$

X UNA ISOENTALPICA $dh = 0$

$$\left[T\left(\frac{\partial v}{\partial T}\right)_p - v \right] dP = c_p\, dT$$

$$dT = \left(\frac{\partial T}{\partial P}\right)_h dP + \left(\frac{\partial T}{\partial h}\right)_P dh$$

ISOENTALPICA $dh = 0$

$\Downarrow$

$$\frac{dT}{dP} = \left(\frac{\partial T}{\partial P}\right)_h$$

$\Downarrow$

$$\left(\frac{\partial T}{\partial P}\right)_h = \frac{\left[T\left(\frac{\partial v}{\partial T}\right)_p - v \right]}{c_p}$$

↳ ISOENTALPICA

COEFFICIENTE DI JOULE-THOMSON (VARIAZIONE DELLA T LUNGO UN ISOENTALPICA)

$$\mu_{JT} = \left(\frac{\partial T}{\partial P}\right)_h = \frac{\left[T\left(\frac{\partial v}{\partial T}\right)_p - v \right]}{c_p}$$

$\mu_{JT} > 0$ → il GAS si RAFFREDDA ad una RIDUZIONE di P

$\mu_{JT} = 0$ → TEMPERATURA COSTANTE

$\mu_{JT} < 0$ → il GAS si RISCALDA

ls. SE GAS IDEALE $v = \frac{nT}{P} \Rightarrow \left(\frac{\partial v}{\partial T}\right)_P = \frac{R}{P}$ $\Longrightarrow \left(\frac{\partial T}{\partial P}\right)_h = \frac{T \cdot \frac{R}{P} - v}{c_p} = 0$ (v/T)

