

## TENTAMEN I TERMODYNAMIK för K2, Kf2 och TM2 (KVM091 och KVM090) 2016-01-05 kl. 08.30 - 12.30

Hjälpmiddel: Kursböckerna "Elliott-Lira: Introductory Chemical Engineering Thermodynamics" inklusive utdelat "Komplettering av föreläsningsmaterial" (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. 09.00 kommer Lennart Vamling, ankn. 3021 eller Nikola Markovic, ankn. 3114, att första gången vara tillgänglig i skrivsalen.

Lösningar finns anslagna 2016-01-07 på Industriella energisystems och -teknikers anslagstavla.

**Tentamen kommer att rättas anonymt.** Resultat meddelas via LADOK senast 2016-01-26

Granskning får ske 2016-01-28 kl. 12.00 - 12.30 och 2016-02-04, kl. 12.00 - 12.30

i Industriella energisystems och -teknikers seminarierum (rum 1212). Därefter kan tentor

hämtas ut från Energi och miljöns tentamensexpedition, EDIT-huset, plan 3, ingång

Maskingränd, rum 3434A (öppet mån-fre 12.30-14.30)

1. Stirlingmotorn har som fördel att den kan göras i det närmaste vibrationsfri och har därför kommit till användning i vissa typer ubåtar. Termodynamiskt kan dess cykel beskrivas med följande delsteg:

- |                   |                     |
|-------------------|---------------------|
| 1 $\rightarrow$ 2 | Isoterm kompression |
| 2 $\rightarrow$ 3 | Isokor värmning     |
| 3 $\rightarrow$ 4 | Isoterm expansion   |
| 4 $\rightarrow$ 1 | Isokor kylning      |

I punkt 1 är temperaturen 25 °C och trycket 100 kPa, medan trycket i punkt 2 är 600 kPa. Högsta temperaturen i cykeln är 1100 °C. Antag att cykeln genomförs i en cylinder (slutet kärl med variabel volym) som innehåller helium som kan anses vara idealgas med  $C_p = 20,8 \text{ J/(mol K)}$  och  $C_p/C_v = 1,67$

- a) Beräkna cykelns termiska verkningsgrad! (4 p)
- b) Antag att vi temporärt kan lagra värmnet från steg 4  $\rightarrow$  1 och därefter använda det i steg 2  $\rightarrow$  3. Vad blir då cykelns termiska verkningsgrad? (1 p)
- c) Vad är maximalt möjlig termisk verkningsgrad för en motorprocess med värmnetillförsel vid 1100 °C och kylning vid 25 °C? (1 p)

Totalt (6 p)

2. Vi har en värmepump som kan beskrivas som en standard-cykel, dvs. en cykel där tillståndet efter förångaren är gas vid mättnadstryck och tillståndet efter kondensorn vätska vid mättnadstryck. Arbetsmediet i anläggningen är HFC-134a. Vi vet också följande:

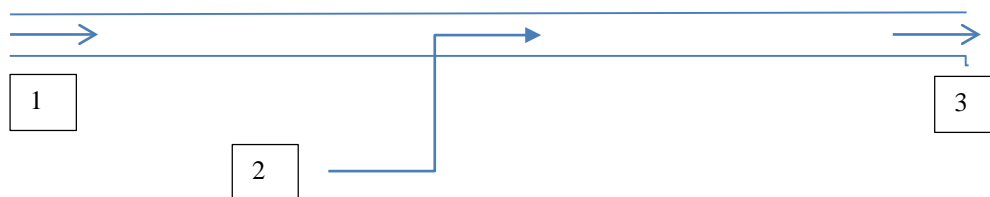
Temperatur vid förångningen	10 °C
Tryck i kondensorn	2 MPa
Kompressorns isentropverkningsgrad	0,7

