

**TENTAMEN I TERMODYNAMIK för K2, Kf2 och TM2 (KVM091 och KVM090) 2016-12-21 kl. 08.30 - 12.30**

Hjälpmiddel: Kursböckerna "Elliott-Lira: Introductory Chemical Engineering Thermodynamics" inklusive utdelat "Komplettering av föreläsningmaterial" (15/17 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 föreläsningssanteckningar i form av under- och överstrykningar, översättningar, hänvisningar och kommentarer tillåtna, men absolut inte lösningar till exempel eller tidigare tentatal. När ekvationer används utan härledningar bör källa anges. Använda symboler bör definieras om de avviker från kursmaterialets. För godkänt (betyg 3) krävs 15 poäng, för betyg 4 20 poäng och för betyg 5 25 poäng.

Senast kl. 09.30 kommer Lennart Vamling, ankn. 3021 eller Nikola Markovic, ankn. 3114, att första gången vara tillgänglig i skrivsalen.

Lösningar kommer att publiceras 2016-12-22 på kurshemsidan (Pingpong).

**Tentamen kommer att rättas anonymt.** Resultat meddelas via LADOK senast 2017-01-16

Granskning får ske 2017-01-18 kl. 12.00 - 12.30 och 2017-01-24, kl. 12.00 - 12.30 i seminarierum 3233 (Kemihuset, plan 3, längst ut mot Gibraltargatan)

---

1. Den s.k. Atkinsoncykeln är en cyklisk process i en cylinder med rörlig kolv som ofta används för att approximera förloppet i de motorer som idag används i en del hybridbilar. Cykeln består av följande delsteg:

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

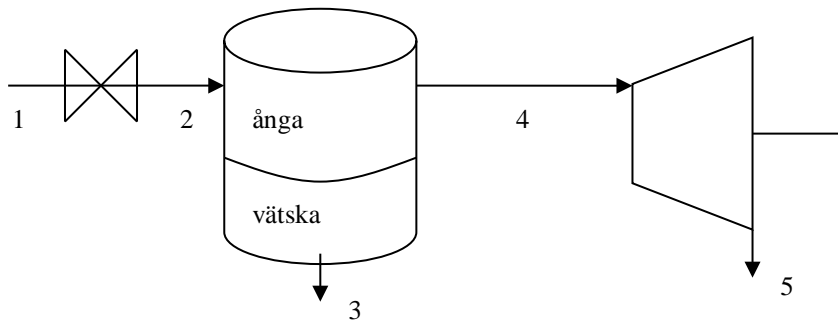
Kompressionsförhållandet ( $V_1/V_2$ ) är 10 och den högsta temperaturen i cykeln är 1100 K, Trycket  $P_1 = 98$  kPa och  $T_1 = 300$  K.

- a) Beräkna cykelns termiska verkningsgrad! (5 p)
- b) Om det gick att konstruera en helt förlustfri motor, vilken verkningsgrad skulle den maximalt ha om den arbetade med samma högsta och lägsta temperatur som ovanstående Atkinson-cykel. (1 p)

Arbetsmediet kan approximeras med en ideal gas med  $C_p = 29,0$  J/(mol K) och  $\kappa = C_p/C_v = 1,40$ .

Totalt (6 p)

2. I en geotermisk kraftanläggning utnyttjas grundvatten, som håller temperaturen 280 °C och är vid mättningstryck. Först sänks trycket med hjälp av en strypventil, varefter ånga och vätska separeras i ett separationskärl. Flödena ut från separationskärlet kan antas mättade. Ångan, som ut från separationskärlet har temperaturen 200 °C, expanderar i en turbin till trycket 0,1 MPa. Turbinens isentropverkningsgrad är 85 %. Anläggningen använder 200 kg grundvatten per sekund. Vad blir turbinens levererade effekt?



(6 p)

3. En gas följer tillståndsekvationen

$$\frac{PV}{RT} = 1 + \left(b - \frac{a}{T}\right) \frac{P}{RT}$$

där  $a=0,17 \text{ m}^3\text{K/mol}$ ,  $b=290 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3/\text{mol}$ .

Dessutom är  $C_p(\text{ideal gas}) = \alpha + \beta \cdot T$ , där  $\alpha=25,0 \text{ J}/(\text{mol K})$  och  $\beta=0,033 \text{ J}/(\text{mol K}^2)$ .

