

THERMODYNAMICA 2 (WB1224)

22 januari 2009
14.00 - 17.00 u.

AANWIJZINGEN

Het tentamen bestaat uit twee of 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 de uitkomsten de eenheden en kijk of de gevonden waarden realistisch zijn. Zo niet, geef aan waarom.

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 50%.

De andere 50% wordt dus bepaald door de open vragen. Alle deelvragen tellen even zwaar mee.

3 OPEN VRAGEN

OPGAVE 1

- a) Leid een vergelijking af voor de differentiële verandering van de enthalpie, $d\bar{h}$, waarbij de enthalpie $d\bar{h}$ met een toestandsvergelijking $f(p, V, T)$ en een warmtecapaciteit berekenbaar is. Begin met

$$d\bar{h} = \left(\frac{\partial \bar{h}}{\partial T} \right)_p dT + \left(\frac{\partial \bar{h}}{\partial p} \right)_T dp.$$

- b) Schets voor een damp een diagram van de chemische potentiaal als functie van de druk. Geef de relatie ook in functievorm weer, voor een ideaal gas
- c) Schets een p - T diagram en een p - v diagram en geef de gebieden met damp, vloeistof en vaste fase aan
- voor een gewone pure component
 - voor water
- (schets dus 4 diagrammen in totaal)
- d) Gegeven zijn twee dampspanningspunten voor ammonia ($p^{\text{sat}}(T=243.15\text{K})=1.1950\text{ bar}$ en $p^{\text{sat}}(T=253.15\text{K})=1.9019\text{ bar}$), bepaal de dampspanning bij 25°C met gebruikmaking van de vergelijking van Clausius-Clapeyron.
- e) Bepaal de specifieke verdampingsenthalpie (in kJ/kg) van ammonia in het temperatuurgebied zo als gebruikt in vraag d). De molaire massa van ammonia is $M_{\text{NH}_3}=17.03\text{g/mol}$.

OPGAVE 2

Propyleen ondergaat een compressie met begincondities 380 K en 10 bar naar eindcondities van 80 bar en 440 K . De compressie vindt plaats in een stationair proces. De entropieproductie is

$$\dot{\sigma}_{cv} / \dot{m} = 0.10\text{ kJ}/(\text{kg K}).$$

Veranderingen in de kinetische en potentiële energie zijn verwaarloosbaar.

De molaire massa van propyleen is $M_{\text{Propyleen}}=42.08\text{ kg/kmol}$; de warmte capaciteit van propyleen in een toestand van ideaal gas veronderstellen we als constant met $c_p^{\text{ig}}=82.0\text{ J/(mol K)}$. De warmteoverdracht wordt gerealiseerd bij een gemiddelde temperatuur van $T^{\text{trans}}=410\text{ K}$.

De kritieke temperatuur van propyleen is $T_c=365\text{K}$ en de kritieke druk is $p_c=46.2\text{bar}$.

Met behulp van de 'departure function' diagrammen

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

Bereken voor de inlaatcondities opnieuw de 'departure function' voor de enthalpie onder gebruikmaking van de Viriale toestandsvergelijking $p\bar{v}/(\bar{R}T) = 1 + B(T)/\bar{v}$. 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 $1300\text{cm}^3/\text{mol}$ als molair volume aannemen (dan wordt 1 punt afgetrokken)

$$B(T=370\text{K}) = -219.0\text{ cm}^3/\text{mol}$$

$$B(T=380\text{K}) = -207.0\text{ cm}^3/\text{mol}$$

$$B(T=390\text{K}) = -195.0\text{ cm}^3/\text{mol}$$

OPGAVE 3

In een stoomketel wordt oververhitte stoom gegenereerd met een druk van 49 bar en een temperatuur van 450°C. De stoom wordt in een turbine geëxpandeerd voor de productie van asarbeid. De uitlaat van deze turbine is aangesloten op een stoomcondensator met een druk van 0,05 bar. De temperatuur van het gevormde condensaat is bij het verlaten van de condensator gelijk aan de verzadigingstemperatuur behorende bij de condensordruk.

Voor het uitvoeren van de gevraagde berekeningen zijn de volgende gegevens beschikbaar:

Water/stoom:

Toestand	Temperatuur [°C]	Druk [bar]	Enthalpie [kJ/kg]	Entropie [kJ/kg K]	Stoomfractie [-]
1	450	49	3318,9	6,8324	1
2f	32,9	0,05	137,8	0,4763	0
2g	32,9	0,05	2561,6	8,3960	1

Omgevingstemperatuur: $T = 20 \text{ °C}$

Isentropisch rendement turbine: $\eta_{s, \text{turb}} = 0,835$

Gevraagd

- Bepaal de massastroom stoom die nodig is als de turbine een asvermogen moet leveren van 25 MW. Bereken daarvoor eerst de enthalpie aan de uitlaat van de turbine.
- Bereken de exergie van de warmte die door de condenserende stoom in de condensator wordt afgegeven.

