

THERMODYNAMICA 2
(WB1224)

14 april 2010
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

Elke opgave 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 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.

3 OPEN VRAGEN

OPGAVE 1

- Schets een p - v diagram voor een gewone zuivere component (niet water) en geef de gebieden met damp, vloeistof en vaste fase aan. Schets in dit diagram ook twee isothermen, zoals door de Van der Waals toestandsvergelijking verkregen voor: (A) $T < T_c$ en (B) $T = T_c$ met T_c als de kritieke temperatuur.
- Stel als gegeven een functie voor de molaire Gibbs vrije energie $\bar{g} = \bar{g}(p, T)$. Leid relaties af voor de molaire grootheden \bar{s} , \bar{v} , \bar{h} , \bar{u} , \bar{c}_p .
- Is de druk van een reëel gas voor een bepaalde toestand $\{\bar{v}, T\}$ altijd lager dan de druk van een ideaal gas? Maak een schets van de tweede Viriale coëfficiënt $B(T)$ als functie van de temperatuur. De Viriale toestandsvergelijking is $p\bar{v}/(\bar{R}T) = 1 + B(T)/\bar{v}$
- Koolstofdioxide heeft een sublimatiedruk van 101.3 kPa bij $t_1 = -78.2^\circ\text{C}$ en 202.6 kPa bij $t_2 = -69.1^\circ\text{C}$. De punt waar damp, vloeistof en vaste fase met elkaar in evenwicht zijn ligt bij $T = 216.58\text{K}$. Bereken de tripelpuntsdruk met gebruikmaking van de vergelijking van Clausius-Clapeyron.

OPGAVE 2

Chlorodifluoromethane (CHClF_2) ondergaat een smoorproces. Bij een smoorproces wordt een gas door middel van een smoorklep ('throttle') geëxpandeerd zonder arbeid te winnen. De begincondities zijn 410 K en 10 bar en de einddruk is 0.1 bar. Het proces vindt plaats in een stationair proces. Veranderingen in de kinetische en potentiële energie zijn verwaarloosbaar. Het systeem is goed geïsoleerd.



De warmte capaciteit van chlorodifluoromethane in een toestand van ideaal gas is $c_p^{ig} = a + b \cdot T$ met $a = 27.93 \text{ J}/(\text{mol K})$ en $b = 0.093 \text{ J}/(\text{mol K}^2)$. De tweede viriaal coëfficiënt is $B(T) = \alpha + \beta/T$ in het relevante temperatuurgebied, met $\alpha = 297.6 \text{ cm}^3/\text{mol}$ en $\beta = -256100 \text{ cm}^3\text{K}/\text{mol}$.

Opmerking: alle deelopgaven, behalve opgave f), zijn onafhankelijk van elkaar oplosbaar.

- Formuleer de eerste en tweede hoofdwet voor deze toepassing
- Bereken het molaire volume voor de inlaatcondities volgens de Viriale toestandsvergelijking (Hint: let op de eenheden!).

Bereken de temperatuur T_2 van het uitstromende gas. Maak een onderverdeling in de volgende stappen:

- Om de eerste hoofdwet (opgavendeel a)) te benutten moet een enthalpieverschil berekend worden. Maak een schets van de integratiepad, om dit enthalpieverschil te berekenen. Schets de inlaatconditie (punt 1), de uitlaatconditie (punt 2) en de integratiepad kwalitatief in een p - T of een v^{-1} - T diagram.
- Leid de formule af voor de enthalpie 'departure function' volgens de Viriale toestandsvergelijking
- Bereken de enthalpie 'departure' bij de inlaatcondities. (Als je b) niet hebt opgelost, mag je $3145 \text{ cm}^3/\text{mol}$ als molair volume aannemen).
- Bepaal temperatuur T_2 van het uitstromende gas

OPGAVE 3

In een stoomturbinekringproces wordt een massastroom stoom van 25 kg/s toegevoerd aan de turbine. Na expansie condenseert de stoom bij een druk van 0.10 bar. Aangenomen wordt dat het stoomturbinekringproces een intern rendement heeft van 80 % (dus: $\eta_{ex, kringpr} = 0.80$). Dit rendement is als

volgt gedefinieerd: $\eta_{ex, kringpr} = \frac{W_{irrev}}{W_{rev}}$ waarbij de arbeid is gemeten aan de uitgaande as van de turbine. Deze arbeid wordt in een elektrische generator omgezet in elektriciteit.

De eigenschappen van water en stoom zijn te vinden in de tabellen A-2 t/m A-5, deze zijn bijgevoegd

Verder is gegeven:

- water/stoom	druk aan inlaat turbine	$p_{turb, in}$	=	60	bar
	temperatuur aan inlaat turbine	$T_{turb, in}$	=	540	°C
	druk aan inlaat ketel	$p_{w, in}$	=	75	bar
	temperatuur aan inlaat ketel	$T_{w, in}$	=	180	°C
- generator	druk in condensor	p_{cond}	=	0.10	bar
	rendement	η_{gen}	=	0.97	

Beantwoord de volgende vragen

- Bereken de thermodynamisch gemiddelde temperatuur van warmtetoevoer aan het stoomturbinekringproces (veronderstel dat verliezen in de stoomleiding van ketel naar turbine verwaarloosbaar zijn)
- Bereken het (energie)rendement van stoomturbinekringproces
- Bepaal het elektrisch vermogen dat wordt afgegeven door de generator

14 MEERKEUZEVRAGEN THERMODYNAMICA 2 (WB1224)

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

MK1

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

- a) kan alleen maar positief zijn
- b) kan alleen maar negatief zijn
- c) kan positief of negatief zijn
- d) is nul voor een ideaal gas

MK2

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

MK3

De hoeveelheid warmte die nodig is voor de isobare toestandsverandering (bij 1.013 bar) van water van een vaste toestand (bij 0°C) naar een verzadigd vloeistof (in evenwicht met damp) kan berekend worden door

- a) $\Delta Q = m \cdot \Delta^{SL} h + m \cdot \int_{273.15}^{373.15} c_p^L dT$
- b) $\Delta Q = m \cdot \Delta^{SL} u + m \cdot \int_{273.15}^{373.15} c_v^L dT$
- c) $\Delta Q = m \cdot T \Delta^{SL} s + m \cdot \int_{273.15}^{373.15} c_v^L dT$
- d) $\Delta Q = m \cdot T \Delta^{SL} s + m \cdot \int_{273.15}^{373.15} c_p^L dT$

(waar Δ^{SL} voor de overgang van vast naar vloeistof staat)

MK4

De Viriale toestandsvergelijking

1. is toepasbaar voor gassen en vloeistoffen
2. is toepasbaar voor gassen, vloeistoffen en vaste fasen
3. kan drukken leveren die alleen maar kleiner zijn dan de druk volgens de ideale gaswet
4. vereist een coëfficiënt $B(T)$. Deze coëfficiënt is specifiek voor iedere substantie

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

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

De Clausius-Clapeyron vergelijking in de vorm $\ln\left(\frac{p_2}{p_1}\right) = -\frac{\Delta^l \rightarrow n \bar{h}}{\bar{R}} \left(\frac{1}{T_2} - \frac{1}{T_1}\right)$ voor de dampdruklijn

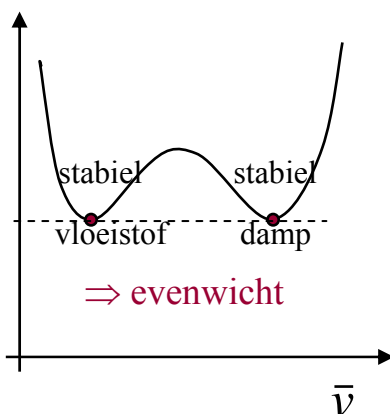
kan worden afgeleid, gebruik makend van de volgende aannames:

- gasfase is een ideaal gas, $\bar{v}^{damp} \gg \bar{v}^{vloeistof}$, verdampings-enthalpie is constant
- gasfase is een ideaal gas, $\bar{v}^{damp} \gg \bar{v}^{vloeistof}$, $\delta Q = 0$ (adiabatisch proces)
- $T^{damp} = T^{vloeistof}$, reversibel proces, constante chemisch potentiaal
- $T^{damp} = T^{vloeistof}$, $\bar{v}^{damp} \gg \bar{v}^{vloeistof}$, constante chemisch potentiaal

MK7

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

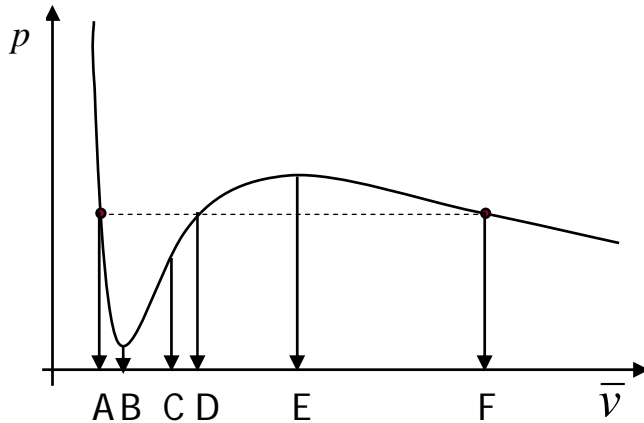
- de Y-as staat voor de inwendige energie; het diagram geldt voor constante temperatuur, maar niet voor constante druk
- de Y-as staat voor de inwendige energie; het diagram geldt voor constante temperatuur en voor constante druk
- de Y-as staat voor de Gibbs vrije energie; het diagram geldt voor constante temperatuur, maar niet voor constante druk
- de Y-as staat voor de Gibbs vrije 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

1. voor een pure component is $\mu = \bar{g} = \bar{h} - T\bar{s}$

2. 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 bepaalde temperatuur met stijgende druk altijd toe. (voor een zuivere component)

4. kan voor een zuivere component als “departure function” $\frac{\mu - \mu^{ig}}{\bar{R}T} = \ln \varphi$ berekend worden, waarin φ de fugaciteitscoëfficiënt is

- 2, 3, en 4 zijn waar; 1 niet.
- 1, 3, en 4 zijn waar; 2 niet
- 1, 2, en 4 zijn waar; 3 niet
- 1, 2, 3, en 4 zijn waar

MK10

Voor een reversibel kringproces, dat warmte uitwisselt met twee warmtereservoirs, geldt dat het rendement:

1. Afhankelijk is van de druk in het kringproces
 2. Wordt bepaald door de temperatuur van het warme reservoir
 3. Afhankelijk is van het medium in het kringproces
 4. Uitsluitend wordt bepaald door de temperatuur van de toegevoerde en afgevoerde warmte
-
- a. 1 en 2 zijn waar, 3 en 4 niet
 - b. 1, 2 en 4 zijn waar, 3 niet
 - c. 2 en 3 zijn waar, 1 en 4 niet
 - d. 4 is waar, 1, 2 en 3 niet

MK11

Een reversibel arbeidskringproces levert 228 kJ arbeid door warmte te onttrekken aan een warm reservoir. Daarbij wordt tevens 222 kJ warmte afgevoerd naar een koud reservoir met een temperatuur van 290 K. De temperatuur van het warme reservoir is dan:

- a. groter dan 570 K, maar kleiner dan 580 K
- b. gelijk aan 580 K
- c. groter dan 580 K, maar kleiner dan 590 K
- d. groter dan 590 K

MK12

Geconstateerd wordt dat de entropieverandering van een hoeveelheid stof (= het systeem) als gevolg van een toestandsverandering van toestand 1 naar toestand 2 negatief is. Hieruit kan worden geconcludeerd dat:

1. Er geen warmte wordt uitgewisseld met de omgeving
 2. Er warmte wordt afgevoerd uit het systeem
 3. De entropieproductie negatief moet zijn
 4. De entropieproductie gelijk moet zijn aan nul
-
- a. 3 is waar, 1, 2 en 4 niet
 - b. 1 en 2 zijn waar, 3 en 4 niet
 - c. 3 en 4 zijn waar, 1 en 2 niet
 - d. 2 is waar, 1, 3 en 4 niet

MK13

In een stoom-stoom generator wordt water bij verzadigingstemperatuur (de primaire stroom) opgewarmd van $x = 0$ tot $x = 1$. De hiervoor benodigde warmte wordt onttrokken aan stoom die bij verzadigingstemperatuur wordt gecondenseerd (de secundaire stroom) van $x = 1$ tot $x = 0$. Het exergieverlies van de stoomstoomgenerator kan als volgt worden berekend:

1. Door de exergie van de warmte die opgenomen wordt door de primaire stroom af te trekken van de exergie van de warmte die afgegeven wordt door de secundaire stroom
 2. Door gebruik te maken van de term: $T_0 \cdot \sigma$
 3. Door de entropieverandering van de primaire stroom af te trekken van de entropieverandering van de secundaire stroom
 4. Door de exergieverandering van de primaire stroom af te trekken van de exergieverandering van de secundaire stroom
- a. 1, 2 en 4 zijn waar, 3 niet
 - b. 3 en 4 zijn waar, 1 en 2 niet
 - c. 1 is waar, 2, 3 en 4 niet
 - d. 1 en 4 zijn waar, 2 en 3 niet

MK14

Het arbeidspotentieel van een hoeveelheid stof is afhankelijk van:

1. De wrijving in het systeem waarmee de omzetting in arbeid geschied
 2. De toestand van de stof
 3. De constructieve uitvoering van het systeem voor de omzetting in arbeid
 4. De temperatuur van de omgeving
- a. 3 en 4 zijn waar, 1 en 2 niet
 - b. 2 en 4 zijn waar, 1 en 3 niet
 - c. 1, 2 en 3 zijn waar, 4 niet
 - d. 1, 3 en 4 zijn waar, 2 niet

Thermodynamica 2

1^{ste} HW gesloten systeem $dU = \delta Q - \delta W$

open systeem $\frac{dE_{cv}}{dt} = \dot{Q}_{cv} - \dot{W}_{cv} - \dot{m}_2 \left(h_2 + \frac{c_2^2}{2} + gz_2 \right) + \dot{m}_1 \left(h_1 + \frac{c_1^2}{2} + gz_1 \right)$

waarbij c_2 (hier) de snelheid van de uitgaande stroom '2' betekend. Index '1' is voor de ingaaende stroom.

$$\text{en } E_{cv} = \int_V \rho \left(u + \frac{c^2}{2} + gz \right) dV$$

2^{de} HW gesloten systeem (differentieel) $dS = \frac{\delta Q}{T} + \delta \sigma$ met $\delta \sigma \geq 0$

open systeem $\frac{dS_{cv}}{dt} = \frac{\dot{Q}_{cv}}{T^{trans}} - \dot{m}_2 s_2 + \dot{m}_1 s_1 + \dot{\sigma}_{cv}$ met $\dot{\sigma}_{cv} \geq 0$

bij de temperatuur T^{trans} vindt het warmtetransport plaats. Index '2' is voor de uitgaande stroom.