- a) Visa, utgående från lämpliga ekvationer i kursboken (ange vilka), att ändringen i inre energi vid en ändring från ett tillstånd  $(T_1, P_1)$  till ett annat  $(T_2, P_2)$  då kan uttryckas som

$$U(T_2, P_2) - U(T_1, P_1) = P_2 \left(-\frac{a}{T_2}\right) - P_1 \left(-\frac{a}{T_1}\right) + (\alpha - R)(T_2 - T_1) + \frac{\beta}{2}(T_2^2 - T_1^2)$$

(4 p)

- b) Gasen är innesluten i en cylinder med konstant volym, där trycket är 3,0 MPa och temperaturen 450 K. Hur mycket måste gasen kylas (i J/mol) för att få ner temperaturen till 350 K?

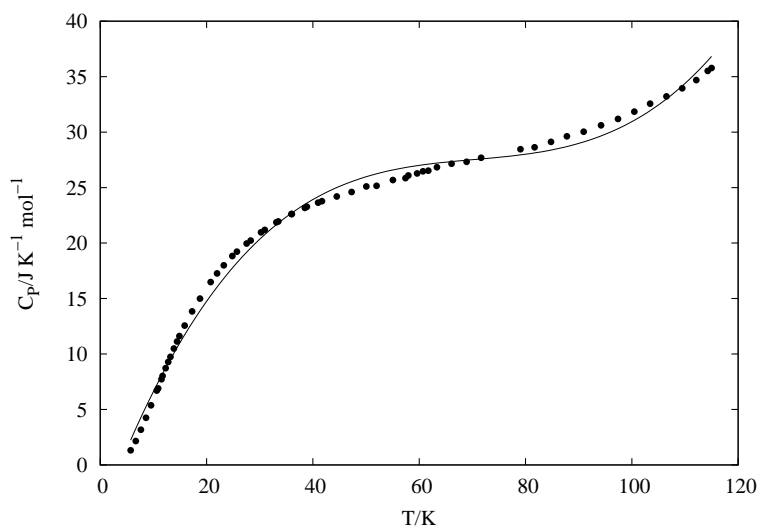
(2 p)

( Totalt 6 p)

4. Värmekapaciteten för fast krypton,  $\text{Kr}(s)$ , kan mellan 5.710 K och 115.8 K relativt väl (se figuren nedan; datapunkter från Beaumont *et al.* [Proc. Phys. Soc. (London) **78**, 1462 (1961)]) beskrivas av ekvationen

$$C_P(T) = a + bT + cT^2 + dT^3,$$

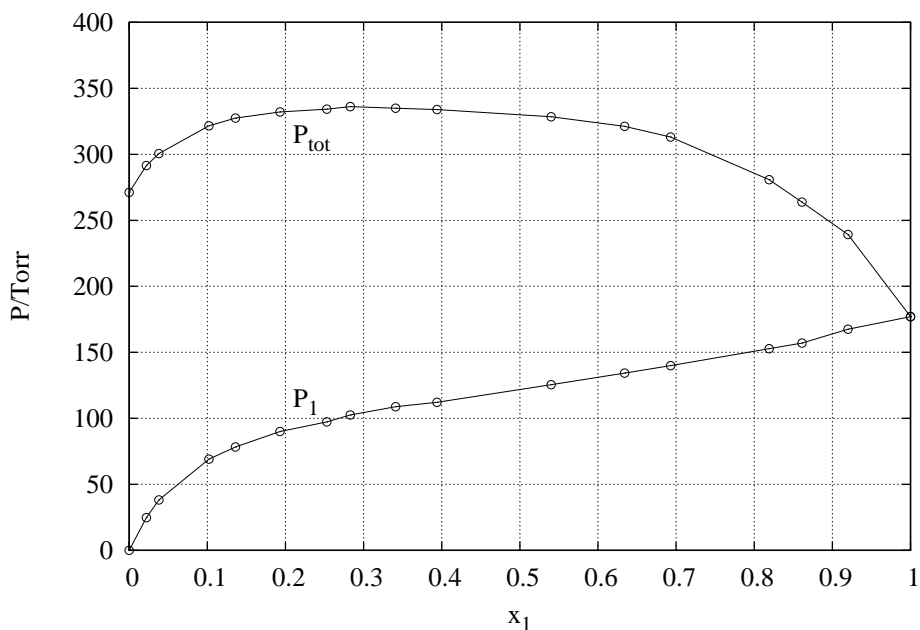
där konstanterna ges av  $a = -4.52699 \text{ J K}^{-1} \text{ mol}^{-1}$ ,  $b = 1.2835 \text{ J K}^{-2} \text{ mol}^{-1}$ ,  $c = -0.0176501 \text{ J K}^{-3} \text{ mol}^{-1}$  och  $d = 8.36189 \cdot 10^{-5} \text{ J K}^{-4} \text{ mol}^{-1}$ . Krypton smälter vid 115.8 K och 1 bar med smältentalpin  $1.64 \text{ kJ mol}^{-1}$  och kokar vid 119.9 K och 1 bar med ångbildningsentalpin  $9.08 \text{ kJ mol}^{-1}$ .  $\text{Kr}(l)$  och  $\text{Kr}(g)$  har i det närmaste konstanta värmekapaciteter i de aktuella temperaturintervallen:  $C_P(l) = 43.66 \text{ J K}^{-1} \text{ mol}^{-1}$  respektive  $C_P(g) = 20.786 \text{ J K}^{-1} \text{ mol}^{-1}$ .