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

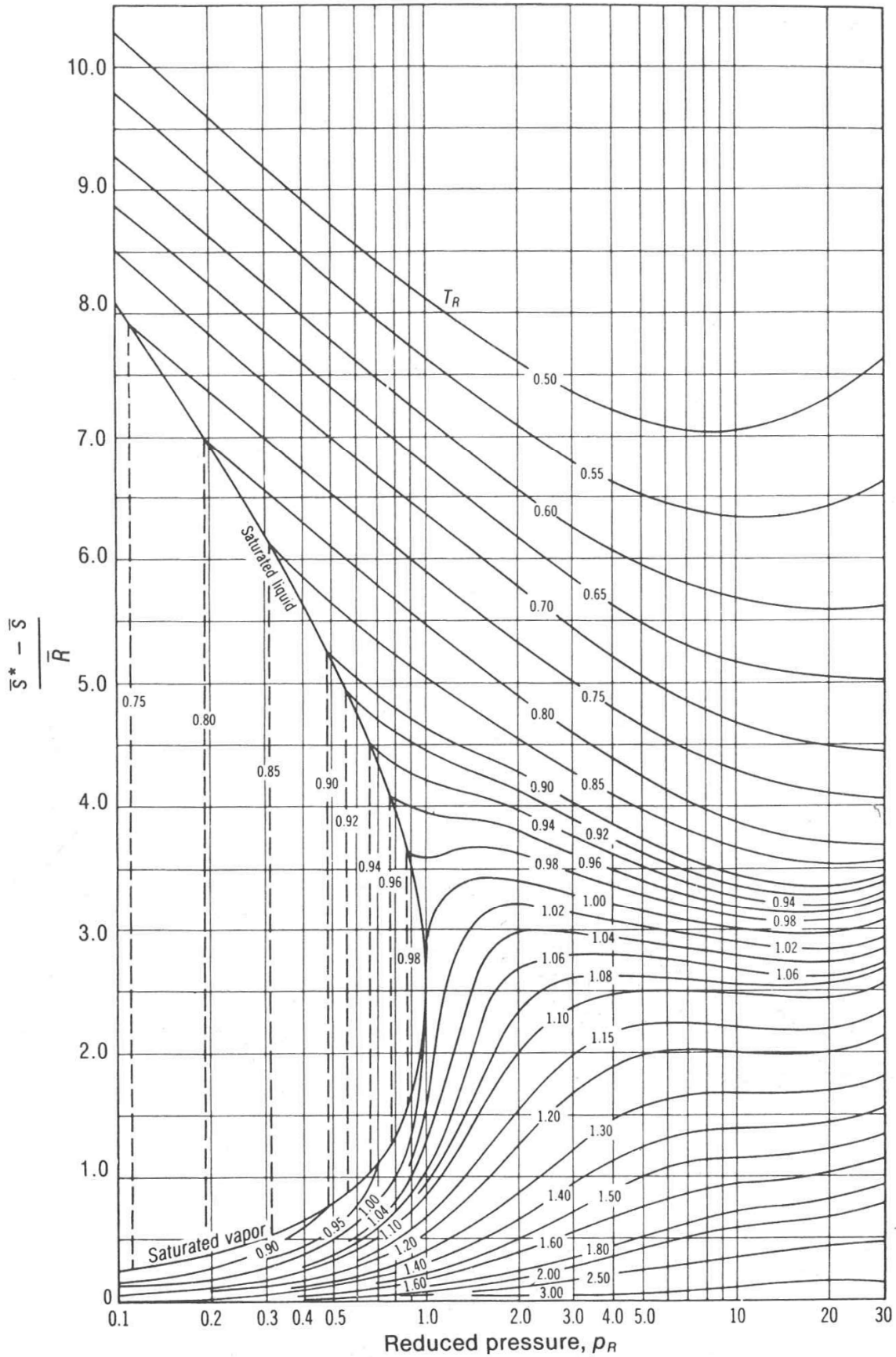
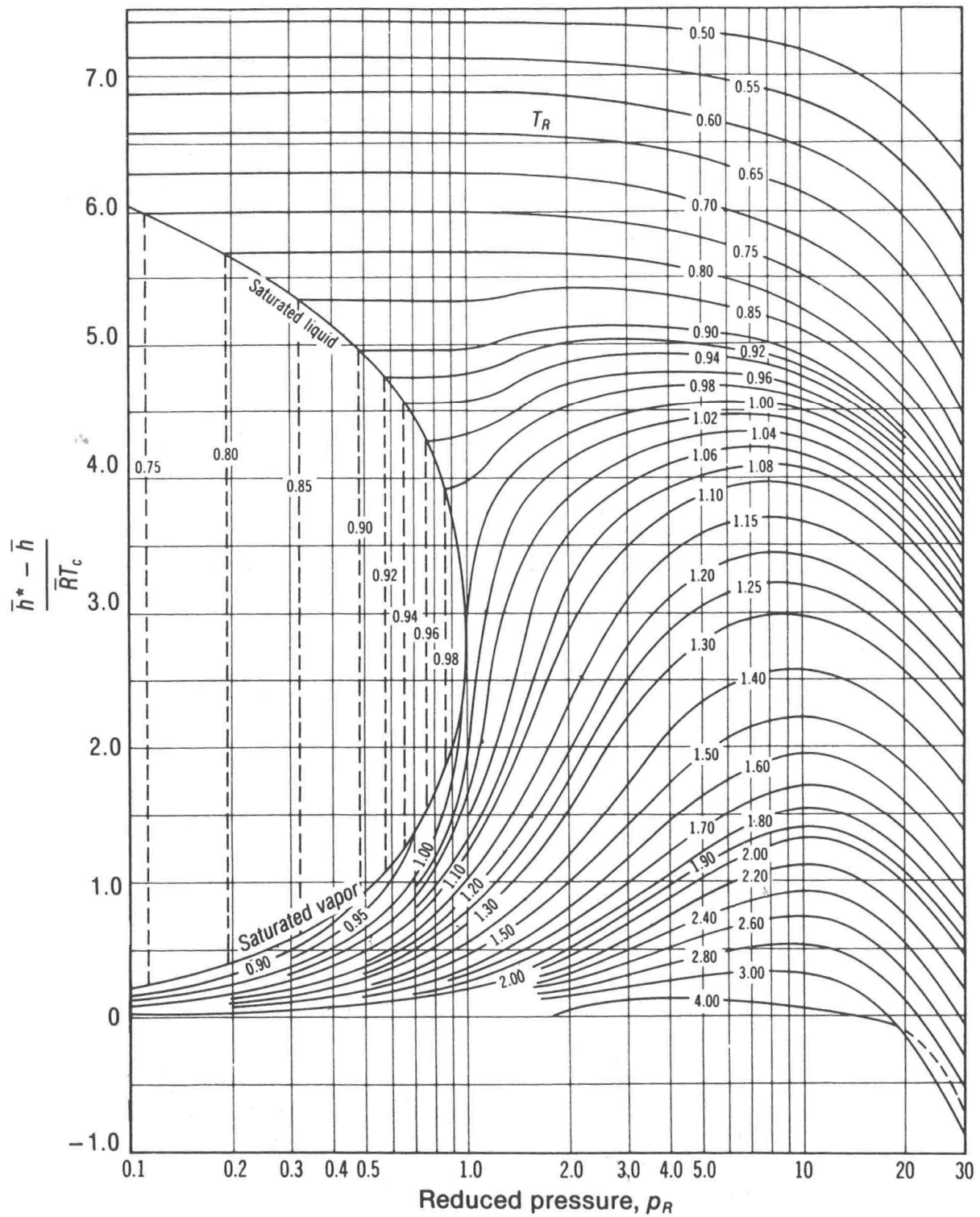


