

THERMODYNAMICA 2 **(WB1224)**

21 januari 2009
14.00 - 17.00 u.

AANWIJZINGEN

Het tentamen bestaat uit drie open vragen en 14 meerkeuzevragen. Voor de beantwoording van de meerkeuzevragen is een formulier bijgesloten.

Het tentamen is een **GESLOTEN BOEK** tentamen. Dit betekent dat tijdens het tentamen uitsluitend het uitgereikte formuleblad mag worden geraadpleegd.

Open vragen

Begin elk van de open vragen op een **nieuwe pagina**.

Opgave 3 moet op een afzonderlijk blad worden ingeleverd.

Zorg er voor dat het ingeleverde werk (elk blad afzonderlijk) is voorzien van **naam** en **studienummer**.

Geef bij het beantwoorden van de vragen zo duidelijk mogelijk aan hoe het antwoord is verkregen: laat zien welke relaties zijn gebruikt en waar deze relaties op zijn gebaseerd.

Vermeld bij alle berekeningen (ook in tussenstappen) de eenheden.

Meerkeuzevragen

Het formulier voor de beantwoording van de meerkeuzevragen wordt **een half uur voor het einde van het tentamen** opgehaald.

Gebruik voor het invullen van het formulier bij voorkeur een **blauw of zwart schrijvende pen**.

Per vraag mag slechts één hokje zwart worden gemaakt. Meer is fout.

Het is verstandig de keuze eerst op een kladblaadje te maken en pas na beantwoording van alle vragen het antwoordformulier voor de meerkeuzevragen in te vullen.

Puntentelling

De meerkeuzevragen bepalen het eindcijfer voor 30%.
De andere 70% wordt dus bepaald door de open vragen.

3 OPEN VRAGEN

OPGAVE 1

- Gegeven zijn twee dampspanningspunten voor benzene ($p^{sat}(T=300.K)=0.13759 \text{ bar}$ en $p^{sat}(T=320.K)=0.3196 \text{ bar}$). De temperatuur aan het tripel punt is $T^tr=278.5K$. Bepaal de dampspanning aan het tripel punt met behulp van de vergelijking van Clausius-Clapeyron.
- Schets voor benzene een p - T diagram, een p - v diagram, en een h - T diagram en geef aan waar de tripel punt ligt en (indien toepasbaar) welke 3 fasen coëxisteren. Geef bovendien de gebieden met damp, vloeistof en vaste fase aan.
- Bepaal de specifieke sublimatieenthalpie (in kJ/kg) van benzene aan het tripel punt met behulp van de gegevens van opgave a). De smelt-enthalpie bij $T^tr=278.5 \text{ K}$ is 9.9 kJ/mol . De molaire massa van benzene is $M=78.11 \text{ g/mol}$.
- Leid een vergelijking af voor de differentiële verandering van de molaire entropie, $d\bar{s}$, waarbij de entropie $d\bar{s}$ met een toestandsvergelijking $f(p, \bar{v}, T)$ en een warmtecapaciteit $\bar{c}_v = (\partial \bar{u} / \partial T)_v$ berekenbaar is. Begin met $d\bar{s} = \left(\frac{\partial \bar{s}}{\partial T} \right)_{\bar{v}} dT + \left(\frac{\partial \bar{s}}{\partial \bar{v}} \right)_T d\bar{v}$.

OPGAVE 2

Ethyleen ondergaat een compressie met begincondities 310 K en 20 bar naar eindcondities van 90 bar en 400 K . De compressie vindt plaats in een stationair proces. De entropieproductie is $\dot{\sigma}_{cv} / \dot{m} = 0.15 \text{ kJ}/(\text{kg K})$. Veranderingen in de kinetische en potentiële energie zijn verwaarloosbaar.

De molaire massa van ethyleen is $M_{\text{Ethyleen}}=28.05 \text{ kg/kmol}$; de warmte capaciteit van ethyleen in een toestand van ideaal gas is $c_p^{ig}=a+b \cdot T$ met $a=13.62 \text{ J}/(\text{mol K})$ en $b=0.100 \text{ J}/(\text{mol K}^2)$. De warmteoverdracht wordt gerealiseerd bij een gemiddelde temperatuur van $T^{trans}=360 \text{ K}$. De kritieke temperatuur van ethyleen is $T_c=283K$ en de kritieke druk is $p_c=51.2 \text{ bar}$.

- Formuleer de eerste en tweede hoofdwet voor deze toepassing

Met behulp van de 'departure function' diagrammen

- Bereken de warmtetoevoer (positief of negatief) in kJ per kg ethyleen bij het doorstromen van de compressor
- Bepaal de arbeid in kJ per kg ethyleen bij het doorstromen van de compressor

Bereken voor de inlaatcondities opnieuw de 'departure function' voor de enthalpie onder gebruikmaking van de Viriale toestandsvergelijking $p\bar{v}/(\bar{R}T)=1+B(T)/\bar{v}$. De tweede virial-coëfficiënt is $B(T)=\alpha+\beta/T$ in het relevante temperatuurgebied, met $\alpha=125 \text{ cm}^3/\text{mol}$ en $\beta=-78800 \text{ cm}^3K/\text{mol}$. Maak een onderverdeling in de volgende stappen:

- Bereken het molaire volume voor de inlaatcondities volgens de Viriale toestandsvergelijking
- Leid de formule af voor de enthalpie 'departure function' volgens de Viriale toestandsvergelijking
- Bereken de enthalpie 'departure' bij de inlaatcondities. (Als je c) niet hebt opgelost, mag je $1100 \text{ cm}^3/\text{mol}$ als molair volume aannemen (dan wordt 1 punt afgetrokken)

OPGAVE 3

In een stoomketel wordt per seconde 560 kg stoom geproduceerd. De stoom aan de uitlaat van de ketel heeft een druk van 180 bar en een temperatuur van 530°C. Voedingswater wordt aan de ketel toegevoerd met een temperatuur van 280°C. De wrijving in de ketel mag worden verwaarloosd. Warmte voor de stoomproductie wordt geleverd door een rookgasstroom die in de ketel wordt afgekoeld van $T_{fg, in} = 2060$ °C tot $T_{fg, uit} = 310$ °C. De soortelijke warmte van het rookgas mag over het gehele afkoeltraject als constant worden beschouwd.

