

## TENTAMEN I TERMODYNAMIK för K2, Kf2 och TM2 (KVM091 och KVM090) 2014-08-20 kl. 14.00 - 18.00

Hjälpmiddel: Kursböckerna "Elliott-Lira: Introductory Chemical Engineering Thermodynamics" inklusive utdelat "Komplettering av föreläsningsmaterial" (13 alt. 15 sidor) och "P. Atkins, L. Jones: Chemical Principles", "Tabeller och diagram i Energi- och kemiteknik" eller "Data och Diagram", "Physics Handbook", "BETA  $\beta$ " samt valfri kalkylator med tömt minne. I ovan angivna böcker är föreläsningsanteckningar i form av under- och överstrykningar, översättningar, hänvisningar och kommentarer tillåtna, men absolut inte i form av lösningar till exempel eller tidigare tentatal. När ekvationer används utan härledningar bör källa anges. Använda symboler bör definieras om de avviker från kursmaterialets. OBS! Uppgifternas numrering är "slumpartad" och är inte kopplad till svårighetsgrad. För godkänt (betyg 3) krävs 15 poäng, för betyg 4 20 poäng och för betyg 5 25 poäng.

Senast kl. 15.00 kommer Lennart Vamling, ankn. 3021 eller Nikola Markovic, ankn. 3114, att första gången vara tillgänglig i skrivsalen.

Lösningar finns anslagna 2014-08-21 på Värmeteknik och maskinläras anslagstavla.

**Tentamen kommer att rättas anonymt.** Resultat meddelas via LADOK senast 2014-09-08

Granskning får ske 2014-09-09 kl. 12.00 - 12.30 och 2014-09-16, kl. 12.00 - 12.30

i Värmeteknik och maskinläras bibliotek. Därefter kan tentor hämtas ut från Energi och miljöstentamensexpedition, EDIT-huset, plan 3, ingång Maskingränd, rum 3434A (öppet mån-fre 12.30-14.30)

1. En standard enkel ångkraftscykel (Rankine cycle) har en turbin med inloppstrycket 7,0 MPa och temperaturen 550 °C och dess utlopp går in i kondensorn med en temperatur på 50 °C och med en ångfraktion som är 0,96. Utloppet från kondensorn är mättat vatten. Om pumparbete samt ändringar i potentiell och kinetisk energi kan försummas, vad blir cykelns termiska verkningsgrad och vad blir turbinens isentropverkningsgrad?

(6 p)

2. Dieselcykeln är en cyklisk process i en cylinder med rörlig kolv. Den består av följande delsteg:

- |     |                      |
|-----|----------------------|
| 1→2 | Isentrop kompression |
| 2→3 | Isobar värmning      |
| 3→4 | Isentrop expansion   |
| 4→1 | Isokor kylning       |

Trycket vid kompressionsstegets start,  $P_1 = 100$  kPa och dess temperatur är 20 °C, medan trycket vid dess slut  $P_2 = 400$  kPa. Vid värmningen i nästa steg tillförs 1500 J/mol. Arbetsmediet antas vara idealgas med  $C_p = 7R/2$  och  $C_v = 5R/2$ .

- a) Vilket kompressionsförhållande ( $V_1/V_2$ ) och expansionsförhållande ( $V_4/V_3$ ) krävs för att uppnå ovanstående data?

b) Vad blir cykelns termiska verkningsgrad med ovanstående data och vad är maximalt möjlig termisk verkningsgrad för en cykel (den bästa möjliga) som värms vid ovanstående cykelns högsta temperatur och som kyls vid dess lägsta?