Beräkna molentropin för  $\text{Kr}(g)$ , behandlad som en ideal gas, vid 1 bar och 298.15 K från ovan givna värmekapaciteter och omvandlingsentalpier. Genom att jämföra resultatet med det statistiskt mekaniska värdet ( $164.1 \text{ J K}^{-1} \text{ mol}^{-1}$ ) får vi en indikation på om givna termodynamiska data för Kr är konsistenta.

Totalt: 6 poäng

5. En blandning av isopropanol (1) och bensen (2) studerades vid 50°C av Nagata *et al.* [J. Chem. Eng. Data **18**, 54 (1973)]. Ångans totaltryck och partialtrycket av isopropanol framgår av figuren nedan:



- Beräkna från i uppgiften givna data och med Raoult's lag som referens  $\Delta_{\text{mix}}G$  och  $G^E$  för denna icke-ideala blandning vid  $x_1 = 0.10$ . (3 p)
- Beräkna  $\Delta_{\text{mix}}H$  vid  $x_1 = 0.10$  under antagandet att blandningen är reguljär, dvs att  $S^E = 0$ . (2 p)
- Beräkna totaltrycket över motsvarande ideala blandning vid  $x_1 = 0.10$ . (1 p)

Totalt: 6 poäng

## Termodynamik 161221 - Lösningsförslag

Definitioner:  $\text{kJ} := 1000 \cdot \text{J}$      $\text{MJ} := 1000 \cdot \text{kJ}$      $\frac{R}{\text{mol} \cdot \text{K}} := 8.3143 \cdot \frac{\text{J}}{\text{mol} \cdot \text{K}}$

### Uppgift 1 - Atkinson-cykel

Givna uppgifter

$$T1 := 300 \cdot \text{K} \quad \text{Kompressions\_kvot} := 10 \quad \text{Högsta temperatur} \quad T3 := 1100 \cdot \text{K}$$

$$\gamma := 1.4 \quad C_p := 29.0 \cdot \frac{\text{J}}{\text{mol} \cdot \text{K}} \quad P1 := 98 \cdot \text{kPa}$$

$$\text{Ur dessa fås} \quad C_v := \frac{C_p}{\gamma} = 20.714 \cdot \frac{\text{J}}{\text{mol} \cdot \text{K}}$$

- a) Sökt är termiska verkningsgraden  $\eta\theta$ . För att få fram den behöver vi avgivet arbete och tillfört värme. För att få fram dessa (se formler nedan) behöver vi beräkna alla okända temperaturer. Det gör vi med hjälp av vad vi vet om tillståndsförändringar och med användning av idealgaslag

Punkt 2    Isentrop kompression från 1

$$V1 := \frac{R \cdot T1}{P1} \quad V2 := \frac{V1}{\text{Kompressions\_kvot}}$$

$$T2 := T1 \cdot \left( \frac{V1}{V2} \right)^{\gamma-1} \quad T2 = 753.566 \text{ K}$$

$$P2 := P1 \cdot \left( \frac{V1}{V2} \right)^{\gamma} \quad P2 = 2.462 \times 10^3 \cdot \text{kPa}$$