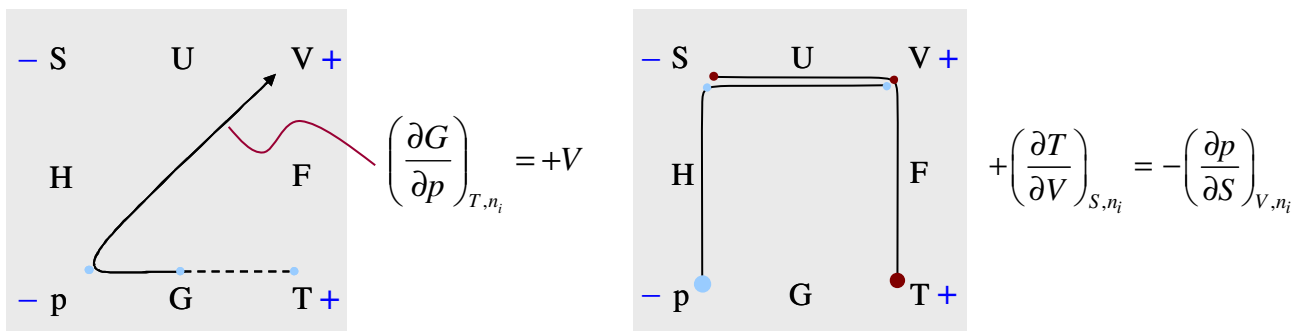
Thermodynamische potentialen

Enthalpie $H = U + pV$

Helmholtz energie $F = U - TS$

Gibbs energie $G = U + pV - TS$

Guggenheim square (mnemonic) – met twee voorbeelden



“Departure functions”

enthalpie $(\bar{h} - \bar{h}^{ig})_{T,p} = \int_{p^{ig}=0}^p \left[\bar{v} - T \left(\frac{\partial \bar{v}}{\partial T} \right)_p \right] dp$

of $(\bar{h} - \bar{h}^{ig})_{T,\bar{v}} = \bar{R}T(Z-1) + \int_{\bar{v}^{ig}=\infty}^{\bar{v}} \left[T \left(\frac{\partial p}{\partial T} \right)_{\bar{v}} - p \right] d\bar{v}$

inwendige energie $(\bar{u} - \bar{u}^{ig})_{T,\bar{v}} = \int_{\bar{v}^{ig}=\infty}^{\bar{v}} \left[T \left(\frac{\partial p}{\partial T} \right)_{\bar{v}} - p \right] d\bar{v}$

entropie $(\bar{s} - \bar{s}^{ig})_{T,p} = \int_{p^{ig}=0}^p \left[\frac{\bar{R}}{p} - \left(\frac{\partial \bar{v}}{\partial T} \right)_p \right] dp$

Entropie verandering ideaal gas $(\bar{s}_2^{ig} - \bar{s}_1^{ig}) = \int_{T_1}^{T_2} \frac{c_p}{T} dT - \bar{R} \ln \left(\frac{p_2}{p_1} \right)$

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

Exergie

exergie warmte: $Ex_Q = \left(1 - \frac{T_0}{T} \right) \cdot Q$

exergie hoeveelheid stof: $Ex = (H - H_0) - T_0 \cdot (S - S_0)$

isentropisch rendementen: $\eta_{s, \text{turb}} = \frac{h_1 - h_2}{h_1 - h_{2s}} \quad \eta_{s, \text{compr}} = \frac{h_1 - h_{2s}}{h_1 - h_2}$

reversibele arbeid open stationair systeem (algemeen – isentropisch proces)

$$\frac{W_{\text{rev}}}{\Phi_m} = -\int_1^2 v \cdot dp - \frac{(c_2^2 - c_1^2)}{2} - g \cdot (z_2 - z_1)$$

$$\frac{W_{\text{rev}}}{\Phi_m} = -\frac{k \cdot R \cdot T_1}{k-1} \cdot \left[\left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{(k-1)}{k}} - 1 \right]$$

exergie factor van een brandstof: $f_{ex, F} = \frac{ex_F}{LHV_F}$

thermodyn. equiv. temp. wo: $\bar{T} = \frac{h_2 - h_1}{s_2 - s_1}$

TABLE A-2 Properties of Saturated Water (Liquid–Vapor): Temperature Table

Temp. °C	Press. bar	Specific Volume m ³ /kg		Internal Energy kJ/kg		Enthalpy kJ/kg			Entropy kJ/kg · K		Temp. °C
		Sat. Liquid $v_f \times 10^3$	Sat. Vapor v_g	Sat. Liquid u_f	Sat. Vapor u_g	Sat. Liquid h_f	Evap. h_{fg}	Sat. Vapor h_g	Sat. Liquid s_f	Sat. Vapor s_g	
.01	0.00611	1.0002	206.136	0.00	2375.3	0.01	2501.3	2501.4	0.0000	9.1562	.01
4	0.00813	1.0001	157.232	16.77	2380.9	16.78	2491.9	2508.7	0.0610	9.0514	4
5	0.00872	1.0001	147.120	20.97	2382.3	20.98	2489.6	2510.6	0.0761	9.0257	5
6	0.00935	1.0001	137.734	25.19	2383.6	25.20	2487.2	2512.4	0.0912	9.0003	6
8	0.01072	1.0002	120.917	33.59	2386.4	33.60	2482.5	2516.1	0.1212	8.9501	8
10	0.01228	1.0004	106.379	42.00	2389.2	42.01	2477.7	2519.8	0.1510	8.9008	10
11	0.01312	1.0004	99.857	46.20	2390.5	46.20	2475.4	2521.6	0.1658	8.8765	11
12	0.01402	1.0005	93.784	50.41	2391.9	50.41	2473.0	2523.4	0.1806	8.8524	12
13	0.01497	1.0007	88.124	54.60	2393.3	54.60	2470.7	2525.3	0.1953	8.8285	13
14	0.01598	1.0008	82.848	58.79	2394.7	58.80	2468.3	2527.1	0.2099	8.8048	14
15	0.01705	1.0009	77.926	62.99	2396.1	62.99	2465.9	2528.9	0.2245	8.7814	15
16	0.01818	1.0011	73.333	67.18	2397.4	67.19	2463.6	2530.8	0.2390	8.7582	16
17	0.01938	1.0012	69.044	71.38	2398.8	71.38	2461.2	2532.6	0.2535	8.7351	17
18	0.02064	1.0014	65.038	75.57	2400.2	75.58	2458.8	2534.4	0.2679	8.7123	18
19	0.02198	1.0016	61.293	79.76	2401.6	79.77	2456.5	2536.2	0.2823	8.6897	19
20	0.02339	1.0018	57.791	83.95	2402.9	83.96	2454.1	2538.1	0.2966	8.6672	20
21	0.02487	1.0020	54.514	88.14	2404.3	88.14	2451.8	2539.9	0.3109	8.6450	21
22	0.02645	1.0022	51.447	92.32	2405.7	92.33	2449.4	2541.7	0.3251	8.6229	22
23	0.02810	1.0024	48.574	96.51	2407.0	96.52	2447.0	2543.5	0.3393	8.6011	23
24	0.02985	1.0027	45.883	100.70	2408.4	100.70	2444.7	2545.4	0.3534	8.5794	24
25	0.03169	1.0029	43.360	104.88	2409.8	104.89	2442.3	2547.2	0.3674	8.5580	25
26	0.03363	1.0032	40.994	109.06	2411.1	109.07	2439.9	2549.0	0.3814	8.5367	26
27	0.03567	1.0035	38.774	113.25	2412.5	113.25	2437.6	2550.8	0.3954	8.5156	27
28	0.03782	1.0037	36.690	117.42	2413.9	117.43	2435.2	2552.6	0.4093	8.4946	28
29	0.04008	1.0040	34.733	121.60	2415.2	121.61	2432.8	2554.5	0.4231	8.4739	29
30	0.04246	1.0043	32.894	125.78	2416.6	125.79	2430.5	2556.3	0.4369	8.4533	30
31	0.04496	1.0046	31.165	129.96	2418.0	129.97	2428.1	2558.1	0.4507	8.4329	31
32	0.04759	1.0050	29.540	134.14	2419.3	134.15	2425.7	2559.9	0.4644	8.4127	32
33	0.05034	1.0053	28.011	138.32	2420.7	138.33	2423.4	2561.7	0.4781	8.3927	33
34	0.05324	1.0056	26.571	142.50	2422.0	142.50	2421.0	2563.5	0.4917	8.3728	34
35	0.05628	1.0060	25.216	146.67	2423.4	146.68	2418.6	2565.3	0.5053	8.3531	35
36	0.05947	1.0063	23.940	150.85	2424.7	150.86	2416.2	2567.1	0.5188	8.3336	36
38	0.06632	1.0071	21.602	159.20	2427.4	159.21	2411.5	2570.7	0.5458	8.2950	38
40	0.07384	1.0078	19.523	167.56	2430.1	167.57	2406.7	2574.3	0.5725	8.2570	40
45	0.09593	1.0099	15.258	188.44	2436.8	188.45	2394.8	2583.2	0.6387	8.1648	45