(6 p)

3. Från en anläggning kommer en gasström bestående av ren CO<sub>2</sub>. För vidare transport till ett lager behöver gasen komprimeras till ett betydligt högre tryck och kan då inte sägas vara ideal. Kompressibiliteten  $Z$  kan för gasen beskrivas som en funktion av densitet  $\rho$  (här i mol/m<sup>3</sup>) och temperatur  $T$  (i K).

$$Z(T, \rho) = 1 + B(T)\rho + C(T)\rho^2$$

där

$$B(T) = B_0 + B_1/T \quad \text{och} \quad C(T) = C_0 + C_1/T$$

För CO<sub>2</sub> är i aktuellt temperaturområde  $B_0 = 1,508 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3/\text{mol}$ ,  $B_1 = -81,7 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3\text{K}/\text{mol}$ ,  $C_0 = -3,344 \cdot 10^{-9} (\text{m}^3/\text{mol})^2$  och  $C_1 = 2,482 \cdot 10^{-6} \text{ K}(\text{m}^3/\text{mol})^2$ .  $C_p^{\text{ig}}$  för CO<sub>2</sub> (som idealgas) antas konstant = 37,0 J/(mol K).

a) Visa att utgående från ovanstående uttryck/uppgifter för  $Z$  och  $C_p^{\text{ig}}$ , så kan entropi och entalpi (vid ett visst val av referenstillstånd) beräknas som

$$S(T, \rho) = (C_p^{\text{ig}} - R) \ln(T / T_{\text{ref}}) - R \ln\left(\frac{\rho}{\rho_{\text{ref}}}\right) - R \rho \left[ B_0 + \frac{\rho}{2} C_0 \right]$$

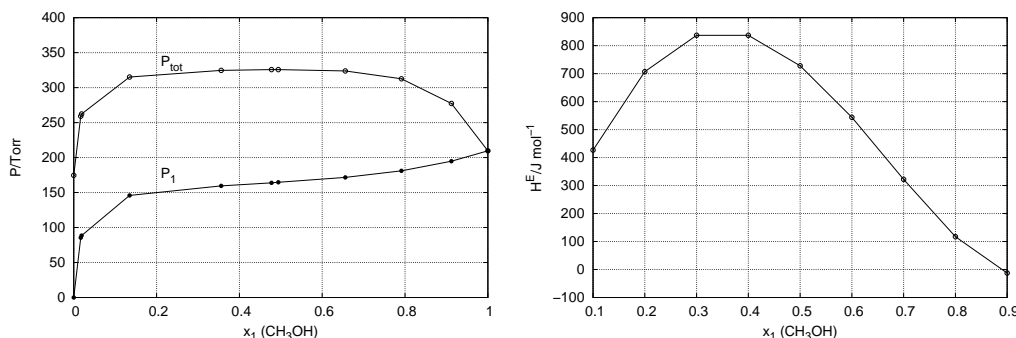
$$H(T, \rho) = C_p^{\text{ig}} (T - T_{\text{ref}}) + RT \rho \left[ B_0 + 2 \frac{B_1}{T} + \rho \left( C_0 + \frac{3C_1}{2T} \right) \right]$$

Ledning: Eftersom  $\rho = 1/V$ , så är ”vid konstant  $T$  och  $V$ ”, samma som ”vid konstant  $T$  och  $\rho$ ”. Det kan också vara användbart att kombinera definitionerna  $H (=U+PV=U+ZRT)$  och  $A(=U-TS)$  till  $H=A+TS+ZRT$ . (4 p)

b) Beräkna det arbete och den kylning som krävs för att isotermt och ”förlustfritt” (dvs. termodynamiskt bäst möjligt) komprimera 500 mol/s av CO<sub>2</sub> vid en temperatur av 350 K från  $\rho = 35 \text{ mol/m}^3$  till  $\rho = 15000 \text{ mol/m}^3$ . (2 p)

Totalt (6 p)

4. Den binära blandningen av metanol,  $\text{CH}_3\text{OH}$ , och tetraklormetan,  $\text{CCl}_4$ , har studerats av G. Scatchard *et al.* [*JACS* **68**, 1960 (1946)]. Figuren till vänster nedan visar hur partialtrycket av metanol och totaltrycket över blandningen varierar med molbråket metanol (komponent 1) i vätskefasen vid  $35.00^\circ\text{C}$ . Figuren till höger visar hur  $H^E$  beror av molbråket vid samma temperatur.