Punkt 3    isokor värmning från 2

$$V3 := V2$$

$$P3 := \frac{R \cdot T3}{V3} = 3.593 \times 10^3 \cdot \text{kPa}$$

Punkt 4 - isobar kylning från 4 till 1 och adiabatisk expansion från 3 till 4

$$P4 := P1 \quad V4 := V3 \cdot \left( \frac{P3}{P4} \right)^{\frac{1}{\gamma}} \quad V4 = 0.033 \frac{\text{m}^3}{\text{mol}}$$

$$T4 := \frac{V4 \cdot P4}{R} = 393.059 \text{ K}$$

För den termiska verkningsgraden så behöver vi som sagt få fram tillfört värme och levererat arbete. Arbetet kan fås ur en energibalans över en cykel som  $W = -Q_{23} - Q_{41}$

För den isokora värmningen så är energibalansen (integrerad):  $\Delta U_{23} = Q_{23}$

$$Q_{23} := C_v \cdot (T_3 - T_2) \quad Q_{23} = 7.176 \times 10^3 \cdot \frac{\text{J}}{\text{mol}}$$

För den isobara kylningen så är  $\Delta U_{41} = Q_{41} + W_{EC,41} = Q_{41} - P_1 \Delta V_{41} = Q_{41} - R \Delta T_{41}$ , vilket ger  $Q_{41} = (C_v + R)(T_1 - T_4) = C_p(T_1 - T_4)$

$$Q_{41} := C_p \cdot (T_1 - T_4) = -2.699 \times 10^3 \cdot \frac{\text{J}}{\text{mol}} \quad W_{\text{max}} := -Q_{23} - Q_{41} = -4.477 \times 10^3 \cdot \frac{\text{J}}{\text{mol}}$$

$$\eta_{\theta} := \frac{-W}{Q_{23}} = 0.624$$

b) Maximal effektivitet fås med en "Carnot"-motor. För den är verkningsgraden

$$\eta_{\theta_{\text{max}}} := \frac{T_3 - T_1}{T_3} = 0.727$$

**Svar:** a) Verkningsgraden är 62%

b) Maximal verkningsgrad är 73%

## Uppgift 2 Omvandling geotermisk energi till arbete

Vi har tillgång till geotermisk energi i form av ett vattenflöde på 200 kg/s med temperaturen 280 C (mättad vätska) - punkt 1. Vattenflödet passerar en strypventil (till punkt 2), vilket gör att en del av flödet förångas. Vätskeandelen (ström 3) avskiljs, medan ångandelen (ström 4) tas till en turbin där vi utvinnet arbete.

Givet är att ström 3 och 4 har temperaturen 200 C och består av mättad vätska resp. ånga.

Därutöver har vi  $dm_1_{dt} := 200 \cdot \frac{\text{kg}}{\text{s}}$   $\eta_{\text{turbin}} := 0.85$   $P_5 := 100 \cdot \text{kPa}$

Ur ångtabell (E\_L appendix) fås

$$H_{1_{\text{ww}}} := 1236.88 \cdot \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \quad H_3 := 852.27 \cdot \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \quad H_4 := 2792.01 \cdot \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

För strypventilen gäller  $H_{2_{\text{ww}}} := H_1$   $dm_2_{dt} := dm_1_{dt}$

En massbalans för separationskärlet ger  $dm_2_{dt} = dm_3_{dt} + dm_4_{dt}$

En energibalans ger  $0 = dm_2_{dt} \cdot H_2 - dm_3_{dt} \cdot H_3 - dm_4_{dt} \cdot H_4$

$$\text{Kombinerat fås då} \quad dm_4_{dt} := dm_2_{dt} \cdot \frac{H_2 - H_3}{H_4 - H_3} = 39.656 \cdot \frac{\text{kg}}{\text{s}}$$

Det vi söker är i turbinen utvunnet arbete ( $-W_{\text{turbin}}$ )

En energibalans över turbinen ger  $W_{\text{turbin}} = dm_4_{dt} \cdot (H_5 - H_4)$

Från definition av verkningsgrad så fås  $W_{\text{turbin}} = dm_4_{dt} \cdot \eta_{\text{turbin}} \cdot (H_{5s} - H_4)$