Figure A-4: Generalized enthalpy correction chart (enthalpy 'departure function')



14 MEERKEUZEVRAGEN THERMODYNAMICA 2 (WB1224)

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

MK1

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

- a) kan alleen maar positief zijn
- b) kan alleen maar negatief zijn
- c) kan positief of negatief zijn
- d) is gelijk aan $-p$

MK2

- a) Entropie heeft een moleculaire interpretatie als gemiddelde kinetische en potentiële energie van de moleculen
- b) Entropie is een pragmatische grootte, die nuttig is voor isobare processen in een gesloten systeem
- c) Entropie is een mate voor het aantal moleculaire configuraties
- d) Entropie is een behoudsgrootte; entropie kan in een systeem niet ontstaan of vernietigd worden

MK3

Het kritieke punt van een pure component is bepaald door de conditie

- a) $\left(\frac{\partial h}{\partial T}\right)_p = T \left(\frac{\partial s}{\partial T}\right)_p$
- b) $\left(\frac{\partial p}{\partial v}\right)_T = 0$
- c) $\left(\frac{\partial p}{\partial v}\right)_T = 0$, en $\left(\frac{\partial^2 p}{\partial v^2}\right)_T = 0$
- d) $\left(\frac{\partial p}{\partial T}\right)_v = 0$

MK4

Voor de chemische potentiaal μ_i geldt

- a) $\mu_i = \left(\frac{\partial U}{\partial n_i}\right)_{S, V, n_{j \neq i}} = \left(\frac{\partial G}{\partial n_i}\right)_{T, p, n_{j \neq i}}$
- b) $\mu_i = \left(\frac{\partial H}{\partial n_i}\right)_{T, p, n_{j \neq i}} = T \left(\frac{\partial S}{\partial n_i}\right)_{T, p, n_{j \neq i}}$
- c) $\mu_i = \left(\frac{\partial G}{\partial n_i}\right)_{T, p, n_{j \neq i}} = T \left(\frac{\partial S}{\partial n_i}\right)_{T, p, n_{j \neq i}}$
- d) $\mu_i = \left(\frac{\partial H}{\partial n_i}\right)_{S, p, n_{j \neq i}} = \left[v - T \left(\frac{\partial v}{\partial T}\right)_{p, n_{j \neq i}} \right]$

MK5

De inwendige energie kan uitgedrukt worden

- als $U(T, V, n_i)$ of als $U(T, p, n_i)$ of als $U(p, V, n_i)$; maar geen van deze functies is een fundamentele vergelijking
- als $U(T, V, n_i)$, maar niet als $U(T, p, n_i)$ en niet als $U(p, V, n_i)$.
- als $U(T, V, n_i)$ of als $U(T, p, n_i)$ of als $U(p, V, n_i)$; maar alleen de functie $U(T, V, n_i)$ is een fundamentele vergelijking
- als $U(S, V, n_i)$ of als $U(T, V, n_i)$; beide functies zijn fundamentele vergelijkingen

MK6

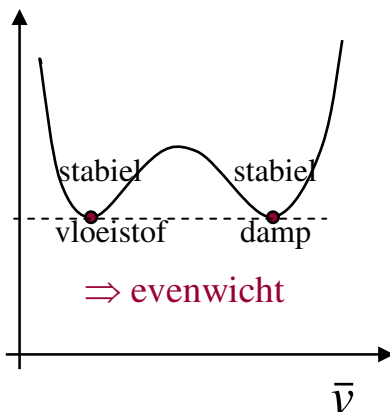
Het 'corresponding state principe' ...