Beräkna från givna data (med Raoult's lag som referens)  $\Delta_{\text{mix}}G$  och  $\Delta_{\text{mix}}S$  för denna icke-ideala blandning vid  $x_1 = 0.4$  samt det totaltryck blandningen skulle ha vid  $x_1 = 0.4$  om systemet uppträdde idealt.

Totalt: 6 poäng

5. a) Vid vattens trippelpunkt  $273.16\text{ K}$  är smältentalpin ( $\Delta_{\text{fus}}H$ ) för is  $6.007\text{ kJ mol}^{-1}$ . Jämviktstrycket av vattenånga över is kan beräknas noggrant [*Geochimica et Cosmochimica Acta* **71**, 36 (2007)]:

$T/\text{K}$	$P/\text{Pa}$
255.00	123.2
260.00	195.9
265.00	306.1
273.16	611.7

Beräkna med hjälp av givna data sublimationsentalpin ( $\Delta_{\text{sub}}H$ ), motsvarande ändring av inre energin ( $\Delta_{\text{sub}}U$ ), sublimationsentropin ( $\Delta_{\text{sub}}S$ ) och ångbildningsentalpin från vätska ( $\Delta_{\text{vap}}H$ ) vid  $273.16\text{ K}$ . (4 p)

b) Vid inte allt för höga temperaturer kan vattenmolekyler i gasfas betraktas som stela molekyler med tre translationsfrihetsgrader och tre rotationsfrihetsgrader, var och en med medelenergin  $\frac{1}{2}RT$ . Utnyttja denna information för att beräkna  $\Delta H$  för  $\text{H}_2\text{O}(\text{g})$  betraktad som en ideal gas som värms från  $273$  till  $293\text{ K}$  vid  $1.00\text{ bar}$ . (2 p)

Totalt: 6 poäng

$$kJ := 1000 \cdot J \quad R_{\text{gas}} := 8.3143 \cdot \frac{J}{\text{mol} \cdot K}$$

## Lösningsförslag Termodynamik 2014-08-20

### Tal 1 - Standard ångkraftscykel

**Givet:**  $P_3 := 7 \cdot \text{MPa}$   $T_3$  är 550 C,  $T_4$  är 50 C Ångfraktion  $q_4 := 0.96$

Ur tabell fås  $H_3 := 3531.6 \cdot \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$   $S_3 := 6.9506 \cdot \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot K}$

$H_{4L} := 209.34 \cdot \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$   $H_{4V} := 2591.29 \cdot \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$   $S_{4L} := 0.7038 \cdot \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot K}$   $S_{4V} := 8.0748 \cdot \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot K}$

vilket ger

$$H_4 := H_{4L} \cdot (1 - q_4) + H_{4V} \cdot q_4 = 2.496 \times 10^3 \cdot \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \quad S_4 := S_{4L} \cdot (1 - q_4) + S_{4V} \cdot q_4 = 7.78 \cdot \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot K}$$

$H_5 := H_{4L}$  och den termiska verkningsgraden (erhållet arbete/tillfört värme) fås som

$$\eta_{\theta} := \frac{H_3 - H_4}{H_3 - H_5} = 0.312$$

För att få turbinens verkningsgrad, så behöver vi  $H_{4is}$  (entalpi efter isentrop expansion) dvs då

$$S_{4is} := S_3$$

Eftersom  $S_{4is}$  är lägre än  $S_{4L}$  så är vi i mättade området. Vi söker då ångfraktionen efter isentrop expansion och med den kan vi beräkna den sökta entalpin.