Vi behöver alltså entalpin efter isentropisk expansion till  $P_5$  ( $H_{5s}$ )

Ur ångtabell  $S_4 := 6.4302 \cdot \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}}$   $SL_{100\text{kPa}} := 1.3028 \cdot \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}}$

$SV_{100\text{kPa}} := 7.3589 \cdot \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}}$  Ångfraktionen  $q$  blir

$$q := \frac{S_4 - SL_{100\text{kPa}}}{SV_{100\text{kPa}} - SL_{100\text{kPa}}} = 0.847$$

$$HV_{100kPa} := 2674.95 \cdot \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \quad HL_{100kPa} := 417.5 \cdot \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

$$H5is := HL_{100kPa} + q \cdot (HV_{100kPa} - HL_{100kPa}) = 2.329 \times 10^3 \cdot \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

$$W_{\text{turbin}} := dm4_{\text{dt}} \cdot \eta_{\text{turbin}} \cdot (H5is - H4) = -15.615 \cdot \text{MW}$$

**Svar:** Turbinen avger 15,6 MW

### Uppgift 3 - idealgasavvikelse

a) Vi har att ta fram ett uttryck för  $\Delta U = U(T2, P2) - U(T1, P1)$ .  
Vi kan skriva om detta som  $\Delta U = U(T2, P2) - Uig(T2, P2) + Uig(T2, P2) - Uig(T1, P1) - (U(T1, P1) - Uig(T1, P1))$

För att kunna beräkna  $U - Uig$  tar vi hjälp av vår givna tillståndsekvation

Given tillståndsekvation:

$$Z(P, T, a, b, R) := 1 + \left(b - \frac{a}{T}\right) \cdot \frac{P}{R \cdot T}$$

Detta är en funktion av  $P$  och  $T$  och i den uppgift som skall lösas är det också  $P$  och  $T$  som vi vet mest om, varför ekvationerna i E-L kapitel 7.6/8.6 är lämpligast. Där finns dock bara uttryck givna för H-Hig och S-Sig, så vi får även ta hjälp av E-L ekv. 7.20/8.20 som ger oss att

$$\frac{U - Uig}{RT} \equiv \frac{H - Hig}{RT} - (Z - 1) \quad \text{och 7.31/8.29 ger} \quad \frac{H - Hig}{RT} \equiv - \int_0^P \frac{T dZ}{P dT} dP$$

$$dZ_{dT}(P, T, a, b, R) := \frac{d}{dT} Z(P, T, a, b, R) \text{ simplify} \rightarrow \frac{P \cdot (2 \cdot a - T \cdot b)}{R \cdot T^3}$$

$$Z - 1 \equiv \left(b - \frac{a}{T}\right) \cdot \frac{P}{R \cdot T}$$

$$H_{Hig}(P, T, a, b, R) := \left( -R \cdot T \cdot \int_0^P \frac{T}{P} \cdot \frac{d}{dT} Z(P, T, a, b, R) dP \right) \rightarrow -\frac{P \cdot (2 \cdot a - T \cdot b)}{T}$$

$$U_{Uig}(P, T, a, b, R) := H_{Hig}(P, T, a, b, R) - \left(b - \frac{a}{T}\right) \cdot P \text{ simplify} \rightarrow -\frac{P \cdot a}{T}$$

Vi har alltså i detta fall att  $U - Uig$  (vid visst  $T$  och  $P$ ) =  $-aP/T$

Vi behöver nu också ett uttryck för  $\Delta U_{ig} = U_{ig}(T_2, P_2) - U_{ig}(T_1, P_1)$

Givet är att  $C_{pig} \equiv \alpha + \beta \cdot T$  vilket ger

$$C_{vig} \equiv C_{pig} - R \quad C_{vig} \equiv (\alpha - R) + \beta \cdot T$$

$$\Delta U_{ig}(T_1, T_2, \alpha, \beta, R) := \int_{T_1}^{T_2} (\alpha - R) + \beta \cdot T \, dT \rightarrow -\frac{(T_1 - T_2) \cdot (2 \cdot \alpha - 2 \cdot R + T_1 \cdot \beta + T_2 \cdot \beta)}{2}$$

Sammansättning och lite omstuvning ger det sökta uttrycket

$$\Delta U(T_1, P_1, T_2, P_2, R, a, b, \alpha, \beta) := P_2 \cdot \left( \frac{-a}{T_2} \right) - P_1 \cdot \left( \frac{-a}{T_1} \right) + (\alpha - R) \cdot (T_2 - T_1) + \frac{\beta}{2} \cdot (T_2^2 - T_1^2)$$

b) Uppgiften är att beräkna kylbehovet då temperaturen på en i en cylinder innesluten gas skall minskas från 400 K till 300 K.