$\Downarrow$

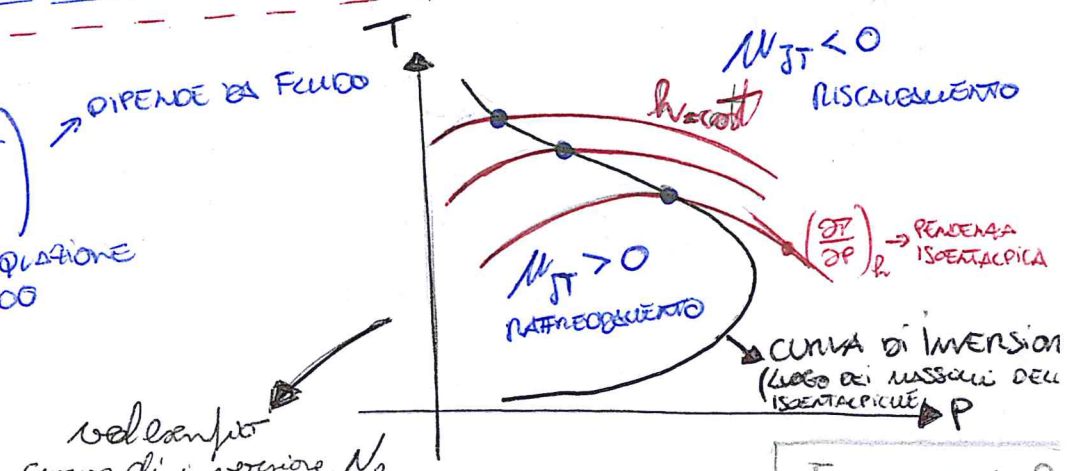
X UN GAS IDEALE UNA CALIBRAZIONE ISOENTALPICA È ANCHE ISOTERMA

$\Downarrow$

IN ACCORDO CON QUANTO DIMOSTRATO PRECEDENTEMENTE CHE PER UN GAS IDEALE L'ENTALPIA DIPENDE SOLO DALLA TEMPERATURA

$$\mu_{JT} = \mu_{JT}(P,T)$$ → DIPENDE DAL FLUIDO

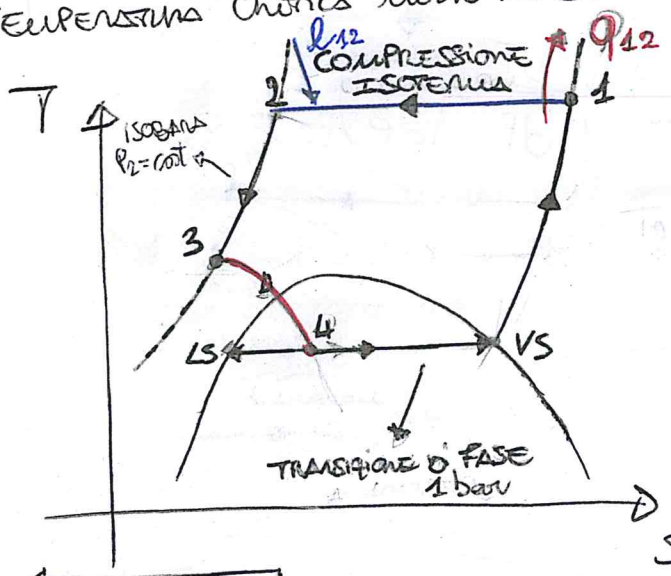
↳ RICAVABILE DALL'EQUAZIONE DI STATO DEL FLUIDO



JOULE-TH 3

- ALL'INTERNO DELLA CAMPANA

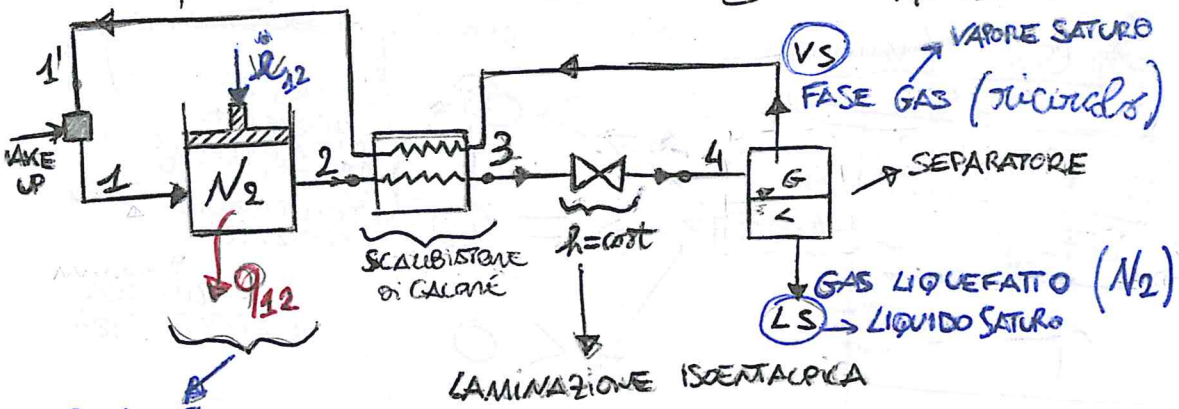
- EFFETTO JOULE-THOMSON UTILIZZATO PER LIQUEFAZIONE GAS CHE HANNO UNA TEMPERATURA CRITICA MOLTO INFERIORE A QUELLA AMBIENTE (es. AZOTO)

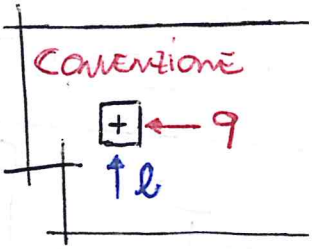


IN MODO DA AVERE RAFFREDDAMENTO CON UNA LAMINAZIONE ISOENTALPICA DEVO AVERE (T_3, P_3) ALL'INTERNO DELLA CURVA DI INVERSIONE $\Rightarrow \mu_{JT} > 0$

$\dot{m}_1 = 1$ kg/s
$T_1 = 10°C$ $P_1 = 1$ bar
$P_2 = 200$ bar
$P_3 = P_2 = 200$ bar
$T_3 = -110°C$
$P_4 = P_1 = 1$ bar

DATI PROCESSO





→ COMPRESSIONE ISOTERMA 1→2

da diagramma T-s N_2 allegato

$h_1 = 498{,}3$ kJ/kg $(T_1 = 10°C ; P_1 = 1$ bar$)$

$T_2 = T_1 = 10°C$
$P_2 = 200$ bar
$h_2 = 461{,}5$ kJ/kg

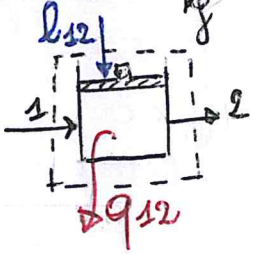
$h_1 + l + q = h_2 \Rightarrow l = (h_2 - h_1) - q$

$q = T_1(s_2 - s_1)$ ← 283,15 K ⇒ TRASFORMAZIONE REVERSIBILE (AREA SOTTESA ALLA TRASFORMAZIONE 1→2)

$s_1 = 3830$ J/kgK $\quad s_2 = 2131$ J/kgK (da diagramma)

$q_{12} = -481{,}0$ kJ/kg (<0 CALORE CEDUTO NELLA COMPRESSIONE ISOTERMA)