$$q_{4is} := \frac{S_{4is} - S_{4L}}{S_{4V} - S_{4L}} = 0.847 \quad H_{4is} := H_{4L} \cdot (1 - q_{4is}) + H_{4V} \cdot q_{4is} = 2.228 \times 10^3 \cdot \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

$$\eta_{is} := \frac{H_4 - H_3}{H_{4is} - H_3} = 0.794$$

Svar: Den termiska verkningsgraden är 31,2 % och ångfraktionen är 79,4 %

## Tal 2 - Dieselcykel

- 1 - 2 Adiabatisk kompression
- 2 - 3 Isobar värmning
- 3 - 4 Adiabatisk expansion
- 4 - 1 Isokor kylning

**Givet:**

$$C_p := \frac{7}{2} \cdot R_{\text{gas}} \quad C_v := \frac{5}{2} \cdot R_{\text{gas}}$$

$$P_1 := 100 \cdot \text{kPa} \quad T_1 := (20 + 273.15) \cdot \text{K}$$

$$P_2 := 400 \cdot \text{kPa} \quad Q_{23} := 1500 \cdot \frac{\text{J}}{\text{mol}}$$

Från ekv 4.29 fås ur  $\Delta S=0$

$$T_2 := T_1 \cdot \left( \frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{R_{\text{gas}}}{C_p}} = 435.619 \text{ K}$$

En värmebalans ( $Q=C_p\Delta T$ ) för den isobara värmningen ger  $\Delta T := \frac{Q_{23}}{C_p} = 51.546 \text{ K}$

$$T_3 := T_2 + \Delta T \quad P_3 := P_2$$

Idealgaslagen ger oss  $V_1 := R_{\text{gas}} \cdot \frac{T_1}{P_1} = 0.024 \frac{\text{m}^3}{\text{mol}} \quad V_2 := \frac{R_{\text{gas}} \cdot T_2}{P_2}$

$$V_3 := R_{\text{gas}} \cdot \frac{T_3}{P_3} \quad \text{Att sista steget är isokor innebär} \quad V_4 := V_1$$

De sökta kvoterna kan nu beräknas till  $RE := \frac{V_4}{V_3} = 2.407 \quad RC := \frac{V_1}{V_2} = 2.692$

b) Jämförelse verkningsgrader

För att kunna beräkna verkningsgraden för denna cykeln, så börjar vi med att beräkna även  $T_4$ .

Från ekv 4.29 +  $\Delta S=0$  så  $T_4 := T_3 \cdot \left( \frac{V_3}{V_4} \right)^{\frac{R_{\text{gas}}}{C_v}} = 342.837 \text{ K}$

$\eta_{\theta} = -W_s/Q_H = (\text{energibalans}) = (Q_H+Q_C)/Q_H = 1+Q_C/Q_H$   
Kylningen isokor ger  $Q_C=C_v\Delta T$  och  $Q_H=\text{givna } Q_{23}$

$$\eta_{\theta} := 1 + \frac{C_v \cdot (T_1 - T_4)}{Q_{23}} = 0.311$$

Carnot-cykeln är den termodynamiskt "bäst möjliga" för den är (ekv 4.43)

Carnot  $\eta_{\theta \text{Carnot}} := 1 - \frac{T_1}{T_3} = 0.398$

Svar: Expansionskvoten behöver vara 2,4 och kompressionskvoten 2,7.  
Den termiska verkningsgraden blir 31,1% och bästa möjliga är 40%.

**Tal 3**

Härledning av uttryck för entalpi och entropi för realgas och med det beräkna Q och W för en isoterm kompression.

Givet är att Z för gasen (koldioxid) kan beskrivas som en funktion av T och  $\rho (=1/V)$ .