TABLE A-2 (Continued)

Temp. °C	Press. bar	Specific Volume m ³ /kg		Internal Energy kJ/kg		Enthalpy kJ/kg			Entropy kJ/kg · K		Temp. °C
		Sat. Liquid $v_f \times 10^3$	Sat. Vapor v_g	Sat. Liquid u_f	Sat. Vapor u_g	Sat. Liquid h_f	Evap. h_{fg}	Sat. Vapor h_g	Sat. Liquid s_f	Sat. Vapor s_g	
50	.1235	1.0121	12.032	209.32	2443.5	209.33	2382.7	2592.1	.7038	8.0763	50
55	.1576	1.0146	9.568	230.21	2450.1	230.23	2370.7	2600.9	.7679	7.9913	55
60	.1994	1.0172	7.671	251.11	2456.6	251.13	2358.5	2609.6	.8312	7.9096	60
65	.2503	1.0199	6.197	272.02	2463.1	272.06	2346.2	2618.3	.8935	7.8310	65
70	.3119	1.0228	5.042	292.95	2469.6	292.98	2333.8	2626.8	.9549	7.7553	70
75	.3858	1.0259	4.131	313.90	2475.9	313.93	2321.4	2635.3	1.0155	7.6824	75
80	.4739	1.0291	3.407	334.86	2482.2	334.91	2308.8	2643.7	1.0753	7.6122	80
85	.5783	1.0325	2.828	355.84	2488.4	355.90	2296.0	2651.9	1.1343	7.5445	85
90	.7014	1.0360	2.361	376.85	2494.5	376.92	2283.2	2660.1	1.1925	7.4791	90
95	.8455	1.0397	1.982	397.88	2500.6	397.96	2270.2	2668.1	1.2500	7.4159	95
100	1.014	1.0435	1.673	418.94	2506.5	419.04	2257.0	2676.1	1.3069	7.3549	100
110	1.433	1.0516	1.210	461.14	2518.1	461.30	2230.2	2691.5	1.4185	7.2387	110
120	1.985	1.0603	0.8919	503.50	2529.3	503.71	2202.6	2706.3	1.5276	7.1296	120
130	2.701	1.0697	0.6685	546.02	2539.9	546.31	2174.2	2720.5	1.6344	7.0269	130
140	3.613	1.0797	0.5089	588.74	2550.0	589.13	2144.7	2733.9	1.7391	6.9299	140
150	4.758	1.0905	0.3928	631.68	2559.5	632.20	2114.3	2746.5	1.8418	6.8379	150
160	6.178	1.1020	0.3071	674.86	2568.4	675.55	2082.6	2758.1	1.9427	6.7502	160
170	7.917	1.1143	0.2428	718.33	2576.5	719.21	2049.5	2768.7	2.0419	6.6663	170
180	10.02	1.1274	0.1941	762.09	2583.7	763.22	2015.0	2778.2	2.1396	6.5857	180
190	12.54	1.1414	0.1565	806.19	2590.0	807.62	1978.8	2786.4	2.2359	6.5079	190
200	15.54	1.1565	0.1274	850.65	2595.3	852.45	1940.7	2793.2	2.3309	6.4323	200
210	19.06	1.1726	0.1044	895.53	2599.5	897.76	1900.7	2798.5	2.4248	6.3585	210
220	23.18	1.1900	0.08619	940.87	2602.4	943.62	1858.5	2802.1	2.5178	6.2861	220
230	27.95	1.2088	0.07158	986.74	2603.9	990.12	1813.8	2804.0	2.6099	6.2146	230
240	33.44	1.2291	0.05976	1033.2	2604.0	1037.3	1766.5	2803.8	2.7015	6.1437	240
250	39.73	1.2512	0.05013	1080.4	2602.4	1085.4	1716.2	2801.5	2.7927	6.0730	250
260	46.88	1.2755	0.04221	1128.4	2599.0	1134.4	1662.5	2796.6	2.8838	6.0019	260
270	54.99	1.3023	0.03564	1177.4	2593.7	1184.5	1605.2	2789.7	2.9751	5.9301	270
280	64.12	1.3321	0.03017	1227.5	2586.1	1236.0	1543.6	2779.6	3.0668	5.8571	280
290	74.36	1.3656	0.02557	1278.9	2576.0	1289.1	1477.1	2766.2	3.1594	5.7821	290
300	85.81	1.4036	0.02167	1332.0	2563.0	1344.0	1404.9	2749.0	3.2534	5.7045	300
320	112.7	1.4988	0.01549	1444.6	2525.5	1461.5	1238.6	2700.1	3.4480	5.5362	320
340	145.9	1.6379	0.01080	1570.3	2464.6	1594.2	1027.9	2622.0	3.6594	5.3357	340
360	186.5	1.8925	0.006945	1725.2	2351.5	1760.5	720.5	2481.0	3.9147	5.0526	360
374.14	220.9	3.155	0.003155	2029.6	2029.6	2099.3	0	2099.3	4.4298	4.4298	374.14

Source: Tables A-2 through A-5 are extracted from J. H. Keenan, F. G. Keyes, P. G. Hill, and J. G. Moore, *Steam Tables*, Wiley, New York, 1969.