De stoomketel bestaat uit een economizer, een verdamper en een oververhitter. In de economizer wordt het voedingswater opgewarmd van intreetemperatuur (= 280°C) tot kooktemperatuur, in de verdamper wordt de kokende vloeistof omgezet in verzadigde stoom en in de oververhitter wordt de verzadigde stoom opgewarmd tot de verlangde stoomtemperatuur (= 530°C).

De omgevingstemperatuur bedraagt 12°C.

De soortelijke warmte van het rookgas bedraagt: $c_p = 1.292$ kJ/kg K

In de onderstaande tabel zijn enkele thermodynamische eigenschappen van water vermeld die kunnen worden gebruikt bij het uitvoeren van de gevraagde berekeningen:

	T	p	x	h	s
toestand water/stoom	[°C]	[bar]	[-]	[kJ/kg]	[kJ/kg K]
0 (omgeving)	12	0,014	1	2523,6	8,8536
1 (inlaat economizer)	250	180	0	1086,5	2,7616
(kokend water)	356,96	180	0	1734,8	3,8765
(verzadigde stoom)	356,96	180	1	2513,9	5,1128
2 (uitlaat oververhitter)	530	180	1	3359,0	6,3366

Gevraagd:

- Bereken de massastroom rookgas die nodig is voor de productie van de verlangde hoeveelheid stoom.
- Bereken de exergie die door het rookgas wordt afgegeven in de ketel.
- Bereken de exergie die door het water wordt opgenomen in de ketel.

Figure A-5: Generalized entropy correction chart (entropy 'departure function')

