

TENTAMEN I TERMODYNAMIK för K2 och Kf2 (KVM090)

2009-08-27 kl. 14.00-18.00 i V

Hjälpmedel: Kursböckerna "Elliott-Lira: Introductory Chemical Engineering Thermodynamics" och "P. Atkins, L. Jones: Chemical Principles", "Tabeller och diagram i Energi- och kemiteknik" eller "Data och Diagram", "Physics Handbook", "BETA β " samt valfri kalkylator med tömt minne. För "Teknisk Termodynamikstudenter" tillåts även "Ekroth-Granryd – Tillämpad termodynamik"

För godkänt (betyg 3) krävs 15 poäng, för betyg 4 20 poäng och för betyg 5 25 poäng.

Senast kl. 15.30 kommer Lennart Vamling, ankn. 3021 eller Nikola Markovic, ankn. 3114, att första gången vara tillgänglig i skrivsalen.

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.

Lösningar finns anslagna 2009-08-28 på Värmeteknik och maskinläras anslagstavla.

Tentamen kommer att rättas anonymt. Resultat anslås senast 2009-09-14 på anslagstavlan för tentamensresultat, Kemihuset plan 4.

Granskning får ske 2009-09-18, kl. 11.45-12.25 i Värmeteknik och maskinläras bibliotek.

1. En kommun planerar en mindre biobränsleeldad kraftvärmeanläggning som skall leverera både el och fjärrvärme. Anläggningen är utformad som en enkel Rankine-cykel. Det i fjärrvärmenätet cirkulerande vattnet används för att kyla kondensorn. Om anläggningen vet vi:

Tryck före turbin	1,60 MPa
Temperatur före turbin	350 °C
Tryck efter turbin	0,050 MPa
Turbinens isentropverkningsgrad	0,75
Pumpenergier kan försummas och flödet ut från kondensorn kan antas bestå av mättad vätska.	

Beräkna förhållandet mellan från kraftvärmeanläggningen levererad el och levererad fjärrvärme, eller mer exakt $\frac{\text{från turbinen levererad effekt(arbete)}}{\text{i kondensorn avgiven effekt (värme)}}$ med hjälp av ovan angivna uppgifter/förutsättningar.

(5 p)

Lösningsförslag:

Punkt 3 H och S fås ur tabell

$$H_3 := 3146 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \quad S_3 := 7.0713 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}}$$

Vi behöver entropin för mättad vätska och mättad ånga vid samma tryck som punkt 4.

$$S_{4V} := 7.5930 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}} \quad S_{4L} := 1.0912 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}}$$

Med hjälp av detta och att det ideala förloppet är isentropiskt kan vi beräkna ångfraktionen efter ideal expansion

$$q_{is} := \frac{S_3 - S_{4L}}{S_{4V} - S_{4L}} \quad q_{is} = 0.92$$

När vi vet ångfraktionen kan vi även beräkna entalpin i punkt "4is"

$$H_{4L} := 340.54 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \quad H_{4V} := 2645.22 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

$$H_{4is} := (1 - q_{is}) \cdot H_{4L} + q_{is} \cdot H_{4V} \quad H_{4is} = 2.46 \times 10^3 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

Entropin efter "verklig" expansion fås ur definition av isentropverkningsgrad:

$$H_4 := H_3 - (H_3 - H_{4is}) \cdot \eta \quad H_4 = 2.632 \times 10^3 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

Låt α beteckna förhållandet mellan producerad el och levererad värme

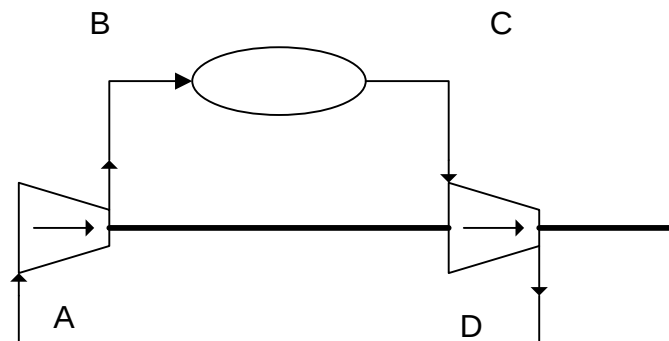
$$\alpha := \frac{H_3 - H_4}{H_4 - H_{4L}} \quad \alpha = 0.224$$

2. För en enkel gasturbin (standard Brayton-cykel) gäller att högsta trycket i cykeln är 1,50 MPa. I kompressorinloppet är temperaturen 300 K och trycket 100 kPa. Inloppstemperaturen i turbinen är 1500 K. Kompressorns isentropverkningsgrad är 88% och turbinens är 90%. Gasen får antas vara ideal med $C_p=1005 \text{ J/(kg K)}$, $C_p/C_v=1,4$ och molvikten $M=29 \cdot 10^{-3} \text{ kg/mol}$.