TABLE A-3 Properties of Saturated Water (Liquid–Vapor): Pressure Table

Press. bar	Temp. °C	Specific Volume m ³ /kg		Internal Energy kJ/kg		Enthalpy kJ/kg			Entropy kJ/kg · K		Press. bar
		Sat. Liquid $v_f \times 10^3$	Sat. Vapor v_g	Sat. Liquid u_f	Sat. Vapor u_g	Sat. Liquid h_f	Evap. h_{fg}	Sat. Vapor h_g	Sat. Liquid s_f	Sat. Vapor s_g	
0.04	28.96	1.0040	34.800	121.45	2415.2	121.46	2432.9	2554.4	0.4226	8.4746	0.04
0.06	36.16	1.0064	23.739	151.53	2425.0	151.53	2415.9	2567.4	0.5210	8.3304	0.06
0.08	41.51	1.0084	18.103	173.87	2432.2	173.88	2403.1	2577.0	0.5926	8.2287	0.08
0.10	45.81	1.0102	14.674	191.82	2437.9	191.83	2392.8	2584.7	0.6493	8.1502	0.10
0.20	60.06	1.0172	7.649	251.38	2456.7	251.40	2358.3	2609.7	0.8320	7.9085	0.20
0.30	69.10	1.0223	5.229	289.20	2468.4	289.23	2336.1	2625.3	0.9439	7.7686	0.30
0.40	75.87	1.0265	3.993	317.53	2477.0	317.58	2319.2	2636.8	1.0259	7.6700	0.40
0.50	81.33	1.0300	3.240	340.44	2483.9	340.49	2305.4	2645.9	1.0910	7.5939	0.50
0.60	85.94	1.0331	2.732	359.79	2489.6	359.86	2293.6	2653.5	1.1453	7.5320	0.60
0.70	89.95	1.0360	2.365	376.63	2494.5	376.70	2283.3	2660.0	1.1919	7.4797	0.70
0.80	93.50	1.0380	2.087	391.58	2498.8	391.66	2274.1	2665.8	1.2329	7.4346	0.80
0.90	96.71	1.0410	1.869	405.06	2502.6	405.15	2265.7	2670.9	1.2695	7.3949	0.90
1.00	99.63	1.0432	1.694	417.36	2506.1	417.46	2258.0	2675.5	1.3026	7.3594	1.00
1.50	111.4	1.0528	1.159	466.94	2519.7	467.11	2226.5	2693.6	1.4336	7.2233	1.50
2.00	120.2	1.0605	0.8857	504.49	2529.5	504.70	2201.9	2706.7	1.5301	7.1271	2.00
2.50	127.4	1.0672	0.7187	535.10	2537.2	535.37	2181.5	2716.9	1.6072	7.0527	2.50
3.00	133.6	1.0732	0.6058	561.15	2543.6	561.47	2163.8	2725.3	1.6718	6.9919	3.00
3.50	138.9	1.0786	0.5243	583.95	2546.9	584.33	2148.1	2732.4	1.7275	6.9405	3.50
4.00	143.6	1.0836	0.4625	604.31	2553.6	604.74	2133.8	2738.6	1.7766	6.8959	4.00
4.50	147.9	1.0882	0.4140	622.25	2557.6	623.25	2120.7	2743.9	1.8207	6.8565	4.50
5.00	151.9	1.0926	0.3749	639.68	2561.2	640.23	2108.5	2748.7	1.8607	6.8212	5.00
6.00	158.9	1.1006	0.3157	669.90	2567.4	670.56	2086.3	2756.8	1.9312	6.7600	6.00
7.00	165.0	1.1080	0.2729	696.44	2572.5	697.22	2066.3	2763.5	1.9922	6.7080	7.00
8.00	170.4	1.1148	0.2404	720.22	2576.8	721.11	2048.0	2769.1	2.0462	6.6628	8.00
9.00	175.4	1.1212	0.2150	741.83	2580.5	742.83	2031.1	2773.9	2.0946	6.6226	9.00
10.0	179.9	1.1273	0.1944	761.68	2583.6	762.81	2015.3	2778.1	2.1387	6.5863	10.0
15.0	198.3	1.1539	0.1318	843.16	2594.5	844.84	1947.3	2792.2	2.3150	6.4448	15.0
20.0	212.4	1.1767	0.09963	906.44	2600.3	908.79	1890.7	2799.5	2.4474	6.3409	20.0
25.0	224.0	1.1973	0.07998	959.11	2603.1	962.11	1841.0	2803.1	2.5547	6.2575	25.0
30.0	233.9	1.2165	0.06668	1004.8	2604.1	1008.4	1795.7	2804.2	2.6457	6.1869	30.0
35.0	242.6	1.2347	0.05707	1045.4	2603.7	1049.8	1753.7	2803.4	2.7253	6.1253	35.0
40.0	250.4	1.2522	0.04978	1082.3	2602.3	1087.3	1714.1	2801.4	2.7964	6.0701	40.0
45.0	257.5	1.2692	0.04406	1116.2	2600.1	1121.9	1676.4	2798.3	2.8610	6.0199	45.0
50.0	264.0	1.2859	0.03944	1147.8	2597.1	1154.2	1640.1	2794.3	2.9202	5.9734	50.0
60.0	275.6	1.3187	0.03244	1205.4	2589.7	1213.4	1571.0	2784.3	3.0267	5.8892	60.0
70.0	285.9	1.3513	0.02737	1257.6	2580.5	1267.0	1505.1	2772.1	3.1211	5.8133	70.0
80.0	295.1	1.3842	0.02352	1305.6	2569.8	1316.6	1441.3	2758.0	3.2068	5.7432	80.0
90.0	303.4	1.4178	0.02048	1350.5	2557.8	1363.3	1378.9	2742.1	3.2858	5.6772	90.0
100.	311.1	1.4524	0.01803	1393.0	2544.4	1407.6	1317.1	2724.7	3.3596	5.6141	100.
110.	318.2	1.4886	0.01599	1433.7	2529.8	1450.1	1255.5	2705.6	3.4295	5.5527	110.

TABLE A-3 (Continued)

Press. bar	Temp. °C	Specific Volume m ³ /kg		Internal Energy kJ/kg		Enthalpy kJ/kg			Entropy kJ/kg · K		Press. bar
		Sat. Liquid $v_f \times 10^3$	Sat. Vapor v_g	Sat. Liquid u_f	Sat. Vapor u_g	Sat. Liquid h_f	Evap. h_{fg}	Sat. Vapor h_g	Sat. Liquid s_f	Sat. Vapor s_g	
120.	324.8	1.5267	0.01426	1473.0	2513.7	1491.3	1193.6	2684.9	3.4962	5.4924	120.
130.	330.9	1.5671	0.01278	1511.1	2496.1	1531.5	1130.7	2662.2	3.5606	5.4323	130.
140.	336.8	1.6107	0.01149	1548.6	2476.8	1571.1	1066.5	2637.6	3.6232	5.3717	140.
150.	342.2	1.6581	0.01034	1585.6	2455.5	1610.5	1000.0	2610.5	3.6848	5.3098	150.
160.	347.4	1.7107	0.009306	1622.7	2431.7	1650.1	930.6	2580.6	3.7461	5.2455	160.
170.	352.4	1.7702	0.008364	1660.2	2405.0	1690.3	856.9	2547.2	3.8079	5.1777	170.
180.	357.1	1.8397	0.007489	1698.9	2374.3	1732.0	777.1	2509.1	3.8715	5.1044	180.
190.	361.5	1.9243	0.006657	1739.9	2338.1	1776.5	688.0	2464.5	3.9388	5.0228	190.
200.	365.8	2.036	0.005834	1785.6	2293.0	1826.3	583.4	2409.7	4.0139	4.9269	200.
220.9	374.1	3.155	0.003155	2029.6	2029.6	2099.3	0	2099.3	4.4298	4.4298	220.9