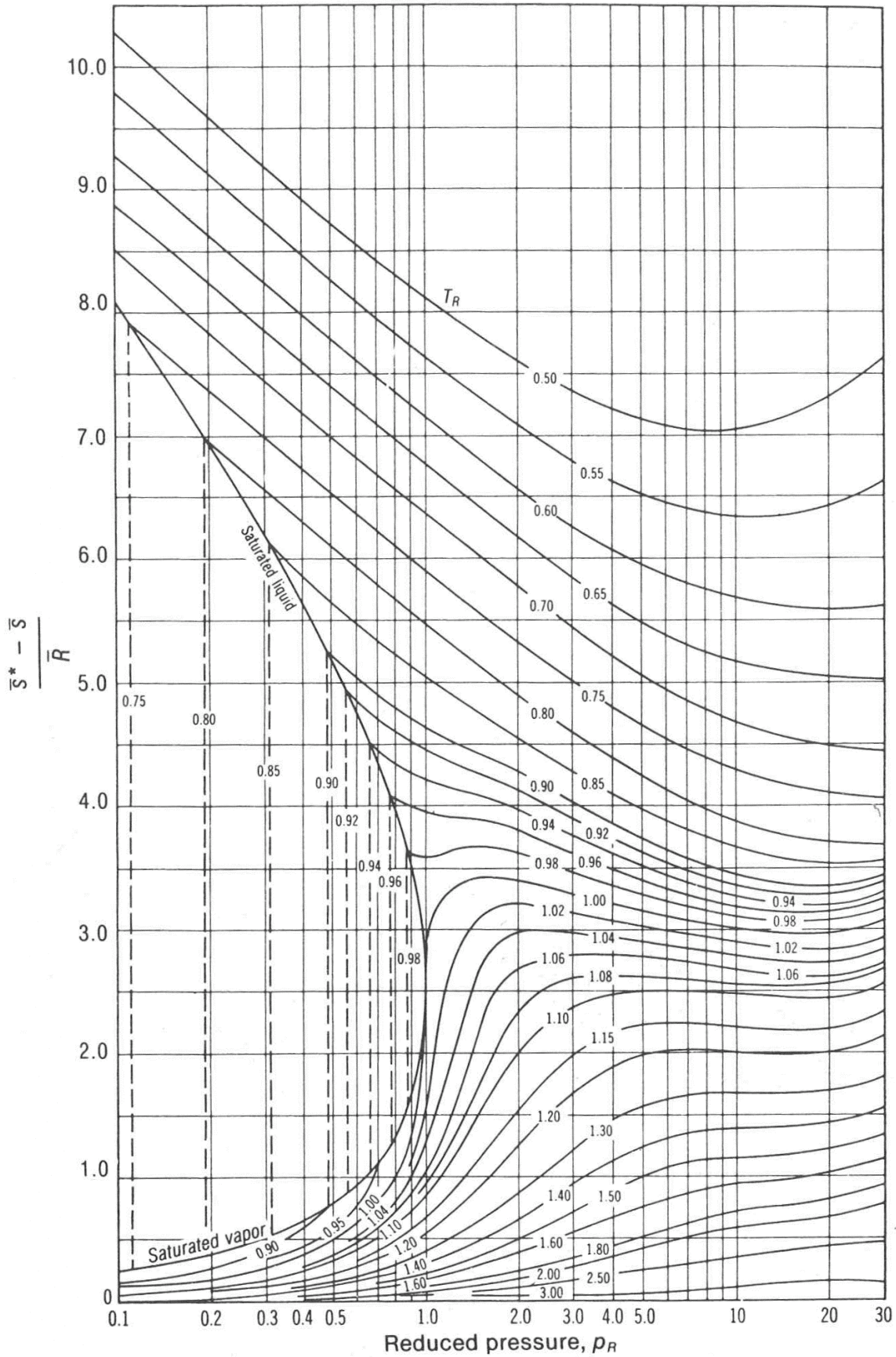
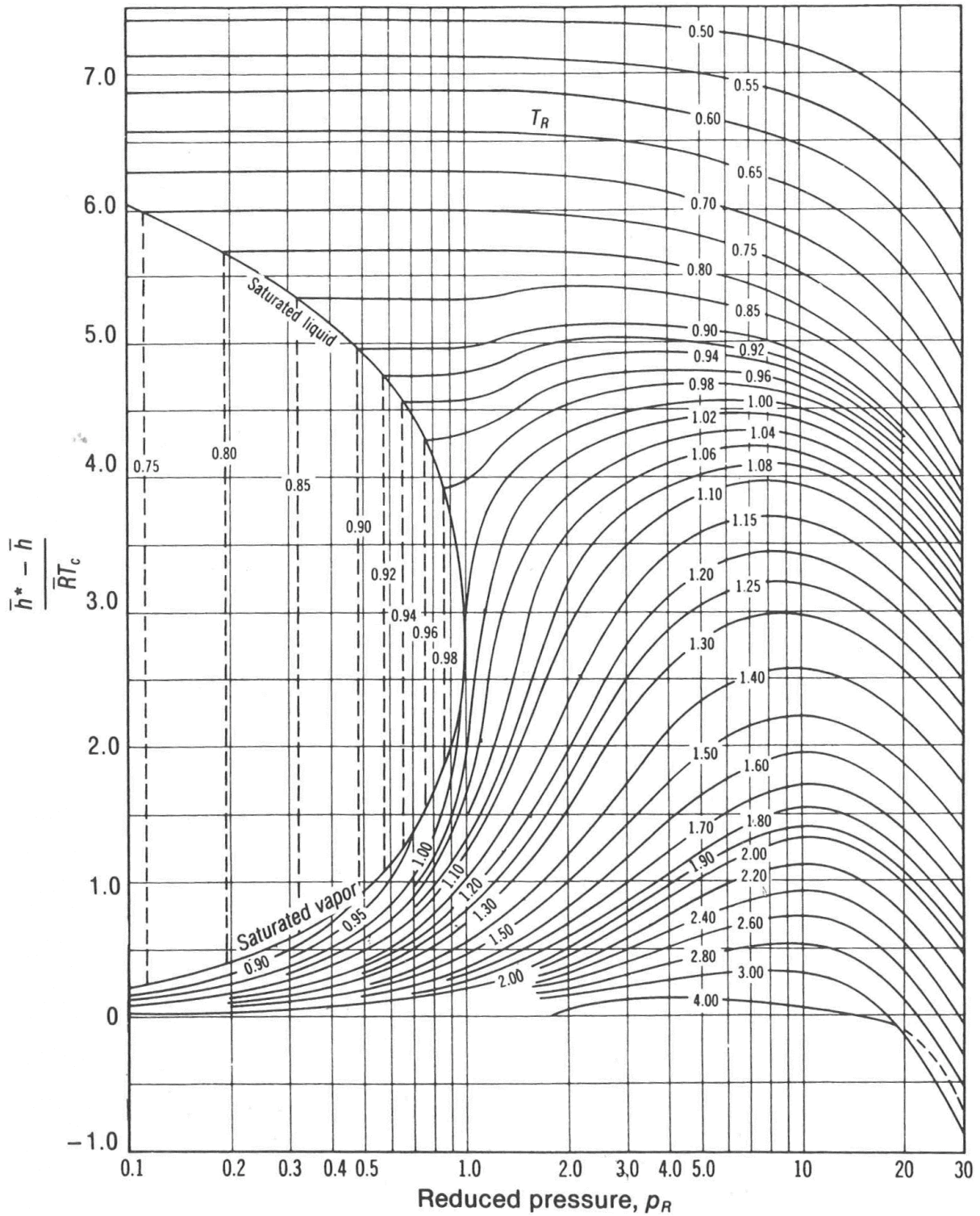


Figure A-4: Generalized enthalpy correction chart (enthalpy 'departure function')



14 MEERKEUZEVRAGEN THERMODYNAMICA 2 (WB1224)

Van de mogelijkheden a), b), c), d) is er slechts één goed.

MK1

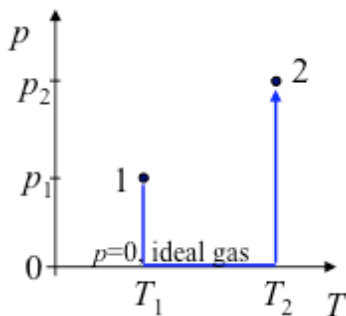
De druk $p(v, T)$ van een reële substantie

- kan alleen maar kleiner zijn dan een ideaal gas, $p < p^{ig}(v, T)$.
- kan alleen maar groter zijn dan een ideaal gas, $p < p^{ig}(v, T)$, zodra p hoger dan de kritieke druk is.
- kan alleen maar groter zijn dan een ideaal gas, $p > p^{ig}(v, T)$, want het vrije volume is door het moleculaire volume verkleint.
- kan zowel kleiner en groter zijn dan een ideaal gas.

MK2

Het enthalpieverschil van proces stappen voor compressoren, turbines etc. wordt vaak langs een integratiepad berekend, zo als hieronder geschetst. Dit is omdat

- het handig is, gezien de warmtecapaciteit van een ideaal gas $c_p^{ig}(T)$ dan alleen een functie van de temperatuur is.
- de integratie anders pad-afhankelijk is
- de integratie anders afhankelijk zou zijn van een referentie toestand
- een andere integratiepad is in tegenspraak met de tweede hoofdwet

**MK3**

De partiële afgeleide $\left(\frac{\partial G}{\partial T}\right)_{p, n_i} \dots$

- kan alleen maar positief zijn
- kan alleen maar negatief zijn
- kan positief of negatief zijn
- is negatief, en gelijk aan $-p$

MK4

Het 'corresponding state principe' ...