- a) Visa utgående bland annat ifrån energibalanser för cykelns delsteg och definitioner av verkningsgrader att Braytoncykelns termiska verkningsgrad η

$$\eta = \frac{T_C - T_D}{T_C - T_B} \eta_{\text{turbin}} + \frac{T_A - T'_B}{\eta_{\text{kompressor}}} \quad \text{där } T'_i \text{ betecknar temperaturen efter ideal (isentropisk) kompression eller expansion} \quad (3 \text{ p})$$

- b) Beräkna verkningsgraden η för ovan angivna förhållanden! (3 p)



Lösningssförslag:

- a) Huvudsteg i lösning, alla delsteg i energibalanser ej redovisade, de finns i E-L före nedan angivna ekvationer.

Definitioner:

$$\eta = \frac{\text{Avgivet arbete (netto)}}{\text{Tillfört värme vid hög temp}} = \text{E-L ekv. 4.1} \quad \frac{-\dot{W}_{AB} - \dot{W}_{CD}}{\dot{Q}_{BC}} = \frac{-W_{AB} - W_{CD}}{Q_{BC}}$$

$$\eta_{\text{turbin}} = \frac{\text{Tillfört arbete (verkligt)}}{\text{Tillfört arbete(idealt)}} = \text{E-L ekv. 3.43} \quad = \frac{\dot{W}_{AB}}{\dot{W}'_{AB}} = \frac{W_{AB}}{W'_{AB}}$$

$$\eta_{\text{kompressor}} = \frac{\text{Tillfört arbete (idealt)}}{\text{Tillfört arbete(verkligt)}} = \text{E-L ekv. 3.42} \quad = \frac{\dot{W}'_{CD}}{\dot{W}_{CD}} = \frac{W'_{CD}}{W_{CD}}$$

Energibalanser:

Turbin och kompressor (E-L ekv 2.49): $0 = -\Delta H + W_s$

Värmning (E-L ekv 2.45): $0 = -\Delta H + Q$

För idealgas gäller $\Delta H = C_p \Delta T$

Sammanställning ger efterfrågat uttryck.

b)

Givna uppgifter:

$$\kappa := 1.4 \quad C_p := 1005 \frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot \text{K}} \quad M := 29 \cdot 10^{-3} \cdot \frac{\text{kg}}{\text{mol}}$$

Se t.ex. figur 4.15 i E-L

$$P_A := 100 \text{ kPa} \quad T_A := 300 \text{ K}$$

$$T_C := 1500 \text{ K} \quad P_B := 1500 \text{ kPa}$$

OBS - i E-L exempel 4.7 så räknas med 100% verkningsgrad för turbin och förångare, så det exemplet kan inte användas rätt av!

Förändring över kompressorn:

Förlustfri (isentrop) kompression skulle leda till temperaturen T_{Bis}

$$T_{Bis} := \left(\frac{P_B}{P_A} \right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}} \cdot T_A \quad T_{Bis} = 650.35 \text{ K}$$

Den verkliga temperaturen blir

$$\eta_{\text{komp}} := 0.8$$

$$T_B := T_A + \frac{(T_{Bis} - T_A)}{\eta_{\text{komp}}} \quad T_B = 698.12 \text{ K}$$

Kompressorarbetet ges av

$$W_{BA} := C_p (T_B - T_A) \quad W_{BA} = 400.116 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

Motsvarande beräkningar för turbinen

$$\eta_{\text{turbin}} := 0.9$$

$$T_{Dis} := \left(\frac{P_A}{P_B} \right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}} \cdot T_C \quad T_{Dis} = 691.93 \text{ K} \quad T_D := T_C + (T_{Dis} - T_C) \cdot \eta_{\text{turbin}}$$

$$T_D = 772.74 \text{ K}$$

Arbetet tillfört till i turbinen blir

$$W_{DC} := C_p (T_D - T_C) \quad W_{DC} = -730.895 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