TABLE A-4 Properties of Superheated Water Vapor

T °C	v m ³ /kg	u kJ/kg	h kJ/kg	s kJ/kg · K	v m ³ /kg	u kJ/kg	h kJ/kg	s kJ/kg · K
$p = 0.06 \text{ bar} = 0.006 \text{ MPa}$ ($T_{\text{sat}} = 36.16^\circ\text{C}$)					$p = 0.35 \text{ bar} = 0.035 \text{ MPa}$ ($T_{\text{sat}} = 72.69^\circ\text{C}$)			
Sat.	23.739	2425.0	2567.4	8.3304	4.526	2473.0	2631.4	7.7158
80	27.132	2487.3	2650.1	8.5804	4.625	2483.7	2645.6	7.7564
120	30.219	2544.7	2726.0	8.7840	5.163	2542.4	2723.1	7.9644
160	33.302	2602.7	2802.5	8.9693	5.696	2601.2	2800.6	8.1519
200	36.383	2661.4	2879.7	9.1398	6.228	2660.4	2878.4	8.3237
240	39.462	2721.0	2957.8	9.2982	6.758	2720.3	2956.8	8.4828
280	42.540	2781.5	3036.8	9.4464	7.287	2780.9	3036.0	8.6314
320	45.618	2843.0	3116.7	9.5859	7.815	2842.5	3116.1	8.7712
360	48.696	2905.5	3197.7	9.7180	8.344	2905.1	3197.1	8.9034
400	51.774	2969.0	3279.6	9.8435	8.872	2968.6	3279.2	9.0291
440	54.851	3033.5	3362.6	9.9633	9.400	3033.2	3362.2	9.1490
500	59.467	3132.3	3489.1	10.1336	10.192	3132.1	3488.8	9.3194
$p = 0.70 \text{ bar} = 0.07 \text{ MPa}$ ($T_{\text{sat}} = 89.95^\circ\text{C}$)					$p = 1.0 \text{ bar} = 0.10 \text{ MPa}$ ($T_{\text{sat}} = 99.63^\circ\text{C}$)			
Sat.	2.365	2494.5	2660.0	7.4797	1.694	2506.1	2675.5	7.3594
100	2.434	2509.7	2680.0	7.5341	1.696	2506.7	2676.2	7.3614
120	2.571	2539.7	2719.6	7.6375	1.793	2537.3	2716.6	7.4668
160	2.841	2599.4	2798.2	7.8279	1.984	2597.8	2796.2	7.6597
200	3.108	2659.1	2876.7	8.0012	2.172	2658.1	2875.3	7.8343
240	3.374	2719.3	2955.5	8.1611	2.359	2718.5	2954.5	7.9949
280	3.640	2780.2	3035.0	8.3162	2.546	2779.6	3034.2	8.1445
320	3.905	2842.0	3115.3	8.4504	2.732	2841.5	3114.6	8.2849
360	4.170	2904.6	3196.5	8.5828	2.917	2904.2	3195.9	8.4175
400	4.434	2968.2	3278.6	8.7086	3.103	2967.9	3278.2	8.5435
440	4.698	3032.9	3361.8	8.8286	3.288	3032.6	3361.4	8.6636
500	5.095	3131.8	3488.5	8.9991	3.565	3131.6	3488.1	8.8342
$p = 1.5 \text{ bar} = 0.15 \text{ MPa}$ ($T_{\text{sat}} = 111.37^\circ\text{C}$)					$p = 3.0 \text{ bar} = 0.30 \text{ MPa}$ ($T_{\text{sat}} = 133.55^\circ\text{C}$)			
Sat.	1.159	2519.7	2693.6	7.2233	0.606	2543.6	2725.3	6.9919
120	1.188	2533.3	2711.4	7.2693				
160	1.317	2595.2	2792.8	7.4665	0.651	2587.1	2782.3	7.1276
200	1.444	2656.2	2872.9	7.6433	0.716	2650.7	2865.5	7.3115
240	1.570	2717.2	2952.7	7.8052	0.781	2713.1	2947.3	7.4774
280	1.695	2778.6	3032.8	7.9555	0.844	2775.4	3028.6	7.6299
320	1.819	2840.6	3113.5	8.0964	0.907	2838.1	3110.1	7.7722
360	1.943	2903.5	3195.0	8.2293	0.969	2901.4	3192.2	7.9061
400	2.067	2967.3	3277.4	8.3555	1.032	2965.6	3275.0	8.0330
440	2.191	3032.1	3360.7	8.4757	1.094	3030.6	3358.7	8.1538
500	2.376	3131.2	3487.6	8.6466	1.187	3130.0	3486.0	8.3251
600	2.685	3301.7	3704.3	8.9101	1.341	3300.8	3703.2	8.5892

TABLE A-4 (Continued)

<i>T</i> °C	<i>v</i> m ³ /kg	<i>u</i> kJ/kg	<i>h</i> kJ/kg	<i>s</i> kJ/kg · K	<i>v</i> m ³ /kg	<i>u</i> kJ/kg	<i>h</i> kJ/kg	<i>s</i> kJ/kg · K	
<i>p</i> = 5.0 bar = 0.50 MPa (<i>T</i> _{sat} = 151.86°C)					<i>p</i> = 7.0 bar = 0.70 MPa (<i>T</i> _{sat} = 164.97°C)				
Sat.	0.3749	2561.2	2748.7	6.8213	0.2729	2572.5	2763.5	6.7080	
180	0.4045	2609.7	2812.0	6.9656	0.2847	2599.8	2799.1	6.7880	
200	0.4249	2642.9	2855.4	7.0592	0.2999	2634.8	2844.8	6.8865	
240	0.4646	2707.6	2939.9	7.2307	0.3292	2701.8	2932.2	7.0641	
280	0.5034	2771.2	3022.9	7.3865	0.3574	2766.9	3017.1	7.2233	
320	0.5416	2834.7	3105.6	7.5308	0.3852	2831.3	3100.9	7.3697	
360	0.5796	2898.7	3188.4	7.6660	0.4126	2895.8	3184.7	7.5063	
400	0.6173	2963.2	3271.9	7.7938	0.4397	2960.9	3268.7	7.6350	
440	0.6548	3028.6	3356.0	7.9152	0.4667	3026.6	3353.3	7.7571	
500	0.7109	3128.4	3483.9	8.0873	0.5070	3126.8	3481.7	7.9299	
600	0.8041	3299.6	3701.7	8.3522	0.5738	3298.5	3700.2	8.1956	
700	0.8969	3477.5	3925.9	8.5952	0.6403	3476.6	3924.8	8.4391	
<i>p</i> = 10.0 bar = 1.0 MPa (<i>T</i> _{sat} = 179.91°C)					<i>p</i> = 15.0 bar = 1.5 MPa (<i>T</i> _{sat} = 198.32°C)				
Sat.	0.1944	2583.6	2778.1	6.5865	0.1318	2594.5	2792.2	6.4448	
200	0.2060	2621.9	2827.9	6.6940	0.1325	2598.1	2796.8	6.4546	
240	0.2275	2692.9	2920.4	6.8817	0.1483	2676.9	2899.3	6.6628	
280	0.2480	2760.2	3008.2	7.0465	0.1627	2748.6	2992.7	6.8381	
320	0.2678	2826.1	3093.9	7.1962	0.1765	2817.1	3081.9	6.9938	
360	0.2873	2891.6	3178.9	7.3349	0.1899	2884.4	3169.2	7.1363	
400	0.3066	2957.3	3263.9	7.4651	0.2030	2951.3	3255.8	7.2690	
440	0.3257	3023.6	3349.3	7.5883	0.2160	3018.5	3342.5	7.3940	
500	0.3541	3124.4	3478.5	7.7622	0.2352	3120.3	3473.1	7.5698	
540	0.3729	3192.6	3565.6	7.8720	0.2478	3189.1	3560.9	7.6805	
600	0.4011	3296.8	3697.9	8.0290	0.2668	3293.9	3694.0	7.8385	
640	0.4198	3367.4	3787.2	8.1290	0.2793	3364.8	3783.8	7.9391	
<i>p</i> = 20.0 bar = 2.0 MPa (<i>T</i> _{sat} = 212.42°C)					<i>p</i> = 30.0 bar = 3.0 MPa (<i>T</i> _{sat} = 233.90°C)				
Sat.	0.0996	2600.3	2799.5	6.3409	0.0667	2604.1	2804.2	6.1869	
240	0.1085	2659.6	2876.5	6.4952	0.0682	2619.7	2824.3	6.2265	
280	0.1200	2736.4	2976.4	6.6828	0.0771	2709.9	2941.3	6.4462	
320	0.1308	2807.9	3069.5	6.8452	0.0850	2788.4	3043.4	6.6245	
360	0.1411	2877.0	3159.3	6.9917	0.0923	2861.7	3138.7	6.7801	
400	0.1512	2945.2	3247.6	7.1271	0.0994	2932.8	3230.9	6.9212	
440	0.1611	3013.4	3335.5	7.2540	0.1062	3002.9	3321.5	7.0520	
500	0.1757	3116.2	3467.6	7.4317	0.1162	3108.0	3456.5	7.2338	
540	0.1853	3185.6	3556.1	7.5434	0.1227	3178.4	3546.6	7.3474	
600	0.1996	3290.9	3690.1	7.7024	0.1324	3285.0	3682.3	7.5085	
640	0.2091	3362.2	3780.4	7.8035	0.1388	3357.0	3773.5	7.6106	
700	0.2232	3470.9	3917.4	7.9487	0.1484	3466.5	3911.7	7.7571	

TABLE A-4 (Continued)