- zegt, dat een toestandsgrrootheid (state property) onafhankelijk is van het integratiepad
- zegt, dat de gelijke verdeling (equipartition) van de entropieproductie tot het meest efficiënte proces leidt
- zegt, dat het gedrag van pure componenten uniform is als de thermodynamische variabelen op een geschikte manier dimensieloos worden gemaakt
- zegt, dat twee toestanden van een procesgrrootheid (dus geen toestandsgrrootheid) geïntegreerd kunnen worden om een toestandsgrrootheid te verkrijgen

MK5

De chemische potentiaal

1. is voor een pure component gelijk aan de Gibbs energie

$$2. \text{ is } \mu_i = \left(\frac{\partial U}{\partial n_i} \right)_{S,V,n_{j \neq i}} = \left(\frac{\partial G}{\partial n_i} \right)_{T,p,n_{j \neq i}}$$

3. neemt voor een pure component met stijgende druk altijd toe

4. kan voor een pure component als deviatie functie (=‘departure function’) $\frac{\mu - \mu^{ig}}{RT} = \ln \varphi$

berekend worden, waarin φ de fugaciteitscoëfficiënt is

- a) 1, 2, en 4 zijn waar; 3 niet.
- b) 1, 3, en 4 zijn waar; 2 niet
- c) 1 en 4 zijn waar; 2 en 3 niet
- d) 1, 2, 3, en 4 zijn waar

MK6

De Van der Waals toestandsvergelijking (met positive parameters a en b) heeft de form

$$e) \quad p = \frac{\bar{R}T}{\bar{v} + b} - \frac{a}{\bar{v}^2}$$

$$f) \quad p = \frac{\bar{R}T}{\bar{v} + b} + \frac{a}{\bar{v}^2}$$

$$g) \quad p = \frac{\bar{R}T}{\bar{v} - b} - \frac{a}{\bar{v}^2}$$

$$h) \quad p = \frac{\bar{R}T}{\bar{v} - b} + \frac{a}{\bar{v}^2}$$

MK7

de fugaciteit f_i van een substantie i

1. is een “gecorrigeerde” druk, waarbij “gecorrigeerd” betekent, dat de niet-idealiteit is meegenomen

2. is als hulpgrootheid gedefinieerd, om de chemische potentiaal te berekenen

3. is nul, behalve voor mengsels

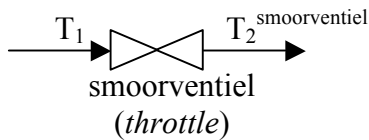
4. is nul voor mengsels

- a) 1 en 2 zijn waar; 3 en 4 niet
- b) 1, 2, en 4 zijn waar; 3 niet
- c) 2 en 4 zijn waar; 1 en 3 niet
- d) 2 en 3 zijn waar; 1 en 4 niet

MK8

Bij een smoorproces (*throttle*) zo als beneden geschetst

- is $h_2 = h_1$ en $T_2 = T_1$, maar alleen voor ideale gassen
- is $h_2 = h_1$ en $T_2 = T_1$ algemeen, uit het eerste hoofdwet voor open systemen
- is $h_2 > h_1$ en $T_2 > T_1$ voor ideale gassen, want de enthalpie h is alleen maar een functie van de temperatuur
- is $h_2 > h_1$ en $T_2 > T_1$ voor alle substanties



$$p_2 < p_1, \dot{Q} = 0, \dot{W} = 0$$

MK9

De Gibbs vergelijking $dU = TdS - pdV + \sum_{i=1}^n \mu_i dN_i$

- was verkregen door combinatie van de eerste en de tweede hoofdwet
- is een fundamentele vergelijking
- kan getransformeerd worden (met behulp van Legendre transformaties), naar fundamentele vergelijkingen van de Enthalpie, Helmholtz energie, en Gibbs energie
- beschijft de niet-idealiteit van processen
 - 1 en 3 zijn waar; 2 en 4 niet
 - 1, 2 en 3 zijn waar; 4 niet
 - 2 en 3 zijn waar; 1 en 4 niet
 - 1, 2 en 4 zijn waar; 3 niet

MK10

Het exergierendement van de processen die zich afspelen in een open stationair doorstroomd systeem kan in het algemeen op een zinnvolle manier worden bepaald door:

- De som van de uitgaande exergiestromen te delen door de som van de toegevoerde exergiestromen
- De exergie van de stromen die zijn te beschouwen als het product te delen door de exergie van de stromen die zijn te beschouwen als de bron voor dit product
- De geleverde arbeid te delen door de toegevoerde exergie
- Het exergieverlies te delen door de entropietoename
 - 2 is waar, 1, 3 en 4 niet
 - 2 en 3 zijn waar, 1 en 4 niet
 - 1, 2, en 3 zijn waar, 4 niet
 - 1 en 3 zijn waar, 2 en 4 niet

MK11

Het exergierendement van een elektriciteitscentrale verschilt doorgaans weinig van het energierendement. Het verschil wordt uitsluitend veroorzaakt doordat:

1. De exergie van de geproduceerde arbeid is minder dan de energie
2. Er ook exergie wordt afgevoerd met het koelwater
3. Het exergierendement van de generator niet gelijk is aan het energierendement
4. De exergie van brandstof niet gelijk is aan de verbrandingswaarde
 - a) 2 en 4 zijn waar, 1, en 3 niet
 - b) 1 is waar, 2, 3 en 4 niet
 - c) 2 en 3 zijn waar, 1 en 4 niet
 - d) 4 is waar, 1, 2, en 3 niet

MK12

Voor de bepaling van de (thermo-mechanische) exergie van een hoeveelheid stof wordt gebruik gemaakt van een systeem dat aan een aantal eisen moet voldoen:

1. Het systeem maakt alleen gebruik van reversibele processen
2. Het systeem wisselt geen warmte uit met de omgeving
3. Het systeem is isotherm
4. Het systeem wordt stationair doorstroomd
 - a) 1, 3 en 4 zijn waar, 2 niet
 - b) 2 en 3 zijn waar, 1 en 4 niet
 - c) 1 is waar, 2, 3 en 4 niet
 - d) 1 en 4 zijn waar, 2 en 3 niet

MK13

Voor een adiabatisch werkende stoomturbine met een inwendig rendement van 88% geldt dat:

1. de afgegeven arbeid gelijk is aan het enthalpieverschil tussen de toegevoerde en de afgevoerde stoom
2. het exergieverlies uitsluitend wordt bepaald door de omgevingstemperatuur en de entropietoename van de stoom in de turbine
3. de afgegeven arbeid gelijk is aan het exergieverschil tussen de toegevoerde en de afgevoerde stoom
4. het exergieverlies in de turbine gelijk is aan de exergie van de stoom aan de uitlaat van de turbine
 - a) 3 en 4 zijn waar, 1 en 2 zijn niet waar
 - b) 1, 2 en 3 zijn waar, 4 is niet waar
 - c) 2 en 3 zijn waar, 1 en 4 zijn niet waar
 - d) 1 en 2 zijn waar, 3 en 4 zijn niet waar

MK14

In een warmtewisselaar wordt water opgewarmd voor een centrale verwarmingsinstallatie door een warme gasstroom. Het exergieverlies in deze warmtewisselaar is groter indien:

1. De inlaattemperatuur van het gas hoger is
2. De druk van het gas lager is
3. De waterdruk hoger is
4. De gasstroom verder wordt afgekoeld
 - a) 1, 2 en 4 zijn waar, 3 niet
 - b) 1 en 4 zijn waar, 2 en 3 niet
 - c) 2 en 3 zijn waar, 1 en 4 niet
 - d) 1 is waar, 2, 3 en 4 niet

Tentamen 21 januari 2010
Antwoorden meerkeuzevragen

- | | |
|----|---|
| 1 | D |
| 2 | A |
| 3 | B |
| 4 | C |
| 5 | D |
| 6 | C |
| 7 | A |
| 8 | A |
| 9 | B |
| 10 | A |
| 11 | D |
| 12 | D |
| 13 | D |
| 14 | D |

Thermodynamica II - Januari 2010

opgave 1:

$$p_1^{\text{sat}} = p^{\text{sat}}(T=300\text{K}) = 0.13759 \text{ bar}$$

$$p_2^{\text{sat}} = p^{\text{sat}}(T=320\text{K}) = 0.3196 \text{ bar}$$

$$a) \ln \frac{p_2^{\text{sat}}}{p_1^{\text{sat}}} = - \frac{\Delta^{\text{LV}}\bar{h}}{R} \left(\frac{1}{T_2} - \frac{1}{T_1} \right)$$

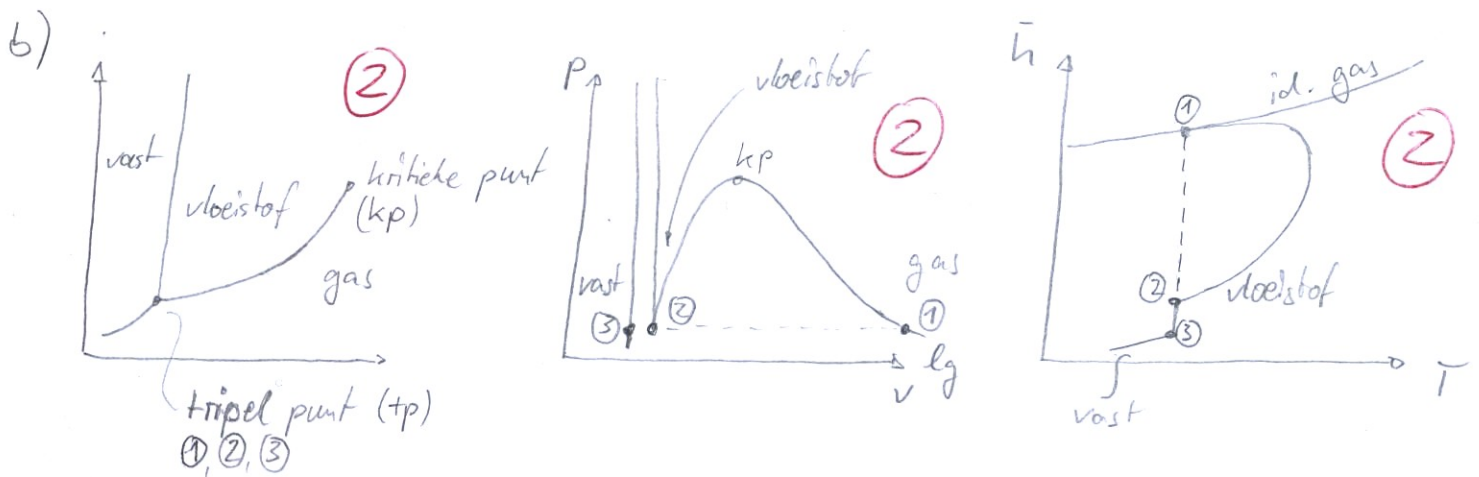
$$\Rightarrow \frac{\Delta^{\text{LV}}\bar{h}}{R} = - \frac{\ln \frac{p_2^{\text{sat}}}{p_1^{\text{sat}}}}{\left(\frac{1}{T_2} - \frac{1}{T_1} \right)} = - \frac{\ln \frac{0.3196 \text{ bar}}{0.13759 \text{ bar}}}{\frac{1}{320} - \frac{1}{300}} \text{ K} = 4046. \text{ K}$$