$h_2 - h_1 = -36{,}8$ kJ/kg $\Rightarrow l_{12} = 444{,}2$ kJ/kg > 0 (LAVORO ENTRANTE)



equivalente

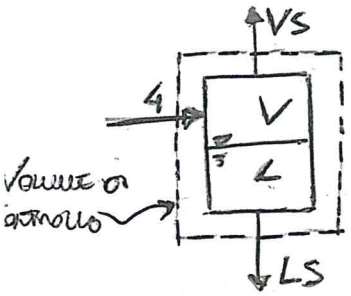
→ LAMINAZIONE ISOENTALPICA $h_3 = h_4$ $\quad h_3(P_3, T_3) = 264{,}4$ kJ/kg $\quad h_4 = 264{,}4$ kJ/kg

$x_4(h_4, P_4 = 1$ bar$) = 0{,}913$ (TITOLO DI VAPORE) $\quad T_4 = -195{,}9°C$

$q_{3\to4} = 0 \quad l_{3-4} = 0$ (VALVOLA LAMINAZIONE ADIABATICA, NO LAVORO)

JOULE-TH 6

SEPARATORE → SEPARA LA MISCELA BIFASE IN LIQUIDO SATURO E VAPORE SATURO



* BILANCIO DI MASSA *

$$\begin{cases} \dot{m}_4 = \dot{m}_{LS} + \dot{m}_{VS} \\ \dot{m}_4 \cdot x_4 = \dot{m}_{VS} \end{cases}$$

$\dot{m}_{LS}$: AZOTO LIQUEFATTO

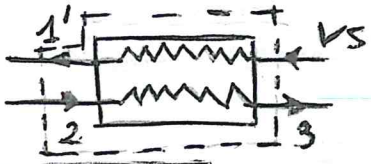
BILANCIO FASE VAPORE

$q = 0$ (ADIABATICO) $\quad l = 0$ (NO ORGANI MOBILI)

$h_{VS} = 281{,}7 \frac{KJ}{Kg} \quad h_{LS} = 82{,}4 \frac{KJ}{Kg}$ (da diagramma T-s)

→ SCAMBIATORE DI CALORE

$P_{VS} = P_1' \quad P_2 = P_3$ (SCAMBIATORE SENZA CADUTE DI PRESSIONE)

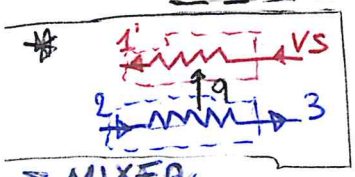


* BILANCIO ENERGIA *

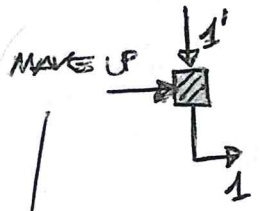
$$\dot{m}_{VS} h_{VS} + \dot{m}_2 h_2 = \dot{m}_{1'} h_{1'} + \dot{m}_3 h_3$$

$$\Downarrow$$

$h_{1'} = 497{,}5 \frac{KJ}{Kg} \quad T_{1'}(P_1, h_1) = 9{,}25°C$



→ MIXER



* BILANCIO DI MASSA *

$$\dot{m}_{MK} + \dot{m}_{1'} = \dot{m}_1 \Rightarrow \dot{m}_{MK} = \dot{m}_1 - \dot{m}_{1'} = \dot{m}_{LS}$$

($\dot{m}_1$: 1 Kg/s; $\dot{m}_{1'} = \dot{m}_{VS} = 0{,}913$ Kg/s)