En energibalans för ett slutet system ger  $n \cdot \Delta U \equiv Q$  För att beräkna  $\Delta U$  med ovanstående uttryck, så behöver vi få fram  $P_2$

Givet:  $\underline{P_1} := 3 \cdot \text{MPa}$   $\underline{T_1} := 450 \cdot \text{K}$   $\underline{T_2} := 350 \cdot \text{K}$

$$a := 0.17 \cdot \frac{\text{m}^3 \cdot \text{K}}{\text{mol}} \quad b := 290 \cdot 10^{-6} \cdot \frac{\text{m}^3}{\text{mol}}$$

$$\alpha := 25 \cdot \frac{\text{J}}{\text{mol} \cdot \text{K}} \quad \beta := 0.033 \cdot \frac{\text{J}}{\text{mol} \cdot \text{K}^2}$$

Vi vet att volymen är konstant, vilket också, eftersom massan inte ändras, att Volymiteten  $V$  är konstant.

Vi använder att  $Z = PV/(RT)$ , vilket ger

$$\underline{V_1} := \frac{R \cdot T_1}{P_1} \cdot Z(P_1, T_1, a, b, R) = 1.159 \times 10^{-3} \frac{\text{m}^3}{\text{mol}}$$

Vi har alltså att  $\underline{V_2} := V_1$

Från Z-ekvationen och definition så har vi

$$\frac{P_2 \cdot V_2}{R \cdot T_2} \equiv 1 + \left( b - \frac{a}{T_2} \right) \cdot \frac{P_2}{R \cdot T_2} \quad \text{dvs} \quad \underline{P_2} := \frac{1}{\frac{V_2}{R \cdot T_2} - \left( b - \frac{a}{T_2} \right) \cdot \frac{1}{R \cdot T_2}} = 2.147 \cdot \text{MPa}$$

Vilket ger  $Q/n$   $Q_n := \Delta U(T_1, P_1, T_2, P_2, R, a, b, \alpha, \beta) = -2.898 \cdot \frac{\text{kJ}}{\text{mol}}$

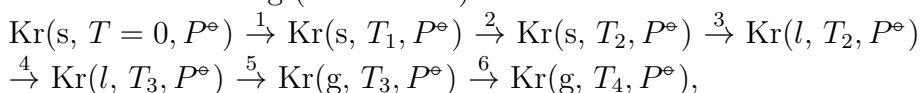
**Svar:** kylbehovet är 2,9 kJ/mol  $\Delta U_{ig}(T_1, T_2, \alpha, \beta, R) = -2.989 \cdot \frac{\text{kJ}}{\text{mol}}$

Kommentar - om gasen varit ideal så hade 3,0 J/mol behövts



## Lösningsförslag till tentamen i Termodynamik 2016-12-21, uppgifterna 4 och 5

4. En reversibel väg ( $P^\circ = 1$  bar):



där  $T_1 = 5.710$  K,  $T_2 = 115.8$  K,  $T_3 = 119.9$  K, och  $T_4 = 298.15$  K.

Grundekvationer:  $\Delta S = \int_{T_1}^{T_2} \frac{C_P}{T} dT$  och  $\Delta_{\text{tr}} S = \frac{\Delta_{\text{tr}} H}{T_{\text{tr}}}$ .