**Givet:**

$$B1 := -0.0817 \cdot \frac{\text{m}^3 \cdot \text{K}}{\text{mol}} \quad B0 := 1.508 \times 10^{-4} \frac{\text{m}^3}{\text{mol}}$$

$$C1 := 2.482 \times 10^{-6} \frac{\text{m}^6 \cdot \text{K}}{\text{mol}^2} \quad C0 := -3.344 \times 10^{-9} \frac{\text{m}^6}{\text{mol}^2}$$

$$B(T) := B0 + \frac{B1}{T} \quad C(T) := C0 + \frac{C1}{T} \quad C_{\text{pig}} := 37.0 \frac{\text{J}}{\text{mol} \cdot \text{K}}$$

$$Z(T, \rho) := \overrightarrow{\left(1 + B(T) \cdot \rho + C(T) \cdot \rho^2\right)}$$

- a) Här gäller det att för given tillståndsekvation ta fram uttryck för att kunna beräkna H och S. En lämplig metod är att dela upp beräkningen i en idealgas-del och en del som beskriver skillnaden mellan ideal och realgas-tillstånd. Vi börjar med det senare. I kapitel 8 i boken finns ett antal ekvationer framtagna för denna skillnad. I den här uppgiften ges ekvationerna (och sedan även uppgifterna) uttryckta i T och  $\rho$ , vilket gör det mest bekvämt att använda en övergång mellan ideal och real vid ett visst T och  $\rho$ , vilket (enligt ledning) är det samma som vid fixt T och V. Det innebär att avsnittet med ekvation 8.27 och 8.28 är tillämpligt. För entropi finns ett färdigt uttryck, varför vi börjar med det.

$$-T \left( \frac{d}{dT} Z \right) = -T \cdot \left[ \rho \cdot \left( \frac{d}{dT} B \right) + \rho^2 \cdot \left( \frac{d}{dT} C \right) \right] = -T \cdot \rho \cdot \left( \frac{-B1}{T^2} + \rho \cdot \frac{-C1}{T^2} \right) = \rho \cdot \left( \frac{B1}{T} + \rho \frac{C1}{T} \right)$$

$$-(Z - 1) = -\rho \cdot \left[ B0 + \frac{B1}{T} + \rho \cdot \left( C0 + \frac{C1}{T} \right) \right] \quad \text{Vi lägger nu ihop och sätter in dessa i 8.28}$$

$$(S - S_{\text{ig}}) = R \left[ \int_0^{\rho} -(B0 + \rho \cdot C0) d\rho \right] = -R\rho \cdot \left( B0 + \rho \cdot \frac{C0}{2} \right)$$

För entalpi finns inget färdigt uttryck, men det finns för A och S. Vi behöver därför kombinera definitioner (enligt ledning eller enligt ekv 8.20) vilket ger

$$\frac{H - H_{\text{ig}}}{R \cdot T} = \frac{A - A_{\text{ig}}}{RT} + \frac{S - S_{\text{ig}}}{R} + Z - 1 \quad \text{Använder vi 8.27 och 8.28 så får vi}$$

$$H - H_{\text{ig}} = R \cdot T \cdot \left[ \int_0^{\rho} \frac{-T}{\rho} \cdot \left( \frac{d}{dT} Z \right) d\rho + Z - 1 \right]$$

Insättning av våra uttryck framtagna ovan och integration ger

$$H - H_{ig} = \rho \cdot R \cdot T \cdot \left( \frac{B1}{T} + \rho \frac{C1}{2 \cdot T} \right) + \rho R \cdot T \cdot \left[ B0 + \frac{B1}{T} + \rho \cdot \left( C0 + \frac{C1}{T} \right) \right]$$

$$H - H_{ig} = \rho R \cdot T \cdot \left[ B0 + \frac{2B1}{T} + \rho \cdot \left( C0 + \frac{3C1}{2T} \right) \right]$$

Nu har vi "bara" att hitta uttryck för  $H_{ig}$  och  $S_{ig}$  som funktion av  $T$  och  $\rho$ .