- zegt, dat een toestandsgrrootheid (state property) onafhankelijk is van het integratie-pad
- 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

MK7

Kies voor het onderstaande diagram, geldend voor het evenwicht tussen damp en vloeistof, uit de volgende alternatieven:

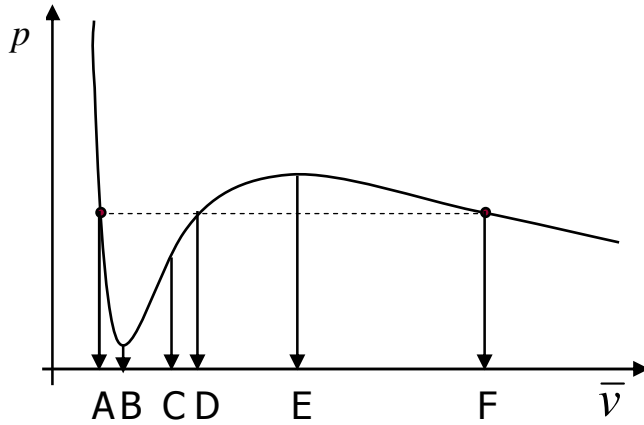
- de ordinaat (de Y-as) is de inwendige energie; het diagram geldt voor constante temperatuur, maar niet voor constante druk
- de ordinaat (de Y-as) is de inwendige energie; het diagram geldt voor constante temperatuur en voor constante druk
- de ordinaat (de Y-as) is de Gibbs energie; het diagram geldt voor constante temperatuur, maar niet voor constante druk
- de ordinaat (de Y-as) is de Gibbs energie; het diagram geldt voor constante temperatuur en voor constante druk



MK8

Een isotherm van de Van der Waals toestandsvergelijking is hieronder geschetst. (Punt B en E: de eerste afgeleide is nul; punt C: de tweede afgeleide is nul). De verschillende gebieden zijn

- | | | |
|---------------------|--------------------------|-------------------------|
| a) $v < B$ stabiel, | $B < v < C$ metastabiel, | $C < v < D$ instabiel |
| b) $v < B$ stabiel, | $B < v < C$ metastabiel, | $v > F$ stabiel |
| c) $v < A$ stabiel, | $A < v < B$ metastabiel, | $B < v < E$ instabiel |
| d) $v < A$ stabiel, | $A < v < B$ instabiel, | $B < v < E$ metastabiel |



MK9

De chemische potentiaal van een pure component:

- is gelijk aan de Gibbs energie. Hij kan berekend worden als de dampspannings-lijn en de warmtecapaciteit van de ideaal-gas toestand bekend zijn.
- is gelijk aan de Gibbs energie. Hij kan berekend worden als de entropie en de warmtecapaciteit van de ideaal-gas toestand bekend zijn
- kan als deviatie functie (=‘departure function’) $\frac{\mu - \mu^{ig}}{RT} = \ln \varphi$ berekend worden, waarin φ de fugaciteitscoëfficiënt is. De fugaciteitscoëfficiënt kan met behulp van een diagram in dimensieloze grootheden bepaald worden of anders met behulp van een toestandsvergelijking
- kan als deviatie functie (=‘departure function’) $\frac{\mu - \mu^{ig}}{RT} = \ln \varphi$ berekend worden, waarin φ de compressibiliteitsfactor is. De compressibiliteitsfactor kan met behulp van een diagram in dimensieloze grootheden worden bepaald

MK10

Van de volgende energiesoorten is de exergie gelijk aan de hoeveelheid energie:

- kinetische energie
 - warmte
 - elektrische energie
 - inwendige energie
 - potentiële energie
- 1, 3 en 5 zijn waar, 2 en 4 niet
 - 1 en 5 zijn waar, 2, 3 en 4 niet
 - 2, 3 en 4 zijn waar, 1 en 5 niet
 - 3 en 5 zijn waar, 1, 2 en 4 niet

MK11

Het waardediagram is een waardevol hulpmiddel voor het zichtbaar maken van exergieverliezen en exergiehoeveelheden in systemen waar warmte en warmteoverdracht een dominante rol spelen. Zo zijn in het waardediagram van een verwarmingsketel de volgende exergiehoeveelheden en -verliezen duidelijk zichtbaar:

1. Het exergieverlies ten gevolge van de verbranding van brandstof met lucht
2. De exergie die door het rookgas wordt afgegeven als dit wordt afgekoeld tot omgevingstemperatuur
3. Het exergieverlies als gevolg van de overdracht van warmte van het rookgas naar het water van het verwarmingssysteem
4. De exergie die door het rookgas wordt afgegeven nadat het rookgas de ketel heeft verlaten
 - a) 1 en 3 zijn waar, 2, en 4 niet
 - b) 1 is waar, 2, 3 en 4 niet
 - c) 1, 2 en 3 zijn waar, 4 niet
 - d) 1, 2, 3 en 4 zijn waar

MK12

Een hoeveelheid stof in "dead state" heeft de volgende eigenschappen:

1. de inwendige energie van de stof is gelijk aan nul
2. de stof is in evenwicht met de omgeving
3. de stof kan geen arbeid meer produceren
4. de entropie van de stof is gelijk aan nul
 - a) 2 is waar, 1, 3 en 4 niet
 - b) 2 en 3 zijn waar, 1 en 4 niet
 - c) 1, 2, 3 en 4 zijn waar
 - d) 1 en 3 zijn waar, 2 en 4 zijn niet waar

MK13

Het vochtgehalte in de laatste trappen van de lage druk turbine is een belangrijke parameter bij het ontwerpen van een stoomturbine. Bij een gegeven stoomdruk aan de inlaat van de turbine zal het vochtgehalte kleiner worden als:

1. de condensordruk wordt verhoogd
2. het inwendig rendement van de turbine wordt verbeterd
3. de temperatuur van de stoom aan de inlaat van de turbine wordt verhoogd
4. de stoom tussentijds wordt herverhit
 - a) 1, 2 en 4 zijn waar, 3 niet
 - b) 1 en 2 zijn waar, 3 en 4 niet
 - c) 2 en 4 zijn waar, 1 en 3 niet
 - d) 1, 3 en 4 zijn waar, 2 niet