1. Utnyttja Debyes  $T^3$ -lag, dvs antag  $C_p = aT^3$ ,  $T \leq T_1$ :

$$\Delta S_1 = \int_0^{T_1} \frac{C_P}{T} dT = \frac{C_P(T_1)}{3} = \frac{2.241897}{3} \approx 0.747 \text{ J K}^{-1} \text{ mol}^{-1}.$$

2. Värmning av Kr(s) från  $T_1$  till  $T_2$ :

$$\Delta S_2 = \int_{T_1}^{T_2} \frac{a + bT + cT^2 + dT^3}{T} dT = \int_{T_1}^{T_2} \left( \frac{a}{T} + b + cT + dT^2 \right) dT = \\ a \ln \frac{T_2}{T_1} + b(T_2 - T_1) + \frac{c}{2} (T_2^2 - T_1^2) + \frac{d}{3} (T_2^3 - T_1^3) \approx 52.899 \text{ J K}^{-1} \text{ mol}^{-1}.$$

3. Fasomvandling vid jämvikt vid  $T_2$ :  $\Delta S_3 = \frac{\Delta_{\text{fus}} H}{T_2} \approx 14.162 \text{ J K}^{-1} \text{ mol}^{-1}$ .

4. Värmning av vätskeformig krypton från  $T_2$  till  $T_3$ :  $\Delta S_4 = \int_{T_2}^{T_3} \frac{C_P(l)}{T} dT = \\ C_P(l) \ln \frac{T_3}{T_2} \approx 1.519 \text{ J K}^{-1} \text{ mol}^{-1}$ .

5. Fasomvandling vid jämvikt vid  $T_3$ :  $\Delta S_5 = \frac{\Delta_{\text{vap}} H}{T_3} \approx 75.730 \text{ J K}^{-1} \text{ mol}^{-1}$ .

6. Värmning av gasformig krypton från  $T_3$  till  $T_4$ :  $\Delta S_6 = C_P(g) \ln \frac{T_4}{T_3} \approx \\ 18.935 \text{ J K}^{-1} \text{ mol}^{-1}$ .

Totala entropin (eftersom  $S(T = 0) = 0$  enligt tredje huvudsatsen):

$$S^\circ = \sum_{i=1}^6 \Delta S_i \approx \mathbf{164.0 \text{ J K}^{-1} \text{ mol}^{-1}}.$$

Resultatet är i god överensstämmelse med det statistiskt mekaniska resultatet:  $164.1 \text{ J K}^{-1} \text{ mol}^{-1}$ .

**5.a)** Från diagrammet (gäller vid  $T = 323.15$  K) uppskattas för  $x_1 = 0.1$   $P_{\text{tot}} \approx 321$  Torr och  $P_1 \approx 69$  Torr. Vidare framgår att  $P_1^* \approx 177$  Torr,  $P_2^* \approx 271$  Torr. Aktivitetsfaktorerna fås via  $a_i = \gamma_i x_i = P_i/P_i^*$ :

$$\begin{aligned}\gamma_1 &= \frac{P_1}{P_1^* x_1} \approx 3.898, \\ \gamma_2 &= \frac{P_{\text{tot}} - P_1}{P_2^* (1 - x_1)} \approx 1.033.\end{aligned}$$

Fria blandningsenergin blir ( $x_2 = 1 - x_1 = 0.9$ )

$$\Delta_{\text{mix}}G = RT[x_1 \ln(\gamma_1 x_1) + x_2 \ln(\gamma_2 x_2)] \approx \mathbf{-429} \text{ J mol}^{-1}.$$

Med  $\gamma_i = 1$  fås  $\Delta_{\text{mix}}G^{\text{is}} \approx -873$  J mol<sup>-1</sup> och

$$G^E = \Delta_{\text{mix}}G - \Delta_{\text{mix}}G^{\text{is}} \approx \mathbf{445} \text{ J mol}^{-1}.$$

**5.b)** Med  $\Delta_{\text{mix}}S^{\text{is}} = -R[x_1 \ln x_1 + x_2 \ln x_2] \approx 2.70289$  J K<sup>-1</sup> mol<sup>-1</sup> fås via definitionen av  $G$

$$\Delta_{\text{mix}}H = \Delta_{\text{mix}}G + T\Delta_{\text{mix}}S^{\text{is}} = G^E + \Delta_{\text{mix}}G^{\text{is}} - \Delta_{\text{mix}}G^{\text{is}} = G^E \approx \mathbf{445} \text{ J mol}^{-1}.$$

Den reguljära approximationen ger kvalitativt rätt beteende, men är inte särskilt noggrann i det aktuella fallet.

**5.c)** Det ideala systemet skulle ha totaltrycket

$$P_{\text{tot}}^{\text{is}} = \sum_i x_i P_i^* = x_1 P_1^* + (1 - x_1) P_2^* \approx \mathbf{262} \text{ Torr}.$$