- a) Vad blir värmepumpens COP för dessa data? (4 p)
- b) Det visar sig att temperaturen in till kompressorn måste vara 20 °C över förångningstemperaturen för att man skall kunna vara säker på att inte få in vätskedroppar i kompressorn. För att åstadkomma detta utan att behöva skaffa ytterligare utrustning, så sänks trycket i förångaren så att förångningstemperaturen blir -10 °C, medan utloppet behålls på 10 °C (dvs. utloppet är nu överhettat). Vad blir COP för detta fall? (2 p)

Det är tillåtet (och lämpligt) att använda sig av Elliott-Liras diagram för HFC-134a (appendix E.10/E.12) vid lösningen av uppgiften. Redovisa i detalj för vilka förhållanden (2 per punkt) uppgifter tas ur diagrammet.

Totalt (6 p)

3. För att befukta luft kan en anordning för att "spraya" in vatten användas:



Flödet vid punkt 1, som består av absolut torr luft med temperaturen  $T_1$  och trycket 100 kPa, är på 10 kg/s. Vatten med temperaturen 10 °C och trycket 100 kPa (ström 2) sprayas in i luftflödet. Målet är att luftströmmen vid punkt 3 skall ha temperaturen 10 °C, trycket 100 kPa och en vattenhalt sådan att vattnet precis börjar kondensera, dvs. att utflödet (ström 3) är en blandning av luft och vattenånga och någon enstaka vattendroppe. Systemet är så väl isolerat att det kan betraktas som adiabatiskt. Trycket kan antas konstant genom anläggningen.

- a) Hur mycket vatten behöver tillsättas (i kg/s) genom strömmen 2 och vilken temperatur  $T_1$  behöver den torra luften ha för att målet skall uppfyllas? (5 p)
- b) För att få en finfördelad spray behövs troligtvis ett högre tryck än 100 kPa i ström 2. Hur mycket förändras svaren i a) om trycket i ström 2 i stället är 1,0 MPa. (1 p)

*Ledning:* "Torr luft" kan beskrivas som en ideal gas med molvikten  $M_{\text{luft}}=29 \cdot 10^{-3}$  kg/mol och  $C_p=1005$  J/(kg K). "Fuktig lufts" gasfas kan beskrivas som en ideal blandning av vattenånga och "torr luft", medan vätskefasen (vid gas-vätske-jämvtikt) kan antas bestå av endast vatten. För förhållandena i denna uppgift kan dessutom Raoult's lag anses gälla.

Totalt (6 p)

4. a) Härled, utgående från huvudsatser, definitioner och generella räkneregler för partiella derivator, sambandet

$$\left(\frac{\partial H}{\partial P}\right)_T = -T \left(\frac{\partial V}{\partial T}\right)_P + V,$$

vilket gäller för ett slutet system där det enda arbetet är expansions-kompressions-arbete. (3 p)

b) Visa, utgående från ekvationen ovan, att värmekapacitetens isoterma tryckberoende ges av sambandet

$$\left(\frac{\partial C_P}{\partial P}\right)_T = -T \left(\frac{\partial^2 V}{\partial T^2}\right)_P.$$

(1 p)

c) Visa slutligen att för en gas som beskrivs av den trunckerade virialekvationen  $PV = RT + BP$  så gäller vid en isoterm tryckändring sambandet

$$\Delta C_P = -T \frac{d^2 B}{dT^2} \Delta P.$$

(2 p)

Totalt: 6 poäng

5. a) Vid förhöjd temperatur sönderfaller kvävedioxid enligt formeln



För att bestämma jämviktskonstanten för reaktionen införde man 0.100 mol  $\text{NO}_2$  i ett evakuerat tjockväggigt kärl av värmefast glas. Kärlet värmdes till 750 K. Då jämvikten ställt in sig var gasblandningens totaltryck 82681 Pa. Kärlets volym var 10.0 dm<sup>3</sup>. Beräkna dissociationsgraden,  $\alpha$ , för  $\text{NO}_2(\text{g})$  och jämviktskonstanten vid 750 K. Gaserna får betraktas som ideala. Standardtillstånd: ideal gas vid trycket 1 bar. **Ledning:** Dissociationsgraden är den bråkdel av reaktanten som dissocierat, dvs med  $n$  mol  $\text{NO}_2$  från början återstår vid jämvikt  $n(1 - \alpha)$  mol. (3 p)