Den i brännkammaren tillförda effekten är

$$Q := C_p (T_C - T_B) \quad Q = 805.884 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \quad \eta := \frac{-W_{BA} - W_{DC}}{Q} \quad \eta = 0.41$$

Svar: Den termiska verkningsgraden är ca 41 %

3. Ett ämne A blandas med ett ämne B och innesluts i en behållare där **gas-vätske-jämvikt uppnås**. Temperaturen är 330 K och trycket mäts upp till 150 kPa. Ångtrycket för ämne B är så lågt att det får antas att gasfasen består av enbart ämne A. Ångtrycket för rent ämne A är vid 330 K 250 kPa. Dessutom gäller
- i) Ämnet A följer i gasfas tillståndsekvationen

$$\frac{PV}{RT} = 1 + \frac{BP}{RT}$$

där $B = 6,0 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3/\text{mol}$.

- ii) För vätskefasen gäller att

$$\frac{G_E}{RT} = A x_A x_B$$

där $A=0,5$.

- iii) Volymiteten i vätskefasen kan beräknas som $V_A x_A + V_B x_B$, där $V_A = 0,0005 \text{ mol/m}^3$ och $V_B = 0,0002 \text{ mol/m}^3$.

Beräkna med hjälp av dessa förutsättningar/uppgifter ett så noggrant värde som möjligt (dvs. med så få approximationer som möjligt) på molandelen av A i vätskefasen (x_A)! Förutsättning i), ii) och/eller iii) får bytas ut mot lämpligt vald approximation, men leder då till ett poängavdrag på 2, 3 resp. 1 poäng.

Ledning: Fullständig lösning kan kräva iteration. Lämpligt startvärde kan fås genom att först lösa uppgiften så approximativt som möjligt! Det räcker att redovisa 2 iterationer.

Observera att $x_B = 1 - x_A$ (7 p)

Lösningsförslag:

Vid gas-vätske-jämvikt måste som bekant fugaciteten i vätskefasen vara lika med fugaciteten i gasfasen. Med de mest noggranna (dvs de som tar hänsyn till mest faktorer) uttrycken för fugaciteterna så fås (E-L ekvationen ovanför ekv 11.1 eller från fig 11.2)

$$y_i \hat{\phi}_i P = x_i \gamma_i \hat{\phi}_i^{\text{sat}} P_i^{\text{sat}} \exp \left[\frac{V_i^L (P - P_i^{\text{sat}})}{RT} \right]$$

Vi har bara A i gasfasen, vilket gör att vi kan teckna den sökta molandelen som

$$x_A = \frac{\hat{\phi}_A P}{\gamma_A \hat{\phi}_A^{\text{sat}} P_A^{\text{sat}} \exp \left[\frac{V_A^L (P - P_A^{\text{sat}})}{RT} \right]}$$

Om vi nu approximerar fugacitets- och aktivitetsfaktorer med 1, så har vi Raults lag

$$x_A^{\text{start}} = \frac{P}{P_A^{\text{sat}}} = \frac{150}{250} = 0,60$$

För att få ett noggrannare värde, så behöver vi kunna beräkna bl.a.

fugacitetskoefficienterna i gasfas. En sådan kan fås om vi har en tillståndsekvation och en sådan finns i uppgiftstexten, förutsättning i). Det är virialekvationen som är given, och för den så finns i boken ett färdigt uttryck för fugacitetskoefficienten, nämligen (ekv. 8.29)

$$\ln \varphi = \frac{BP}{RT} \Rightarrow \varphi_A = \exp\left(\frac{BP_A}{RT}\right) = 1,0333 \quad \varphi_A^{sat} = \exp\left(\frac{BP_A^{sat}}{RT}\right) = 1,0562$$

Aktivitetsfaktorn i vätskefasen får vi från förutsättning 2, som är den s.k. "one-parameter Margule"s aktivitetsfaktormodell. För den gäller enligt exempel 11.4, ekv 11.16:

$$\ln \gamma_A = Ax_B^2 \Rightarrow \gamma_A = \exp A(1-x_A)^2 = 1,083 \text{ (med } x_A = x_A^{start} \text{)}$$

Till sist så behöver vi ett värde på den s.k. Poynting-korrektionen

$$\exp\left[\frac{V_A^L(P-P_A^{sat})}{RT}\right] = 0,9819$$

Med detta kan vi göra en första iteration och får då $x_A=0,552$, en andra iteration ger $x_A=0,541$.