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 minder 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 en 2 zijn waar, 3 en 4 niet

De juiste oplossingen voor de meerkeuze vragen zijn:
(tentamen wb1224, 22 januari 2009)

1b	2c	3c	4a	5a
6c	7d	8c	9c	10a
11d	12b	13d	14b	

opgave 1

$$a) \quad d\bar{h} = \underbrace{\left(\frac{\partial \bar{h}}{\partial T}\right)_p}_{\bar{c}_p} dT + \underbrace{\left(\frac{\partial \bar{h}}{\partial p}\right)_T}_{\rightarrow} dp$$

$$\rightarrow d\bar{h} = T d\bar{s} + \bar{v} dp$$

$$\Rightarrow \left(\frac{\partial \bar{h}}{\partial p}\right)_T = T \left(\frac{\partial \bar{s}}{\partial p}\right)_T + \bar{v} \left(\frac{\partial p}{\partial p}\right)_T$$

$$= -\left(\frac{\partial \bar{v}}{\partial T}\right)_p \quad (\text{Maxwell relatie})$$

$$\Rightarrow d\bar{h} = \bar{c}_p dT + \left[\bar{v} - T \left(\frac{\partial \bar{v}}{\partial T}\right)_p \right] dp$$

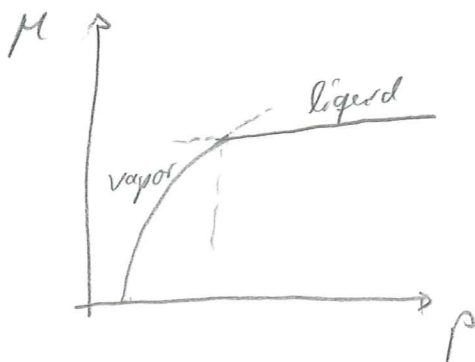
$$b) \quad d\mu = d\bar{g} = -\bar{s} dT + \bar{v} dp$$

$$\Rightarrow d\mu = \bar{v} dp \quad \text{voor isotherme condities}$$

$$\text{voor ideaal gas } \bar{v} = \frac{\bar{R}T}{p}$$

$$\Rightarrow d\mu^{ig} = \bar{R}T \frac{dp}{p} = \bar{R}T \cdot d \ln p$$

$$\mu^{ig}(T, p) = \mu^{ig}(T, p_0) + \bar{R}T \ln \frac{p}{p_0}$$



(1)

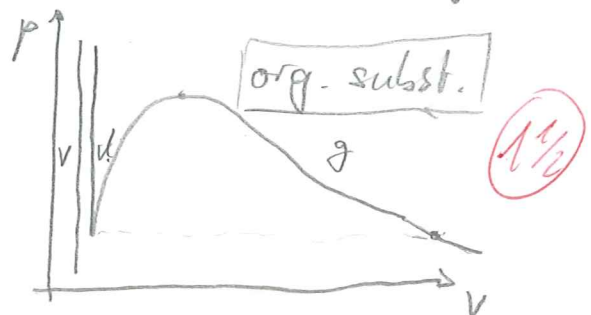
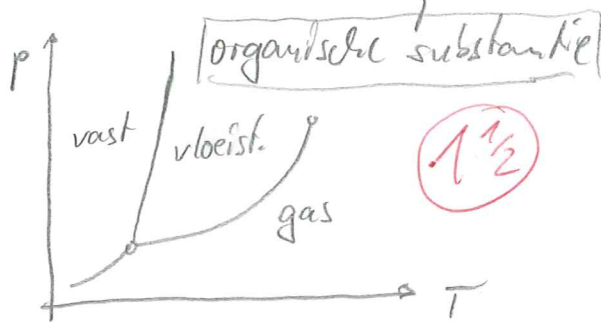
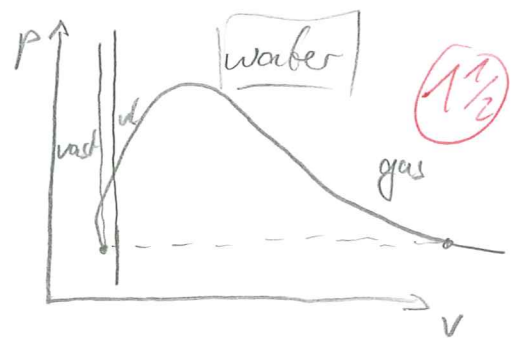
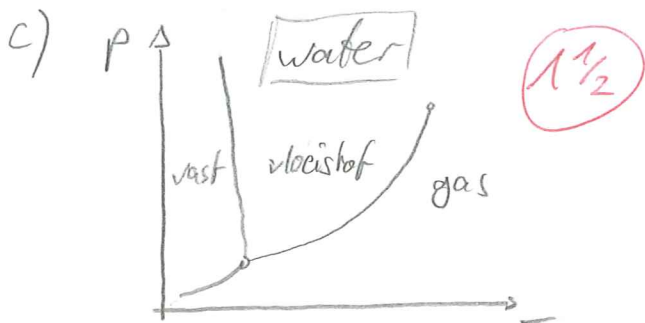
(1)

(1)

(1/2)

(1/2)