b) Man har i litteraturen hittat  $\Delta G^\circ$ -värden för jämvikten ovan vid 500 K (40.3 kJ mol<sup>-1</sup>) och 1000 K (-35.0 kJ mol<sup>-1</sup>). Utnyttja denna information för att beräkna ett värde på jämviktskonstanten vid 750 K under antagandet att  $\Delta C_P^\circ$  approximativt är lika med noll i intervallet 500–1000 K.

(3 p)

Totalt: 6 poäng

## Lösningförslag termodynamik 2016-01-05

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

### Uppgift 1 - Stirlingcykel

Givet

$$\begin{aligned} T_1 &:= (273.15 + 25) \text{K} & P_1 &:= 0.1 \cdot \text{MPa} & C_p &:= 20.8 \cdot \frac{\text{J}}{\text{mol} \cdot \text{K}} \\ P_2 &:= 0.6 \cdot \text{MPa} & \kappa &:= 1.67 & C_v &:= \frac{C_p}{\kappa} = 12.455 \cdot \frac{\text{J}}{\text{mol} \cdot \text{K}} \end{aligned}$$

Givet är också högsta temperatur i cykeln, vilket är i punkt 3  $T_3 := 1100 \cdot \text{K} + 273.15 \cdot \text{K}$

Sökt är cykelns termiska verkningsgrad. Den definieras som  $\eta_\theta = \frac{-W_{\text{net}}}{Q_H}$

Vi behöver alltså netto arbete ( $W_{\text{net}}$ ) och tillförd värme (vid hög temp.).

För att få fram det så beräknar vi arbete och värme för delstegen (värme behövs dock inte alla).

#### 1 till 2

Idealgaslagen ger  $V_1 := \frac{R \cdot T_1}{P_1} = 0.025 \frac{\text{m}^3}{\text{mol}}$

Från 1 till 2 har vi en isoterm process.  $T_2 := T_1$

$$V_2 := \frac{R \cdot T_2}{P_2} = 4.132 \times 10^{-3} \frac{\text{m}^3}{\text{mol}}$$

$$W_{12} := -R \cdot T_1 \cdot \ln\left(\frac{V_2}{V_1}\right) = 4.442 \cdot \frac{\text{kJ}}{\text{mol}} \quad Q_{12} := -W_{12}$$

#### 2 till 3

Från 2 till 3 är förloppet isokort.  $V_3 := V_2$

$$P_3 := \frac{R \cdot T_3}{V_3} = 2.763 \cdot \text{MPa}$$

$$W_{23} := 0 \quad Q_{23} := C_v \cdot (T_3 - T_2) = 13.389 \cdot \frac{\text{kJ}}{\text{mol}}$$

#### 3 till 4

Från 3 till 4 är förloppet återigen isotermt. Från 4 till 1 är det isokort, varför  $V_4 = V_1$ .

$$V_4 := V_1 \quad T_4 := T_3 \quad P_4 := \frac{R \cdot T_4}{V_4} = 0.461 \cdot \text{MPa}$$

$$W_{34} := -R \cdot T_3 \cdot \ln\left(\frac{V_4}{V_3}\right) = -20.456 \cdot \frac{\text{kJ}}{\text{mol}} \quad Q_{34} := -W_{34} = 20.456 \cdot \frac{\text{kJ}}{\text{mol}}$$