* BILANCIO ENERGIA *

$$\dot{m}_{MK} h_{MK} + \dot{m}_{1'} h_{1'} = \dot{m}_1 h_1$$

$$\Downarrow$$

$h_{MK} = 506{,}5 \frac{KJ}{Kg} \quad T_{MK} \simeq 17{,}9°C$

PORTATA DI N_2 NECESSARIA PER COMPENSARE L'ESTRAZIONE DI AZOTO LIQUIDO DAL SEPARATORE

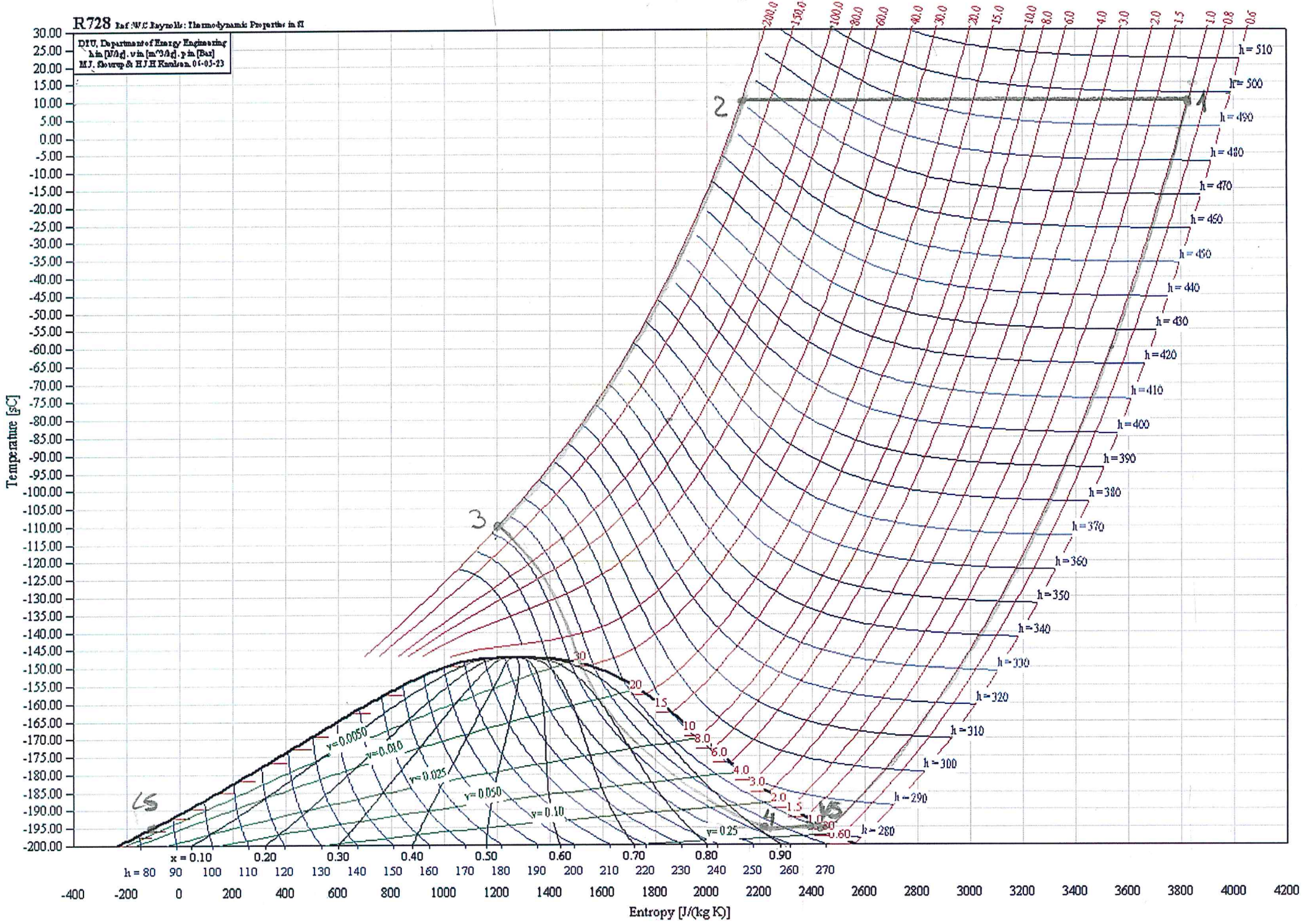
* • SE SI CONSIDERA UN VOLUME DI CONTROLLO CHE CONTIENE LO SCAMBIATORE DI CALORE NON CI SONO FLUSSI DI CALORE VERSO L'AMBIENTE (NON CI SONO PERDITE TERMICHE POICHÉ LO SCAMBIATORE È IDEALE)

• NEL CASO SI CONSIDERI UN VOLUME DI CONTROLLO CHE CONTIENE UN FLUSSO SI HA PER ESEMPIO

$\dot{m}_{VS} h_{VS} + q = \dot{m}_{1'} h_{1'} \quad q > 0$ ENTRANTE per il flusso VS → 1' ●

$\dot{m}_2 h_2 + q = \dot{m}_3 h_3 \quad q < 0$ USCENTE per il flusso 2 → 3 ●

JOLIE-TH 6


R728 Ref :W.C Reynolds : Thermodynamic Properties in SI
DTU, Department of Energy Engineering
h in [kJ/kg] , v in [m^3/kg] , p in [Bar]
M.J. Skovrup & H.J.H Knudsen. 01-05-23
Temperature [°C]
Entropy [J/(kg K)]
h = 510
h = 500
h = 490
h = 480
h = 470
h = 460
h = 450
h = 440
h = 430
h = 420
h = 410
h = 400
h = 390
h = 380
h = 370
h = 360
h = 350
h = 340
h = 330
h = 320
h = 310
h = 300
h = 290
h = 280
x = 0.10
x = 0.20
x = 0.30
x = 0.40
x = 0.50
x = 0.60
x = 0.70
x = 0.80
x = 0.90
v= 0.0050
v= 0.010
v= 0.025
v= 0.050
v= 0.10
v= 0.25
200.0
150.0
100.0
80.0
60.0
40.0
30.0
20.0
15.0
10.0
8.0
6.0
4.0
3.0
2.0
1.5
1.0
0.8
0.6
2
1
3
4
5
5'