För  $H_{ig}$  är det enkelt  $H_{ig} = C_{pig} \cdot (T - T_{ref})$

För  $S_{ig}$  kan vi använda oss av ekv 6.38 :  $dS(T,V) = C_v/T dT + dP/dT dV$

För idealgas är  $dP/dT = R/V$  så  $\Delta S = C_v \ln(T/T_{ref}) + R \ln(V/V_{ref})$

Insättning av  $\rho = 1/V$  ger (med  $S_{ig} = 0$  vid  $T_{ref}$  och  $\rho_{ref}$ )

$$S_{ig} = C_{vig} \cdot \ln\left(\frac{T}{T_{ref}}\right) + R \cdot \ln\left(\frac{\rho_{ref}}{\rho}\right) = (C_{pig} - R) \cdot \ln\left(\frac{T}{T_{ref}}\right) - R \cdot \ln\left(\frac{\rho}{\rho_{ref}}\right)$$

Insättning ger till sist de eftersökta uttrycken

b) Från a) har vi

$$H_{dev}(\rho, T) := \overrightarrow{\left[ R_{gas} \cdot T \cdot \rho \cdot \left[ B0 + 2 \cdot \frac{B1}{T} + \rho \cdot \left( C0 + \frac{3}{2} \cdot \frac{C1}{T} \right) \right] \right]}$$

$$S_{dev}(T, \rho) := \overrightarrow{\left[ R_{gas} \cdot \left[ \rho \cdot (-B0) + \frac{\rho^2}{2} \cdot (-C0) \right] \right]}$$

Givet:

$$\rho_1 := 35 \cdot \frac{\text{mol}}{\text{m}^3} \quad \rho_2 := 15000 \cdot \frac{\text{mol}}{\text{m}^3}$$

$$n_{flow} := 500 \cdot \frac{\text{mol}}{\text{s}} \quad T_{iso} := 350 \cdot \text{K}$$

Sökt är vilken kylning ( $-Q$ ) och vilket arbete (Work) som behövs för förlustfri, isoterm kompression från densiteten  $\rho_1$  till densiteten  $\rho_2$ . Förlustfri innebär  $S_{gen} = 0$ , vilket ger entropibalansen  $0 = n_{flow}(S_1 - S_2) + Q/T_{iso}$ , vilket i sin tur ger

$$Q := n_{flow} \cdot T_{iso} \cdot \left( S_{dev}(T_{iso}, \rho_2) - R_{gas} \cdot \ln\left(\frac{\rho_2}{\rho_1}\right) - S_{dev}(T_{iso}, \rho_1) \right) = -11.554 \cdot \text{MW}$$

En energibalans ger:  $0 = n_{flow}(H_1 - H_2) + Q + \text{Work}$ , ur vilket vi får

$$\text{Work} := n_{flow} \cdot (H_{dev}(\rho_2, T_{iso}) - H_{dev}(\rho_1, T_{iso})) - Q = 7.06 \cdot \text{MW}$$

Svar: Vi behöver kyla 11,5 MW och tillföra 7,1 MW som arbete.

## Kortfattade lösningsförslag till tentamen i Termodynamik 2014-08-20, uppgifterna 4 och 5

4. Från diagrammet (gäller vid  $T = 308.15$  K) uppskattas för  $x_1 = 0.4$   $P_{\text{tot}} \approx 325$  Torr,  $P_1 \approx 163$  Torr,  $P_1^* \approx 209$  Torr,  $P_2^* \approx 174$  Torr. Det ideala systemet skulle ha totaltrycket

$$P_{\text{tot}}^{\text{is}} = \sum_i x_i P_i^* = x_1 P_1^* + (1 - x_1) P_2^* \approx \mathbf{188} \text{ Torr.}$$

Aktivitetsfaktorerna fås via  $a_i = \gamma_i x_i = P_i/P_i^*$  (Elliott/Lira s. 409):

$$\begin{aligned} \gamma_1 &= \frac{P_1}{P_1^* x_1} \approx 1.95, \\ \gamma_2 &= \frac{P_{\text{tot}} - P_1}{P_2^* (1 - x_1)} \approx 1.55. \end{aligned}$$

Fria blandningsenergin blir (Elliott/Lira s. 424) ( $x_2 = 1 - x_1 = 0.6$ )

$$\Delta_{\text{mix}} G = RT[x_1 \ln(\gamma_1 x_1) + x_2 \ln(\gamma_2 x_2)] \approx \mathbf{-365} \text{ J mol}^{-1}.$$