#### 4 till 1

$$W_{41} := 0 \qquad Q_{41} := C_v \cdot (T_1 - T_4) = -13.389 \cdot \frac{\text{kJ}}{\text{mol}}$$

$$W_{\text{net}} := W_{12} + W_{34} = -16.015 \cdot \frac{\text{kJ}}{\text{mol}}$$

a) I detta fall så tillförs värme i steg 23 och 34, så att  $Q_{\text{Ha}} := Q_{23} + Q_{34} = 33.845 \frac{\text{kJ}}{\text{mol}}$

$$\eta_{\theta a} := \frac{-W_{\text{net}}}{Q_{\text{Ha}}} = 0.473$$

b) I detta fall så ersätts en del av det tillförda värmets med "lagrat" från steg 41, dvs

$$Q_{\text{Hb}} := Q_{23} + Q_{34} + Q_{41} = 20.456 \cdot \frac{\text{kJ}}{\text{mol}}$$

$$\eta_{\theta b} := \frac{-W_{\text{net}}}{Q_{\text{Hb}}} = 0.783$$

c) max möjligt "Carnot-motor" som har  $\eta_{\theta \text{max}} := \frac{T_3 - T_1}{T_3} = 0.783$

dvs det samma som för alternativ b.

Kommentar: Alternativ b) går inte att uppnå fullt i praktiken, eftersom det skulle kräva "oändligt stora" värmeväxlarytor.

*Svar: Cykelns verkningsgrad är 47 % resp 78%, 78% är max möjligt.*

### Uppgift 2 - Värmepump

Vi har en värmepumpscykel med HFC 134a som arbetsmedium. Sökt är värmepumpens COP (Coefficient of performance).

COP definieras som "avgivet värme (vid hög temp)"/"tillfört arbete" =  $Q_H/(-W_{\text{komp}})$

För att beräkna värmen och arbete så behöver vi entalpier för cykelns punkter. De kan vi få utgående från givna data och avläsning i diagram.

Numrering: 1 = inlopp förångare, 2 = inlopp kompressor, 3 = utlopp kompressor  
4 = utlopp kondensator

a) I denna uppgift har vi en standard-cykel

Punkt 2 (avläst för 10 C och mättad ånga)  $H_2 := 404 \cdot \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$

Punkt 4 (avläst för 2 MPa och mättad vätska)  $H_4 := 300 \cdot \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$

Punkt 3 (ideal kompression, alltså  $S=S_2$  och  $P=P_4$ )  $H_{3is} := 437 \cdot \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$

Det verkliga värdet för punkt 3 fås med hjälp av given uppgift om kompressorns isentropverkningsgrad

$$\eta_{\text{komp}} := 0.7$$

$$H_3 := H_2 + \frac{(H_{3is} - H_2)}{\eta_{\text{komp}}} = 451.143 \cdot \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \quad \text{vilket ger}$$

$$\text{COP} := \frac{H_3 - H_4}{H_3 - H_2} = 3.206$$

b) Vi behöver se till att inte få vätskedroppar in i kompressorn genom att se till att punkt 2 med marginal är överhettad. Överhettningen åstadkoms med hjälp av i förångaren tillfört värme - och för att göra det utan att behöva byta utrustning så har förångningstryck/temperatur behövt sänkas.

Ny punkt 2 (avläst för 10 C och  $P$ =mättnadstryck för -10 C)  $H_{2ny} := 410 \cdot \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$

Punkt 4 är samma som i a)

Ny punkt 3 (ideal kompression,  $S=S_{2ny}$  och  $P=P_4$ )  $H_{3isny} := 463 \cdot \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$

Det verkliga värdet fås på samma sätt som i a)

$$H_{3ny} := H_{2ny} + \frac{(H_{3isny} - H_{2ny})}{\eta_{\text{komp}}} = 485.714 \cdot \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \quad \text{vilket ger}$$

$$\text{COP} := \frac{H_{3ny} - H_4}{H_{3ny} - H_{2ny}} = 2.453$$

Svar: COP för standardcykel är 3,2. Om droppar skall undvikas genom sänkt förångartryck blir COP bara 2,4

### Uppgift 3 - ideal blandning/Fuktig luft

Vi har från början ström 1 med torr luft och ström 2 med vatten(vätska), som blandas och bildar ström 3.