($\Delta^{\text{LV}}\bar{h} = 33.64 \frac{\text{kJ}}{\text{mol}}$) point given in c)

$$\ln \frac{p^{\text{tr.}}}{p_1} = - \frac{\Delta^{\text{LV}}\bar{h}}{R} \left(\frac{1}{T^{\text{tr.}}} - \frac{1}{T_1} \right)$$

$$p^{\text{tr.}} = p_1 \cdot \exp \left(- \frac{\Delta^{\text{LV}}\bar{h}}{R} \left(\frac{1}{T^{\text{tr.}}} - \frac{1}{T_1} \right) \right) = 0.13759 \text{ bar} \cdot \exp \left(-4046 \text{ K} \left(\frac{1}{278.5 \text{ K}} - \frac{1}{300 \text{ K}} \right) \right)$$

$$p^{\text{tr.}} = 0.0486 \text{ bar}$$



coëxisterende fasen { ① damp, ② vloeistof, ③ vast. } voor tripel punt.

$$c) \Delta^{sv} \bar{h} = \Delta^{sl} \bar{h} + \Delta^{lv} \bar{h} \quad (2) \quad (9.9 + 33.64) \frac{\text{kJ}}{\text{mol}} = 43.54 \frac{\text{kJ}}{\text{mol}} \quad (1/2)$$

$$\Delta^{sv} \bar{h} = 43.54 \frac{\text{kJ}}{\text{mol}} / 78.11 \frac{\text{g}}{\text{mol}} = 557 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \quad (1/2)$$

$$d) ds = \left(\frac{\partial s}{\partial T} \right)_v dT + \left(\frac{\partial s}{\partial v} \right)_T dv \quad (2)$$

$$du = T ds - p dv \quad \left(\frac{\partial p}{\partial T} \right)_v$$

$$\left(\frac{\partial u}{\partial T} \right)_v = T \left(\frac{\partial s}{\partial T} \right)_v - p \cdot 0 \quad (2)$$

$$\underbrace{\left(\frac{\partial u}{\partial T} \right)_v}_{c_v}$$

$$\Rightarrow ds = \frac{c_v}{T} dT + \left(\frac{\partial p}{\partial T} \right)_v dv \quad (1)$$

opgave 2



$$\dot{v}_{cv} = 0.15 \frac{\text{m}^3}{\text{kg} \cdot \text{K}}$$

$$M = 28.05 \frac{\text{kg}}{\text{kmol}}$$

$$a) \frac{\partial m_{cv}}{\partial t} = \dot{m}_1 - \dot{m}_2 \Rightarrow \dot{m}_1 = \dot{m}_2 = \dot{m}$$

$$= 0 \text{ (stationair)}$$

$$\frac{\partial E}{\partial t} = \dot{Q}_{cv} - \dot{W}_{cv} - \dot{m} (h_2 - h_1) \Rightarrow \boxed{\frac{\dot{W}_{cv}}{\dot{m}} = \frac{\dot{Q}_{cv}}{\dot{m}} - (h_2 - h_1)}$$

$$\frac{\partial s_{cv}}{\partial t} = \frac{\dot{Q}}{T_{\text{transf}}} - \dot{m} (s_2 - s_1) + \dot{G}_{cv} \Rightarrow \boxed{\frac{\dot{Q}_{cv}}{\dot{m}} = T_{\text{transf}} \cdot \left((s_2 - s_1) - \frac{\dot{G}_{cv}}{\dot{m}} \right)}$$

$$b) T_{r1} = \frac{310 \text{ K}}{283 \text{ K}} = 1.095 \quad (1/2)$$

$$p_{r1} = \frac{20 \text{ bar}}{51.2 \text{ bar}} = 0.391$$

$$T_{r2} = \frac{400 \text{ K}}{283 \text{ K}} = 1.413 \quad (1/2)$$

$$p_{r2} = \frac{90 \text{ bar}}{51.2 \text{ bar}} = 1.758$$

$$\left(\frac{h - h^{ig}}{RT_c} \right)_1 = -0.4 \quad (1/2)$$

$$\left(\frac{s - s^{ig}}{R} \right)_1 = -0.25$$

$$\left(\frac{h - h^{ig}}{RT_c} \right)_2 = -1.15 \quad (1/2)$$

$$\left(\frac{s - s^{ig}}{R} \right)_2 = -0.6$$

mit dia-grammen.

voor \dot{Q}/\dot{m} bereken eerst $(s_2 - s_1)$:

$$\textcircled{1} s_2 - s_1 = \frac{1}{M} (\bar{s}_2 - \bar{s}_1) = \frac{1}{M} \left[R \left(\left(\frac{\bar{s} - \bar{s}^{ig}}{R} \right)_2 - \left(\frac{\bar{s} - \bar{s}^{ig}}{R} \right)_1 \right) + \underbrace{(\bar{s}_2^{ig} - \bar{s}_1^{ig})}_{*} \right] \textcircled{1}$$

$$*: (\bar{s}_2^{ig} - \bar{s}_1^{ig}) = \int_{T_1}^{T_2} \frac{c_p^{ig}}{T} dT - R \ln \frac{p_2}{p_1} \quad \text{met } c_p^{ig} = a + b \cdot T$$

$$= a \ln \frac{T_2}{T_1} + b(T_2 - T_1) - R \ln \frac{p_2}{p_1} \textcircled{1}$$

$$= 13.62 \frac{\text{J}}{\text{mol} \cdot \text{K}} \ln \frac{400}{310} + 0.100 \frac{\text{J}}{\text{mol} \cdot \text{K}^2} (400 - 310) \text{K} - 8.314 \frac{\text{J}}{\text{mol} \cdot \text{K}} \ln \frac{90 \text{ bar}}{20 \text{ bar}}$$