} bonus



d)

$$p_1 = p^{\text{sat}}(T = 243.15 \text{ K}) = 1.1950 \text{ bar}$$

$$p_2 = p^{\text{sat}}(T = 253.15 \text{ K}) = 1.9019 \text{ bar}$$

$$p_3 = p^{\text{sat}}(T = 298.15 \text{ K}) = ?$$

$$\ln \frac{p_2}{p_1} = - \frac{\Delta^{\text{vap}} \bar{h}}{R} \left(\frac{1}{T_2} - \frac{1}{T_1} \right) \quad \text{Clausius-Clapeyron}$$

$$\Rightarrow \frac{\Delta^{\text{vap}} \bar{h}}{R} = - \frac{\ln \frac{p_2}{p_1}}{\frac{1}{T_2} - \frac{1}{T_1}} = - \frac{\ln \frac{1.9019}{1.1950}}{\frac{1}{253.15 \text{ K}} - \frac{1}{243.15 \text{ K}}} = 2860. \text{ K} \quad (1)$$

$$\ln \frac{p_3}{p_2} = - \frac{\Delta^{\text{vap}} \bar{h}}{R} \left(\frac{1}{T_3} - \frac{1}{T_2} \right) \quad (1)$$

$$\Rightarrow p_3 = p_2 \cdot \exp \left(- \frac{\Delta^{\text{vap}} \bar{h}}{R} \left(\frac{1}{T_3} - \frac{1}{T_2} \right) \right) \quad (1)$$

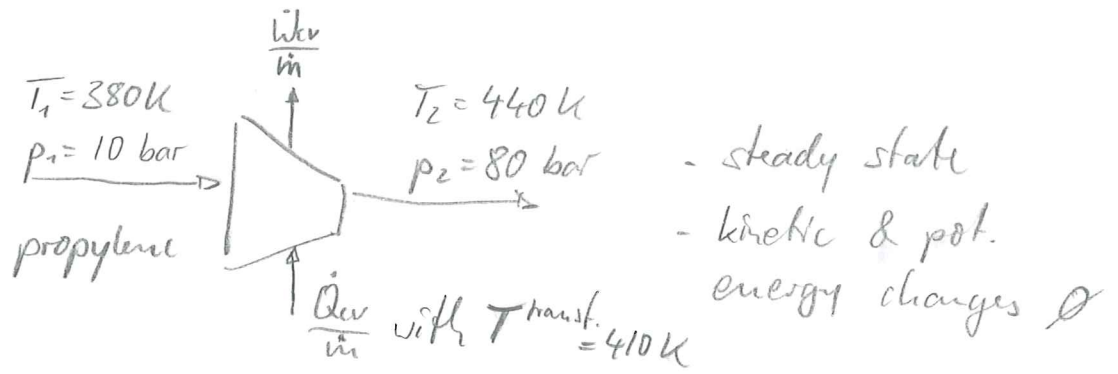
$$p_3 = 1.9019 \text{ bar} \cdot \exp \left(- 2860 \text{ K} \left(\frac{1}{298.15 \text{ K}} - \frac{1}{253.15 \text{ K}} \right) \right)$$

$$p_3 = 10.5 \text{ bar} \quad (1)$$

e) uit d) : $\frac{\Delta^{\text{vap}} \bar{h}}{R} \approx 2860 \text{ K}$ voor $243.15 \text{ K} < T < 253.15 \text{ K}$

$$\Delta^{\text{vap}} \bar{h} = \left(\frac{\Delta^{\text{vap}} \bar{h}}{R} \right) R / M_{\text{NH}_3} = 2860 \text{ K} \cdot 8.314 \frac{\text{J}}{\text{mol} \cdot \text{K}} \frac{1}{17.03 \frac{\text{g}}{\text{mol}}} = 1396 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \quad (1)$$

opgave 2



propylene : $M_{\text{C}_3\text{H}_6} = 42.08 \frac{\text{g}}{\text{mol}}$, $T_c = 365 \text{ K}$, $p_c = 46.2 \text{ bar}$
 $C_p^{ig} = 82.0 \frac{\text{kJ}}{\text{kmol} \cdot \text{K}}$

balance eqns :

mass balance : $\frac{d\dot{m}_{cv}}{dt} = \dot{m}_1 - \dot{m}_2 = \dot{m}$

1st law : $\frac{dE_{cv}}{dt} = \dot{Q}_{cv} - \dot{W}_{cv} + \dot{m} \left(h_1 - h_2 + \frac{V_1^2}{2} - \frac{V_2^2}{2} + g(z_1 - z_2) \right)$
 $\Rightarrow \boxed{\frac{\dot{W}_{cv}}{\dot{m}} = \frac{\dot{Q}_{cv}}{\dot{m}} - (h_2 - h_1)}$ (1/2)

2nd law : $\frac{dS_{cv}}{dt} = \frac{\dot{Q}_{cv}}{T_{\text{transf}}} + \dot{m} (s_2 - s_1) + \dot{S}_{cv}$
 $\Rightarrow \boxed{\frac{\dot{Q}_{cv}/\dot{m}}{T_{\text{transf}}} = (s_2 - s_1) - \dot{S}_{cv}/\dot{m}}$ (1/2)

Table 4/5 :

$TR_1 = \frac{T_1}{T_c} = \frac{380}{365} = 1.041$ (1/2)

$TR_2 = \frac{440}{365} = 1.205$ (1/2)

$PR_1 = \frac{p_1}{p_c} = \frac{10}{46.2} = 0.216$

$PR_2 = \frac{80}{46.2} = 1.732$ (1/2)

$\left(\frac{\bar{h} - \bar{h}^{ig}}{T_c \bar{R}} \right)_1 = -0.25$ (1/2)

$\left(\frac{\bar{h} - \bar{h}^{ig}}{T_c \bar{R}} \right)_2 = -1.8$ (1/2)