Givet:  $P_1 := 100 \cdot \text{kPa}$   $P_2 := P_1$   $P_3 := P_1$

$T_2 := (10 + 273.15) \cdot \text{K}$   $T_3 := T_2$   $m_{\text{torrluft}} := 10 \cdot \frac{\text{kg}}{\text{s}}$

Vi vet också att vi i 3 har sådan vattenhalt att det precis börjat kondensera, dvs vi har en daggpunkt.

Ur tabell har vi att för vatten så är i punkt 3  $P_{\text{satw}} := 1.228 \cdot \text{kPa}$

I punkt 3 gäller även Raoult's lag:  $P_{yw} = P_{\text{satw}}$ . Eftersom lufts löslighet i vatten kan försummas så blir (w används för "water")

$$y_w := \frac{P_{\text{satw}}}{P_3} = 0.012$$

a) Sökt är hur mycket vatten som behöver tillföras och T1

Vi börjar med vattenflödet. Vi vet massflödet av torr luft och vi vet molandelen vatten i punkten 3, för vilken också gäller att  $y_w = n_w/(n_{\text{luft}} + n_w)$ , där  $n_{\text{luft}}$  beteckna flöde av torr luft mol/s. Med hjälp av det sambandet kan vi få fram  $n_w$ , men vi behöver molvikter för att komma vidare.

$$M_{\text{luft}} := 29 \cdot 10^{-3} \cdot \frac{\text{kg}}{\text{mol}} \quad M_w := 18 \cdot 10^{-3} \cdot \frac{\text{kg}}{\text{mol}}$$

$$n_{\text{luft}} := \frac{m_{\text{torrluft}}}{M_{\text{luft}}} = 344.828 \frac{\text{mol}}{\text{s}} \quad n_w := n_{\text{luft}} \cdot \frac{y_w}{(1 - y_w)} = 4.287 \frac{\text{mol}}{\text{s}}$$

och från molflödet kan vi få massflödet

$$m_w := n_w \cdot M_w = 0.077 \frac{\text{kg}}{\text{s}}$$

Vi behöver även få tag i temperaturen T1. Eftersom vi har en ideal blandning, så går det att hantera ämnena var för sig i.

En energibalans ger

$$m_{1\text{luft}} \cdot h_{1\text{luft}} + m_{2w} \cdot h_{2w} - m_{2w} \cdot h_{3w} - m_{1\text{luft}} \cdot h_{3\text{luft}} \equiv 0$$

som också skrivs

$$m_{1\text{luft}} \cdot C_{\text{pluft}}(T_1 - T_3) + m_{2w} \cdot (h_{2w} - h_{3w}) \equiv 0 \quad C_{\text{pluft}} := 1005 \cdot \frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot \text{K}}$$

Ur tabell får vi entalpierna för vatten

$$h_{2w} := 42.02 \cdot \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \quad h_{3w} := 2519.21 \cdot \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

$$\Delta T := m_w \cdot \frac{(h_{3w} - h_{2w})}{C_{\text{pluft}} \cdot m_{\text{torrluft}}} = 19.021 \text{ K} \quad \Delta T + 10 \cdot \text{K} = 29.021 \text{ K}$$

b) Vad skiljer om trycket på vattnet är högre? Det som ändras är entalpin för 2.

För vatten som vätska så gäller för dessa förhållanden  $\Delta H = VL\Delta P$

$$VL := 0.001 \cdot \frac{\text{m}^3}{\text{kg}} \quad \Delta P := 900 \cdot \text{kPa} \quad \Delta H := VL \cdot \Delta P = 900 \cdot \frac{\text{J}}{\text{kg}}$$

$$\Delta T_{\text{ny}} := m_w \cdot \frac{[h_{3w} - (h_{2w} + \Delta H)]}{C_{\text{pluft}} \cdot m_{\text{torrluft}}} = 19.014 \text{ K} \quad \Delta T_{\text{ny}} - \Delta T = -6.911 \times 10^{-3} \text{ K}$$