$$+ 3.472 \frac{\text{J}}{\text{mol} \cdot \text{K}}$$

$$+ 9.0 \frac{\text{J}}{\text{mol} \cdot \text{K}}$$

$$- 12.50 \frac{\text{J}}{\text{mol} \cdot \text{K}}$$

$$= -0.0333 \frac{\text{J}}{\text{mol} \cdot \text{K}} \textcircled{1}$$

$$s_2 - s_1 = \frac{1}{28.05 \frac{\text{kg}}{\text{kmol}}} \left[8.314 \frac{\text{J}}{\text{mol} \cdot \text{K}} (-0.6 + 0.25) - 0.0333 \frac{\text{J}}{\text{mol} \cdot \text{K}} \right]$$

$$= -0.105 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}} \textcircled{1}$$

$$\frac{\dot{Q}_{cv}}{\dot{m}} = T_{\text{trast.}} \left((s_2 - s_1) - \frac{\dot{Q}_{cv}}{\dot{m}} \right) = 360 \text{K} \left(-0.105 - 0.15 \right) \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}}$$

$$\frac{\dot{Q}_{cv}}{\dot{m}} = -91.8 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \textcircled{1}$$

c) voor \dot{w}_c/\dot{m} bereken eerst $(h_2 - h_1)$

$$(h_2 - h_1) = \frac{1}{M} [\bar{h}_2 - \bar{h}_1] = \frac{1}{M} \left[R T_c \left(\left(\frac{\bar{h} - \bar{h}^{ig}}{R T_c} \right)_2 - \left(\frac{\bar{h} - \bar{h}^{ig}}{R T_c} \right)_1 \right) + \underbrace{(\bar{h}_2^{ig} - \bar{h}_1^{ig})}_{*} \right] \textcircled{1}$$

$$*: \bar{h}_2^{ig} - \bar{h}_1^{ig} = \int_{T_1}^{T_2} c_p^{ig} dT \quad \text{met } c_p^{ig} = a + b \cdot T$$

$$= a(T_2 - T_1) + \frac{1}{2} b(T_2^2 - T_1^2) = 13.62 \frac{\text{J}}{\text{mol} \cdot \text{K}} (400 - 310) \text{K}$$

$$= 4421 \frac{\text{J}}{\text{mol}} \textcircled{1} \quad \left[+ \frac{1}{2} 0.100 \frac{\text{J}}{\text{mol} \cdot \text{K}^2} (400^2 - 310^2) \text{K}^2 \right]$$

$$h_2 - h_1 = \frac{1}{28.05 \frac{\text{kg}}{\text{mol}}} \left[283 \cdot 8.314 \frac{\text{J}}{\text{mol}} (-1.15 + 0.4) + 4421 \frac{\text{J}}{\text{mol}} \right]$$

$$= 94.7 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \quad (1)$$

$$\frac{\dot{W}_{\text{cv}}}{\dot{m}} = \frac{\dot{Q}_{\text{cv}}}{\dot{m}} - (h_2 - h_1) = -91.8 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} - 94.7 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

$$\frac{\dot{W}_{\text{cv}}}{\dot{m}} = 186.5 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \quad (1)$$

$$d) \quad \frac{p\bar{v}}{RT} = 1 + B(T) \cdot \frac{1}{\bar{v}} \quad | \cdot v \cdot \frac{RT}{P}$$

$$\bar{v}^2 - \frac{RT}{P} \cdot \bar{v} - B(T) \cdot \frac{RT}{P} = 0$$

$$\bar{v} = \frac{1}{2} \left[\frac{RT}{P} \pm \sqrt{\left(\frac{RT}{P}\right)^2 + 4 \cdot B(T) \cdot \frac{RT}{P}} \right] \quad (1)$$

$$\frac{RT_1}{P_1} = \frac{8.314 \cdot 310 \frac{\text{J}}{\text{mol}}}{2 \cdot 10^6} = 1.2887 \cdot 10^{-3} \frac{\text{m}^3}{\text{mol}}$$

$$B(T_1) = \alpha + \beta/T = 125 \frac{\text{cm}^3}{\text{mol}} + \frac{-78800 \text{ cm}^3 \cdot \text{K} / \text{mol}}{310 \text{ K}} = -129.2 \frac{\text{cm}^3}{\text{mol}}$$

$$B(T_1) = -0.1292 \cdot 10^{-3} \frac{\text{m}^3}{\text{mol}}$$

$$\bar{v} = 1.144 \cdot 10^{-3} \frac{\text{m}^3}{\text{mol}} \quad (1)$$

$$e) \quad \bar{h} - \bar{h}^{ig} = \underbrace{RT(z-1)}_{B(T) \cdot \frac{1}{\bar{v}}} + \int_{\infty}^{\bar{v}} \left[T \left(\frac{\partial p}{\partial T} \right)_{\bar{v}} - p \right] d\bar{v}$$

$$p = \frac{RT}{\bar{v}} + B(T) \frac{RT}{\bar{v}^2}$$

$$T \left(\frac{\partial p}{\partial T} \right)_{\bar{v}} = \frac{RT}{\bar{v}} + B(T) \frac{RT}{\bar{v}^2} + \frac{RT^2}{\bar{v}^2} \left(\frac{dB(T)}{dT} \right)$$

$$= p$$

$$\bar{h} - \bar{h}^{ig} = B(T) \frac{RT}{\bar{v}} + RT^2 \left(\frac{dB}{dT} \right) \underbrace{\int_{\infty}^{\bar{v}} \frac{1}{\bar{v}^2} d\bar{v}}_{= -\frac{1}{\bar{v}}}$$

$$= \frac{RT}{\bar{v}} \left(B(T) - T \left(\frac{dB}{dT} \right) \right)$$

$$\text{mit } B(T) = \alpha + \frac{\beta}{T}, \quad \frac{dB}{dT} = -\frac{\beta}{T^2}$$

$$\bar{h} - \bar{h}^{ig} = \frac{RT}{\bar{v}} \left(\alpha + \frac{2\beta}{T} \right)$$