$\left(\frac{\bar{s} - \bar{s}^{ig}}{\bar{R}} \right)_1 = -0.2$

$\left(\frac{\bar{s} - \bar{s}^{ig}}{\bar{R}} \right)_2 = -1.2$

$$a) \quad \frac{\dot{Q}_{cv}/\dot{m}}{T_{trans}} = (s_2 - s_1) - \frac{\dot{b}_{cv}}{\dot{m}}$$

$$s_2 - s_1 = \frac{1}{M_{C_3H_6}} \left[(\bar{s} - \bar{s}^{ig})_2 - (\bar{s} - \bar{s}^{ig})_1 + (\bar{s}_2^{ig} - \bar{s}_1^{ig}) \right] \quad (1)$$

$$(\bar{s}_2^{ig} - \bar{s}_1^{ig}) = \int_{T_1=380K}^{T_2=440K} \frac{c_p^{ig}}{T} dT - \bar{R} \ln \frac{P_2}{P_1} \quad (1)$$

$$= c_p^{ig} \cdot \ln \frac{T_2}{T_1} - \bar{R} \ln \frac{P_2}{P_1} \quad (1/2)$$

$$= 82 \frac{J}{mol \cdot K} \ln \left(\frac{440}{380} \right) - 8.314 \frac{J}{mol \cdot K} \ln \left(\frac{80}{10} \right)$$

$$= (12.0215 - 17.2885) \frac{J}{mol \cdot K} = -5.267 \frac{J}{mol \cdot K} \quad (1/2)$$

1) Kesselstappen

$$\frac{\dot{Q}_{cv}}{\dot{m}} = T_{trans} \cdot \left\{ (s_2 - s_1) - \frac{\dot{b}_{cv}}{\dot{m}} \right\}$$

$$= 410K \left\{ \frac{1}{42.08 \frac{g}{mol}} \left[8.314 \frac{J}{mol \cdot K} (-1.2 + 0.2) - 5.267 \frac{J}{mol \cdot K} \right] - 0.1 \frac{kJ}{kg \cdot K} \right\}$$

$$= 410K \left\{ \underbrace{-\frac{13.581}{42.08} \frac{kJ}{kg \cdot K}}_{-0.3227} - 0.1 \frac{kJ}{kg \cdot K} \right\} = -173.3 \frac{kJ}{kg} \quad (1)$$

$$b) \quad \frac{\dot{W}_{cv}}{\dot{m}} = \frac{\dot{Q}_{cv}}{\dot{m}} - (h_2 - h_1)$$

$$h_2 - h_1 = \frac{1}{M_{C_3H_6}} \left[\bar{R} \cdot T_c \left\{ \left(\frac{h - h^{ig}}{RT_c} \right)_2 - \left(\frac{h - h^{ig}}{RT_c} \right)_1 \right\} + \int_{T_1}^{T_2} c_p dT \right] \quad (1)$$

$$= \frac{1}{42.08 \frac{g}{mol}} \left[\underbrace{8.314 \cdot 365 \frac{J}{mol} \{-1.8 + 0.25\}}_{-4703.6} + \underbrace{82.0 (440 - 380) \frac{J}{mol}}_{+4920} \right]$$

$$= +\frac{216.4}{42.08} \frac{kJ}{kg} = +5.1426 \frac{kJ}{kg} \quad (1)$$

b) cont.

$$\frac{\dot{w}_{cv}}{\dot{v}} = -173.3 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} + 5.14 = -178.4 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \quad (1)$$

$$c) \quad \frac{p\bar{v}}{RT} = 1 + B(T) \cdot \frac{1}{\bar{v}} \Leftrightarrow \bar{v}^2 - \frac{RT}{p} \bar{v} - B(T) \frac{RT}{p} = 0 \quad (1/2)$$

$$\bar{v} = \frac{1}{2} \left[\frac{RT}{p} \pm \sqrt{\left(\frac{RT}{p}\right)^2 + 4B(T) \frac{RT}{p}} \right] \quad \text{with } \frac{RT}{p} = \frac{8.314 \cdot 380 \frac{\text{J}}{\text{mol}}}{10^6 \frac{\text{J}}{\text{m}^3}} = 3.16 \cdot 10^{-3} \frac{\text{m}^3}{\text{mol}} \quad (1/2)$$

$$\bar{v} = \frac{1}{2} \left[3.16 \cdot 10^{-3} \frac{\text{m}^3}{\text{mol}} + \sqrt{9.98 \cdot 10^{-6} \left(\frac{\text{m}^3}{\text{mol}}\right)^2 + 4 \cdot (-207) \cdot 10^{-6} \cdot 3.16 \cdot 10^{-3} \left(\frac{\text{m}^3}{\text{mol}}\right)^2} \right]$$

$$\bar{v} = 2.94 \cdot 10^{-3} \frac{\text{m}^3}{\text{mol}} \quad (1)$$

$$d) \quad (h-h^{ig}) = \underbrace{RT}_{B(T) \cdot \frac{1}{\bar{v}}} (Z-1) + \int_{\bar{v}^0=\infty}^{\bar{v}} \left[T \left(\frac{\partial p}{\partial T} \right)_{\bar{v}} - p \right]_T d\bar{v} \quad (1)$$

$$\left(\frac{\partial p}{\partial T} \right)_{\bar{v}} = \frac{RT}{\bar{v}} + B(T) \cdot \frac{RT}{\bar{v}^2} + RT \frac{1}{\bar{v}^2} \left(\frac{dB}{dT} \right) \quad (1/2)$$