Svar: a) Vattenflödet behöver vara 0,077 kg/s och lufttemperaturen 29,0 C

b) En tryckändring ger en temperatursänkning på mindre än 0,01 C

## Lösningsförslag till tentamen i Termodynamik 2016-01-05, uppgifterna 4 och 5

**4.a)** Från definitionen  $H = U + PV$  fås  $dH = dU + PdV + VdP$ . För ett slutet system ges första huvudsatsen av  $dU = dQ + dW$  och andra huvudsatsen (för en reversibel process) av  $dS = dQ/T$  och med reversibelt EC-arbete gäller  $dW = -PdV$ , dvs  $dU = TdS - PdV$ . Insatt i uttrycket för  $dH$  fås  $dH = TdS + VdP$ . Dela med  $dP$  vid konstant  $T$ :

$$\left(\frac{\partial H}{\partial P}\right)_T = T \left(\frac{\partial S}{\partial P}\right)_T + V.$$

Den första termen på höger sida kan skrivas om med en Maxwellrelation. Variabler:  $T, P$ , dvs betrakta  $G = G(T, P)$ . Definitionerna av  $G$  och  $H$  ger  $G = H - TS = U + PV - TS$ . Differentiera och utnyttja resultatet för  $dU$ :

$$dG = dU + PdV + VdP - TdS - SdT = -SdT + VdP, \quad \text{dvs}$$

$$\left(\frac{\partial G}{\partial T}\right)_P = -S, \quad \left(\frac{\partial G}{\partial P}\right)_T = V$$

De blandade andraderivatorna:

$$\left[\frac{\partial}{\partial P} \left(\frac{\partial G}{\partial T}\right)_P\right]_T = \frac{\partial^2 G}{\partial P \partial T} = -\left(\frac{\partial S}{\partial P}\right)_T,$$

$$\left[\frac{\partial}{\partial T} \left(\frac{\partial G}{\partial P}\right)_T\right]_P = \frac{\partial^2 G}{\partial T \partial P} = \left(\frac{\partial V}{\partial T}\right)_P,$$

Eftersom andraderivatorna är lika ( $dG$  är en exakt differential) så gäller:

$$\left(\frac{\partial S}{\partial P}\right)_T = -\left(\frac{\partial V}{\partial T}\right)_P, \quad \text{dvs, vi har visat att}$$

$$\left(\frac{\partial H}{\partial P}\right)_T = -T \left(\frac{\partial V}{\partial T}\right)_P + V. \quad \text{Q.E.D.}$$

**4.b)** Derivera ekvationen ovan map  $T$  vid konstant  $P$ :

$$\frac{\partial^2 H}{\partial T \partial P} = -\left(\frac{\partial V}{\partial T}\right)_P - T \left(\frac{\partial^2 V}{\partial T^2}\right)_P + \left(\frac{\partial V}{\partial T}\right)_P$$



Deriveringsordningen kan ändras i vänsterledet:

$$\left[ \frac{\partial}{\partial P} \left( \frac{\partial H}{\partial T} \right) \right]_{P,T} = -T \left( \frac{\partial^2 V}{\partial T^2} \right)_P$$

Med definitionen av  $C_P$  fås

$$\left( \frac{\partial C_P}{\partial P} \right)_T = -T \left( \frac{\partial^2 V}{\partial T^2} \right)_P. \quad \text{Q.E.D}$$

**4.c)** Enligt virialekvationen gäller [eftersom  $B = B(T)$ ]:

$$V = \frac{RT}{P} + B, \quad \left( \frac{\partial V}{\partial T} \right)_P = \frac{R}{P} + \frac{dB}{dT}, \quad \left( \frac{\partial^2 V}{\partial T^2} \right)_P = \frac{d^2 B}{dT^2}.$$