Från diagrammet fås  $H^E \approx 838$  J mol<sup>-1</sup>. Eftersom  $\Delta_{\text{mix}} H^{\text{is}} = 0$  gäller att  $H^E = \Delta_{\text{mix}} H = 838$  J mol<sup>-1</sup> [Elliott/Lira s. 105]. Från definitionen av  $G$  fås  $\Delta G = \Delta H - T\Delta S$ , dvs  $\Delta_{\text{mix}} S = (\Delta_{\text{mix}} H - \Delta_{\text{mix}} G)/T \approx \mathbf{3.90}$  J K<sup>-1</sup> mol<sup>-1</sup>

5.a) Utgångspunkten är Clapeyrons ekvations (Elliott/Lira s. 333–334),

$$\frac{dP}{dT} = \frac{\Delta S}{\Delta V} = \frac{\Delta H}{T\Delta V}.$$

Sublimeringen sker vid låga tryck, varför vi kan förvänta oss att idealgaslagen är en god approximation. Genom att dessutom försumma molvolymen av den fasta fasen vid sidan av ångans molvolym kan vi approximera  $\Delta V = V^V - V^S \approx V^V \approx RT/P$ , dvs

$$\frac{dP}{P} = \frac{\Delta H}{RT^2} dT,$$

vilket efter integrering med antagandet att  $\Delta H$  är  $T$ -oberoende i intervallet ger Clausius-Clapeyrons ekvation,

$$\ln P = -\frac{\Delta H}{RT} + C.$$

En plot av  $\ln P$  mot  $1/T$  ger en perfekt linje ( $R^2 \approx 1.00000$ , dvs  $\Delta_{\text{sub}} H$  är i det närmaste konstant i intervallet) med lutningen  $-\Delta H/R = -6146.47$  K, dvs



$\Delta_{\text{sub}}H \approx \mathbf{51.10}$  kJ mol<sup>-1</sup>. Eftersom jämvikt råder fås entropiändringen vid  $T = 273.16$  K som  $\Delta_{\text{sub}}S = \Delta_{\text{sub}}H/T \approx \mathbf{187}$  J K<sup>-1</sup> mol<sup>-1</sup>. Ångbildningsentalpin fås som  $\Delta_{\text{vap}}H = \Delta_{\text{sub}}H - \Delta_{\text{fus}}H \approx \mathbf{45.10}$  kJ mol<sup>-1</sup>. Ändringen i inre energi fås via definitionen  $H = U + PV$ , dvs

$$\Delta_{\text{sub}}U = \Delta_{\text{sub}}H - P\Delta V \approx \Delta_{\text{sub}}H - RT \approx \mathbf{48.83}$$
 kJ mol<sup>-1</sup>,

där vi utnyttjat approximationerna  $\Delta V = V^V - V^S \approx V^V \approx RT/P$ .

**5.b)** Inre energin ges alltså av  $U = 6 \times \frac{1}{2}RT = 3RT$ . Från definitionen av isokor värmekapacitet fås  $C_V = (\partial U/\partial T)_V = 3R$ . För en idealgas gäller  $C_P = C_V + R$ , dvs  $C_P = 4R = 33.26$  J K<sup>-1</sup> mol<sup>-1</sup> i god överensstämmelse med tabellvärdet 33.58 J K<sup>-1</sup> mol<sup>-1</sup> vid 298 K. Eftersom gasen betraktas som ideal beror  $U$  ej av  $V$  (eller  $P$ ) utan endast av  $T$ . Den klassiska "stela" approximationen fungerar väl vid låga  $T$ . Via definitionen  $C_P = (\partial H/\partial T)_P$  fås i detta fall

$$\Delta H = \int_{T_1}^{T_2} C_P dT = C_P \Delta T = 4R \Delta T \approx \mathbf{665}$$
 J mol<sup>-1</sup>.