T °C	v m ³ /kg	u kJ/kg	h kJ/kg	s kJ/kg · K	v m ³ /kg	u kJ/kg	h kJ/kg	s kJ/kg · K
$p = 40 \text{ bar} = 4.0 \text{ MPa}$ ($T_{\text{sat}} = 250.4^\circ\text{C}$)					$p = 60 \text{ bar} = 6.0 \text{ MPa}$ ($T_{\text{sat}} = 275.64^\circ\text{C}$)			
Sat.	0.04978	2602.3	2801.4	6.0701	0.03244	2589.7	2784.3	5.8892
280	0.05546	2680.0	2901.8	6.2568	0.03317	2605.2	2804.2	5.9252
320	0.06199	2767.4	3015.4	6.4553	0.03876	2720.0	2952.6	6.1846
360	0.06788	2845.7	3117.2	6.6215	0.04331	2811.2	3071.1	6.3782
400	0.07341	2919.9	3213.6	6.7690	0.04739	2892.9	3177.2	6.5408
440	0.07872	2992.2	3307.1	6.9041	0.05122	2970.0	3277.3	6.6853
500	0.08643	3099.5	3445.3	7.0901	0.05665	3082.2	3422.2	6.8803
540	0.09145	3171.1	3536.9	7.2056	0.06015	3156.1	3517.0	6.9999
600	0.09885	3279.1	3674.4	7.3688	0.06525	3266.9	3658.4	7.1677
640	0.1037	3351.8	3766.6	7.4720	0.06859	3341.0	3752.6	7.2731
700	0.1110	3462.1	3905.9	7.6198	0.07352	3453.1	3894.1	7.4234
740	0.1157	3536.6	3999.6	7.7141	0.07677	3528.3	3989.2	7.5190
$p = 80 \text{ bar} = 8.0 \text{ MPa}$ ($T_{\text{sat}} = 295.06^\circ\text{C}$)					$p = 100 \text{ bar} = 10.0 \text{ MPa}$ ($T_{\text{sat}} = 311.06^\circ\text{C}$)			
Sat.	0.02352	2569.8	2758.0	5.7432	0.01803	2544.4	2724.7	5.6141
320	0.02682	2662.7	2877.2	5.9489	0.01925	2588.8	2781.3	5.7103
360	0.03089	2772.7	3019.8	6.1819	0.02331	2729.1	2962.1	6.0060
400	0.03432	2863.8	3138.3	6.3634	0.02641	2832.4	3096.5	6.2120
440	0.03742	2946.7	3246.1	6.5190	0.02911	2922.1	3213.2	6.3805
480	0.04034	3025.7	3348.4	6.6586	0.03160	3005.4	3321.4	6.5282
520	0.04313	3102.7	3447.7	6.7871	0.03394	3085.6	3425.1	6.6622
560	0.04582	3178.7	3545.3	6.9072	0.03619	3164.1	3526.0	6.7864
600	0.04845	3254.4	3642.0	7.0206	0.03837	3241.7	3625.3	6.9029
640	0.05102	3330.1	3738.3	7.1283	0.04048	3318.9	3723.7	7.0131
700	0.05481	3443.9	3882.4	7.2812	0.04358	3434.7	3870.5	7.1687
740	0.05729	3520.4	3978.7	7.3782	0.04560	3512.1	3968.1	7.2670
$p = 120 \text{ bar} = 12.0 \text{ MPa}$ ($T_{\text{sat}} = 324.75^\circ\text{C}$)					$p = 140 \text{ bar} = 14.0 \text{ MPa}$ ($T_{\text{sat}} = 336.75^\circ\text{C}$)			
Sat.	0.01426	2513.7	2684.9	5.4924	0.01149	2476.8	2637.6	5.3717
360	0.01811	2678.4	2895.7	5.8361	0.01422	2617.4	2816.5	5.6602
400	0.02108	2798.3	3051.3	6.0747	0.01722	2760.9	3001.9	5.9448
440	0.02355	2896.1	3178.7	6.2586	0.01954	2868.6	3142.2	6.1474
480	0.02576	2984.4	3293.5	6.4154	0.02157	2962.5	3264.5	6.3143
520	0.02781	3068.0	3401.8	6.5555	0.02343	3049.8	3377.8	6.4610
560	0.02977	3149.0	3506.2	6.6840	0.02517	3133.6	3486.0	6.5941
600	0.03164	3228.7	3608.3	6.8037	0.02683	3215.4	3591.1	6.7172
640	0.03345	3307.5	3709.0	6.9164	0.02843	3296.0	3694.1	6.8326
700	0.03610	3425.2	3858.4	7.0749	0.03075	3415.7	3846.2	6.9939
740	0.03781	3503.7	3957.4	7.1746	0.03225	3495.2	3946.7	7.0952

TABLE A-4 (Continued)

<i>T</i> °C	<i>v</i> m ³ /kg	<i>u</i> kJ/kg	<i>h</i> kJ/kg	<i>s</i> kJ/kg · K	<i>v</i> m ³ /kg	<i>u</i> kJ/kg	<i>h</i> kJ/kg	<i>s</i> kJ/kg · K	
<i>p</i> = 160 bar = 16.0 MPa (<i>T</i> _{sat} = 347.44°C)					<i>p</i> = 180 bar = 18.0 MPa (<i>T</i> _{sat} = 357.06°C)				
Sat.	0.00931	2431.7	2580.6	5.2455	0.00749	2374.3	2509.1	5.1044	
360	0.01105	2539.0	2715.8	5.4614	0.00809	2418.9	2564.5	5.1922	
400	0.01426	2719.4	2947.6	5.8175	0.01190	2672.8	2887.0	5.6887	
440	0.01652	2839.4	3103.7	6.0429	0.01414	2808.2	3062.8	5.9428	
480	0.01842	2939.7	3234.4	6.2215	0.01596	2915.9	3203.2	6.1345	
520	0.02013	3031.1	3353.3	6.3752	0.01757	3011.8	3378.0	6.2960	
560	0.02172	3117.8	3465.4	6.5132	0.01904	3101.7	3444.4	6.4392	
600	0.02323	3201.8	3573.5	6.6399	0.02042	3188.0	3555.6	6.5696	
640	0.02467	3284.2	3678.9	6.7580	0.02174	3272.3	3663.6	6.6905	
700	0.02674	3406.0	3833.9	6.9224	0.02362	3396.3	3821.5	6.8580	
740	0.02808	3486.7	3935.9	7.0251	0.02483	3478.0	3925.0	6.9623	
<i>p</i> = 200 bar = 20.0 MPa (<i>T</i> _{sat} = 365.81°C)					<i>p</i> = 240 bar = 24.0 MPa				
Sat.	0.00583	2293.0	2409.7	4.9269					
400	0.00994	2619.3	2818.1	5.5540	0.00673	2477.8	2639.4	5.2393	
440	0.01222	2774.9	3019.4	5.8450	0.00929	2700.6	2923.4	5.6506	
480	0.01399	2891.2	3170.8	6.0518	0.01100	2838.3	3102.3	5.8950	
520	0.01551	2992.0	3302.2	6.2218	0.01241	2950.5	3248.5	6.0842	
560	0.01689	3085.2	3423.0	6.3705	0.01366	3051.1	3379.0	6.2448	
600	0.01818	3174.0	3537.6	6.5048	0.01481	3145.2	3500.7	6.3875	
640	0.01940	3260.2	3648.1	6.6286	0.01588	3235.5	3616.7	6.5174	
700	0.02113	3386.4	3809.0	6.7993	0.01739	3366.4	3783.8	6.6947	
740	0.02224	3469.3	3914.1	6.9052	0.01835	3451.7	3892.1	6.8038	
800	0.02385	3592.7	4069.7	7.0544	0.01974	3578.0	4051.6	6.9567	
<i>p</i> = 280 bar = 28.0 MPa					<i>p</i> = 320 bar = 32.0 MPa				
400	0.00383	2223.5	2330.7	4.7494	0.00236	1980.4	2055.9	4.3239	
440	0.00712	2613.2	2812.6	5.4494	0.00544	2509.0	2683.0	5.2327	
480	0.00885	2780.8	3028.5	5.7446	0.00722	2718.1	2949.2	5.5968	
520	0.01020	2906.8	3192.3	5.9566	0.00853	2860.7	3133.7	5.8357	
560	0.01136	3015.7	3333.7	6.1307	0.00963	2979.0	3287.2	6.0246	
600	0.01241	3115.6	3463.0	6.2823	0.01061	3085.3	3424.6	6.1858	
640	0.01338	3210.3	3584.8	6.4187	0.01150	3184.5	3552.5	6.3290	
700	0.01473	3346.1	3758.4	6.6029	0.01273	3325.4	3732.8	6.5203	
740	0.01558	3433.9	3870.0	6.7153	0.01350	3415.9	3847.8	6.6361	
800	0.01680	3563.1	4033.4	6.8720	0.01460	3548.0	4015.1	6.7966	
900	0.01873	3774.3	4298.8	7.1084	0.01633	3762.7	4285.1	7.0372	