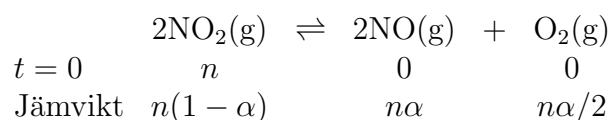
Sätt in i det generella sambandet och integrera:

$$\int_{C_P(P_1)}^{C_P(P_2)} dC_P = \int_{P_1}^{P_2} \left[ -T \left( \frac{\partial^2 V}{\partial T^2} \right)_P \right] dP = -T \frac{d^2 B}{dT^2} \int_{P_1}^{P_2} dP,$$

$$C_P(P_2) - C_P(P_1) = -T \frac{d^2 B}{dT^2} (P_2 - P_1)$$

$$\Delta C_P = -T \frac{d^2 B}{dT^2} \Delta P. \quad \text{Q.E.D}$$

**5.a)** Ämnesmängderna ( $n = 0.100$  mol):



Totala ämnesmängden vid jämvikt och sambandet med totaltrycket:

$$n_{\text{tot}} = n(1 - \alpha) + n\alpha + n\alpha/2 = n + n\alpha/2 = \frac{PV}{RT},$$

$$\alpha = 2 \left( \frac{PV}{nRT} - 1 \right) \approx 0.651794 \approx \mathbf{0.652}$$

Idealgasantagandet gör att vi kan approximera fugaciteter med partialtryck:

$$K = \prod_i a_i^{\nu_i} = \prod_i \left( \frac{\hat{f}_i}{P^\ominus} \right)^{\nu_i} \approx \prod_i \left( \frac{P_i}{P^\ominus} \right)^{\nu_i} = \frac{(P_{\text{NO}}/P^\ominus)^2 (P_{\text{O}_2}/P^\ominus)}{(P_{\text{NO}_2}/P^\ominus)^2} = \frac{P_{\text{NO}}^2 P_{\text{O}_2}}{P_{\text{NO}_2}^2 P^\ominus}$$

Eftersom  $P_i = n_i RT/V$  kan vi skriva (med  $P^\ominus = 10^5$  Pa):

$$K = \frac{RT}{VP^\ominus} \frac{n_{\text{NO}}^2 n_{\text{O}_2}}{n_{\text{NO}_2}^2} = \frac{RT}{VP^\ominus} \frac{(n\alpha)^2 (n\alpha/2)}{[n(1-\alpha)]^2} \approx \mathbf{0.712}$$

5.b) Eftersom  $\Delta C_p^\ominus \approx 0$  och  $\Delta H^\ominus$  följaktligen är  $T$ -oberoende kan vi utnyttja van't Hoff's ekvation. Låt  $T_1 = 500$  K,  $T_2 = 1000$  K:

$$-\frac{\Delta G_2^\ominus}{RT_2} + \frac{\Delta G_1^\ominus}{RT_1} = -\frac{\Delta H^\ominus}{R} \left( \frac{1}{T_2} - \frac{1}{T_1} \right),$$

vilket ger  $\Delta H^\ominus = 115600$  J mol<sup>-1</sup>. Använd van't Hoff igen med  $T = 750$  K:

$$-\frac{\Delta G^\ominus}{RT} + \frac{\Delta G_1^\ominus}{RT_1} = -\frac{\Delta H^\ominus}{R} \left( \frac{1}{T} - \frac{1}{T_1} \right),$$

$$\frac{\Delta G^\ominus}{RT} = \left[ \frac{\Delta H^\ominus}{R} \left( \frac{1}{T} - \frac{1}{T_1} \right) + \frac{\Delta G_1^\ominus}{RT_1} \right] = 0.424962 \quad (\Delta G^\ominus = 2650 \text{ J mol}^{-1}).$$

Jämviktskonstanten fås via  $\Delta G^\ominus = -RT \ln K$ , dvs

$$K = \exp(-\Delta G^\ominus/RT) \approx \mathbf{0.654},$$

i god överensstämmelse med det uppmätta värdet (inom 10%).