$$f) \quad \bar{h} - \bar{h}^{ig} = \frac{8.314 \frac{\text{J}}{\text{mol} \cdot \text{K}} \cdot 310 \text{K}}{1.144 \cdot 10^{-3} \frac{\text{m}^3}{\text{mol}}} \left(125 \frac{\text{cm}^3}{\text{mol}} + 2 \frac{(-78800) \frac{\text{cm}^3}{\text{mol}}}{310} \right) \cdot 10^{-6} \frac{\text{m}^3}{\text{cm}^3}$$

$$= -863.7 \frac{\text{J}}{\text{mol}}$$

$$h - h^{ig} = \frac{1}{M} \left(\bar{h} - \bar{h}^{ig} \right) = \frac{1}{28.05 \frac{\text{kg}}{\text{kmol}}} \cdot \left(-863.7 \frac{\text{kJ}}{\text{kmol}} \right)$$

$$= -30.8 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

OPGAVE 3

In een stoomketel wordt per seconde 560 kg stoom geproduceerd. De stoom aan de uitlaat van de ketel heeft een druk van 180 bar en een temperatuur van 530°C. Voedingswater wordt aan de ketel toegevoerd met een temperatuur van 250°C. De wrijving in de ketel mag worden verwaarloosd. Warmte voor de stoomproductie wordt geleverd door een rookgasstroom die in de ketel wordt afgekoeld van $T_{\text{fg}} = 2060 \text{ °C}$ tot $T_{\text{fg, uit}} = 310 \text{ °C}$. De soortelijke warmte van het rookgas mag over het gehele afkoeltraject als constant worden beschouwd.

De stoomketel bestaat uit een economizer, een verdamper en een oververhitter. In de economizer wordt het voedingswater opgewarmd van intreetemperatuur (= 250°C) tot kooktemperatuur; in de verdamper wordt de kokende vloeistof omgezet in verzadigde stoom en in de oververhitter wordt de verzadigde stoom opgewarmd tot de verlangde stoomtemperatuur (= 530°C).

De omgevingstemperatuur bedraagt 12°C.

De soortelijke warmte van het rookgas bedraagt: $c_p = 1.292 \text{ kJ/kg K}$

In de onderstaande tabel zijn enkele thermodynamische eigenschappen van water vermeld die kunnen worden gebruikt bij het uitvoeren van de gevraagde berekeningen:

	T	p	x	h	s
toestand water/stoom	[°C]	[bar]	[-]	[kJ/kg]	[kJ/kg K]
0 (omgeving)	12	0,014	1	2523,6	8,8536
1 (inlaat economizer)	250	180	0	1086,5	2,7616
(kokend water)	356,96	180	0	1734,8	3,8765
(verzadigde stoom)	356,96	180	1	2513,9	5,1128
2 (uitlaat oververhitter)	530	180	1	3359,0	6,3366

Gevraagd:

- Bereken de massastroom rookgas die nodig is voor de productie van de verlangde hoeveelheid stoom.
- Bereken de exergie die door het rookgas wordt afgegeven in de ketel.
- Bereken de exergie die door het water wordt opgenomen in de ketel.

Uitwerking

- a) *Bereken de massastroom rookgas die nodig is voor de productie van de verlangde hoeveelheid stoom.*

De hoeveelheid stoom die moet worden geproduceerd bedraagt: $\Phi_{m, w} = 560 \text{ kg/s}$

De hoeveelheid rookgas kan dan worden berekend met behulp van de energiebalans van de ketel:

$$\Phi_{m, fg} \cdot c_{p, fg} \cdot (T_{fg} - T_{fg, uit}) = \Phi_{m, w} \cdot (h_2 - h_1)$$

De massastroom rookgas is in deze vergelijking de enige onbekende, dus:

$$\Phi_{m, fg} = \frac{\Phi_{m, w} \cdot (h_2 - h_1)}{c_{p, fg} \cdot (T_{fg} - T_{fg, uit})} = \frac{560 \times (3359,0 - 1086,5)}{1,292 \times (2060 - 310)}$$

$$\Phi_{m, fg} = 562,8 \text{ kg/s}$$

- b) *Bereken de exergie die door het rookgas wordt afgegeven in de ketel.*

De exergie die door het rookgas wordt afgegeven is gelijk aan de exergie van de afgegeven warmte.

Deze exergie kan als volgt worden berekend:

$$Ex_{Q, fg, ketel} = \left(1 - \frac{T_0}{\bar{T}_{fg, ketel}}\right) \cdot Q_{ketel}$$

De warmte die in de ketel wordt afgegeven bedraagt:

$$Q_{ketel} = \Phi_{m, w} \cdot (h_2 - h_1) = 560 \times (3359,0 - 1086,5) = 1272600 \text{ kW}$$

De thermodynamisch equivalenten temperatuur van warmteoverdracht in de ketel is:

$$\bar{T}_{fg, ketel} = \frac{T_{fg} - T_{fg, uit}}{\ln \frac{T_{fg}}{T_{fg, uit}}} = \frac{2333,15 - 583,15}{\ln \frac{2333,15}{583,15}} = 1262,14 \text{ K}$$

De afgegeven exergie bedraagt dan:

$$Ex_{Q, fg, ketel} = \left(1 - \frac{285,15}{1262,14}\right) \cdot 1272600 = 985088 \text{ kW}$$

- c) *Bereken de exergie die door het water wordt opgenomen in de ketel.*

De exergie die door het water wordt opgenomen in de ketel kan worden berekend met de volgende vergelijking:

$$Ex_{w, ketel} = \Phi_{m, w} \cdot [(h_2 - h_1) - T_0 \cdot (s_2 - s_1)]$$

$$Ex_{w, ketel} = 560 \times [(3359,0 - 1086,5) - 285,15(6,3366 - 2,7616)]$$

$$Ex_{w, ketel} = 701710 \text{ kW}$$