$$= B(T) \frac{RT}{\bar{v}} + RT^2 \frac{dB}{dT} \int_{\infty}^{\bar{v}} \frac{1}{\bar{v}^2} d\bar{v} \quad (1/2)$$

$$= -\frac{1}{\bar{v}}$$

$$= \frac{RT}{\bar{v}} \left(-\frac{1}{\bar{v}} \left(\frac{dB}{dT} \right) + B \right) = -712 \frac{\text{J}}{\text{mol}} \quad (1/2)$$

$$= \frac{8.314 \cdot 380}{2.94 \cdot 10^{-3}} \frac{\text{J}}{\text{mol}} \left(-380 \cdot 1.2 \frac{\text{cm}^3}{\text{mol}} + (-207) \frac{\text{cm}^3}{\text{mol}} \right) \frac{1}{10^6 \frac{\text{cm}^3}{\text{m}^3}} \quad (1)$$

UITWERKING OPGAVE 3, 22 januari 2009

OPGAVE 3

In een stoomketel wordt oververhitte stoom gegenereerd met een druk van 49 bar en een temperatuur van 450°C. De stoom wordt in een turbine geëxpandeerd voor de productie van asarbeid. De uitlaat van deze turbine is aangesloten op een stoomcondensator met een druk van 0,05 bar. De temperatuur van het gevormde condensaat is bij het verlaten van de condensator gelijk aan de verzadigingstemperatuur behorende bij de condensordruk.

Voor het uitvoeren van de gevraagde berekeningen zijn de volgende gegevens beschikbaar:

Water/stoom:

Toestand	Temperatuur	Druk	Enthalpie	Entropie	Stoomfractie
	[°C]	[bar]	[kJ/kg]	[kJ/kg K]	[-]
1	450	49	3318,9	6,8324	1
2f	32,9	0,05	137,8	0,4763	0
2g	32,9	0,05	2561,6	8,3960	1

Omgevingstemperatuur: $T = 20 \text{ °C}$

Isentropisch rendement turbine: $\eta_{s, \text{turb}} = 0,835$

Gevraagd

- Bepaal de massastroom stoom die nodig is als de turbine een asvermogen moet leveren van 25 MW. Bereken daarvoor eerst de enthalpie aan de uitlaat van de turbine.
- Bereken de exergie van de warmte die door de condenserende stoom in de condensator wordt afgegeven.

Uitwerking

- Bepaal de massastroom stoom die nodig is als de turbine een asvermogen moet leveren van 25 MW. Bereken daarvoor eerst de enthalpie aan de uitlaat van de turbine.

De enthalpie aan de uitlaat van de turbine kan worden bepaald door eerst de stoomcondities aan de uitlaat van de turbine te bepalen na isentrope expansie. In geval van isentrope expansie is de entropie aan de uitlaat dezelfde als de entropie aan de inlaat van de turbine. De stoomfractie van het stoom/water mengsel wordt dan:

$$x_{2s} = \frac{s_2 - s_{2f}}{s_{2g} - s_{2f}} = \frac{6,8324 - 0,4763}{8,3960 - 0,4763} = 0,8026$$

De enthalpie na isentrope expansie kan dan als volgt worden berekend:

$$h_{2s} = h_{2f} + x_{2s} \cdot (h_{2g} - h_{2f}) = 137,8 + 0,8026 \times (2561,6 - 137,8) = 2083,1 \text{ kJ/kg}$$

De werkelijke enthalpie aan de uitlaat van de turbine kan nu worden berekend door gebruik te maken van de vergelijking voor het isentropie rendement:

$$\eta_{s, \text{turb}} = \frac{h_1 - h_2}{h_1 - h_{2s}}$$

Voor de enthalpie aan de uitlaat van de turbine (h_2) volgt dan:

$$h_2 = h_1 - \eta_{s, \text{turb}} \cdot (h_1 - h_{2s}) = 3318,9 - 0,835 \times (3318,9 - 2083,1) = 2287,0 \text{ kJ/kg}$$

De afgegeven asarbeid is gegeven; de massastroom stoom kan dan worden berekend door gebruik te maken van de energiebalans voor de turbine:

$$P_{\text{as, turb}} = \Phi_m \cdot (h_1 - h_2) \quad \text{dus:} \quad \Phi_m = \frac{P_{\text{as, turb}}}{h_1 - h_2} = \frac{25000}{3318,9 - 2287,0} = 24,23 \text{ kg/s}$$

b) Bereken de exergie van de warmte die door de condenserende stoom in de condensor wordt afgegeven.

De exergie van de afgegeven warmte door de condenserende stoom kan worden berekend met de volgende vergelijking:

$$Ex_{Q, \text{cond}} = \left(1 - \frac{T_0}{T_{\text{cond}}}\right) \cdot Q_{\text{cond}}$$

De temperaturen zijn gegeven, maar de hoeveelheid afgegeven warmte moet nog worden berekend. Dit kan worden gedaan door gebruik te maken van de energiebalans voor de condensor:

$$Q_{\text{cond}} = \Phi_m \cdot (h_2 - h_{2f}) = 24,23 \times (2287,0 - 137,8) = 52075 \text{ kW}$$

Met $T_0 = 273,15 + 20 = 293,15 \text{ K}$ en $T_{\text{cond}} = 273,15 + 32,9 = 306,05 \text{ K}$ wordt de afgegeven exergie:

$$Ex_{Q, \text{cond}} = \left(1 - \frac{T_0}{T_{\text{cond}}}\right) \cdot Q_{\text{cond}} = \left(1 - \frac{293,15}{306,05}\right) \times 52075 = 2195 \text{ kW}$$