TABLE A-5 Properties of Compressed Liquid Water

T °C	$v \times 10^3$ m ³ /kg	u kJ/kg	h kJ/kg	s kJ/kg · K	$v \times 10^3$ m ³ /kg	u kJ/kg	h kJ/kg	s kJ/kg · K
$p = 25 \text{ bar} = 2.5 \text{ MPa}$ ($T_{\text{sat}} = 223.99^\circ\text{C}$)					$p = 50 \text{ bar} = 5.0 \text{ MPa}$ ($T_{\text{sat}} = 263.99^\circ\text{C}$)			
20	1.0006	83.80	86.30	.2961	.9995	83.65	88.65	.2956
40	1.0067	167.25	169.77	.5715	1.0056	166.95	171.97	.5705
80	1.0280	334.29	336.86	1.0737	1.0268	333.72	338.85	1.0720
100	1.0423	418.24	420.85	1.3050	1.0410	417.52	422.72	1.3030
140	1.0784	587.82	590.52	1.7369	1.0768	586.76	592.15	1.7343
180	1.1261	761.16	763.97	2.1375	1.1240	759.63	765.25	2.1341
200	1.1555	849.9	852.8	2.3294	1.1530	848.1	853.9	2.3255
220	1.1898	940.7	943.7	2.5174	1.1866	938.4	944.4	2.5128
Sat.	1.1973	959.1	962.1	2.5546	1.2859	1147.8	1154.2	2.9202
$p = 75 \text{ bar} = 7.5 \text{ MPa}$ ($T_{\text{sat}} = 290.59^\circ\text{C}$)					$p = 100 \text{ bar} = 10.0 \text{ MPa}$ ($T_{\text{sat}} = 311.06^\circ\text{C}$)			
20	.9984	83.50	90.99	.2950	.9972	83.36	93.33	.2945
40	1.0045	166.64	174.18	.5696	1.0034	166.35	176.38	.5686
80	1.0256	333.15	340.84	1.0704	1.0245	332.59	342.83	1.0688
100	1.0397	416.81	424.62	1.3011	1.0385	416.12	426.50	1.2992
140	1.0752	585.72	593.78	1.7317	1.0737	584.68	595.42	1.7292
180	1.1219	758.13	766.55	2.1308	1.1199	756.65	767.84	2.1275
220	1.1835	936.2	945.1	2.5083	1.1805	934.1	945.9	2.5039
260	1.2696	1124.4	1134.0	2.8763	1.2645	1121.1	1133.7	2.8699
Sat.	1.3677	1282.0	1292.2	3.1649	1.4524	1393.0	1407.6	3.3596
$p = 150 \text{ bar} = 15.0 \text{ MPa}$ ($T_{\text{sat}} = 342.24^\circ\text{C}$)					$p = 200 \text{ bar} = 20.0 \text{ MPa}$ ($T_{\text{sat}} = 365.81^\circ\text{C}$)			
20	.9950	83.06	97.99	.2934	.9928	82.77	102.62	.2923
40	1.0013	165.76	180.78	.5666	.9992	165.17	185.16	.5646
80	1.0222	331.48	346.81	1.0656	1.0199	330.40	350.80	1.0624
100	1.0361	414.74	430.28	1.2955	1.0337	413.39	434.06	1.2917
140	1.0707	582.66	598.72	1.7242	1.0678	580.69	602.04	1.7193
180	1.1159	753.76	770.50	2.1210	1.1120	750.95	773.20	2.1147
220	1.1748	929.9	947.5	2.4953	1.1693	925.9	949.3	2.4870
260	1.2550	1114.6	1133.4	2.8576	1.2462	1108.6	1133.5	2.8459
300	1.3770	1316.6	1337.3	3.2260	1.3596	1306.1	1333.3	3.2071
Sat.	1.6581	1585.6	1610.5	3.6848	2.036	1785.6	1826.3	4.0139
$p = 250 \text{ bar} = 25 \text{ MPa}$					$p = 300 \text{ bar} = 30.0 \text{ MPa}$			
20	.9907	82.47	107.24	.2911	.9886	82.17	111.84	.2899
40	.9971	164.60	189.52	.5626	.9951	164.04	193.89	.5607
100	1.0313	412.08	437.85	1.2881	1.0290	410.78	441.66	1.2844
200	1.1344	834.5	862.8	2.2961	1.1302	831.4	865.3	2.2893
300	1.3442	1296.6	1330.2	3.1900	1.3304	1287.9	1327.8	3.1741

Antwoorden Meerkeuze 14 april 2010

1 A

2 B

3 zowel A en D zijn correct. Deze vraag is bij iedereen goed gerekend

4 D

5 A

6 A

7 D

8 C

9 D

10 D

11 C

12 D

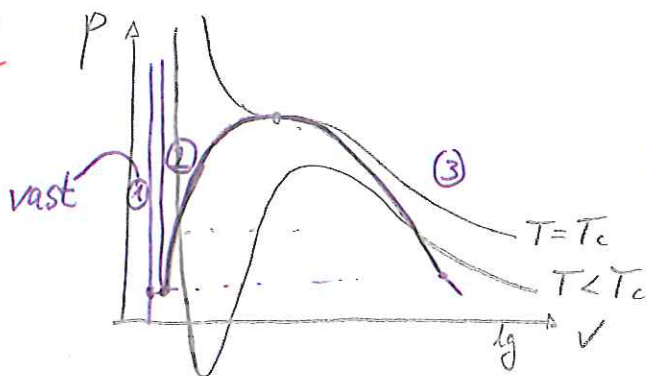
13 A

14 B

Thermodynamica II - exam 14 april 2010

opgave 1 $\Sigma 10$

a) $\Sigma 2.5$



② vloeistof
③ gas

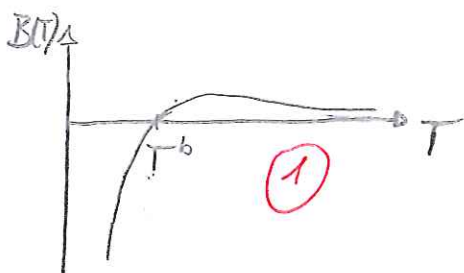
① for blue lines
① for vast, vloeistof, gas
①/2 for isotherms

b) $\Sigma 2.5$

$$\bar{s} = -\left(\frac{\partial \bar{g}}{\partial T}\right)_p \quad \bar{v} = \left(\frac{\partial \bar{g}}{\partial p}\right)_T \quad \bar{h} = \bar{g} + T\bar{s} = \bar{g} - T\left(\frac{\partial \bar{g}}{\partial T}\right)_p$$

$$\bar{u} = \bar{h} - p\bar{v} = \bar{g} - T\left(\frac{\partial \bar{g}}{\partial T}\right)_p - p\left(\frac{\partial \bar{g}}{\partial p}\right)_T \quad c_p = \left(\frac{\partial \bar{h}}{\partial T}\right)_p = -T\left(\frac{\partial^2 \bar{g}}{\partial T^2}\right)_p$$

c) $\Sigma 2$



$B(T)$ kan $>$ en $<$ dan 0

met $p = \frac{RT}{\bar{v}} + RT B(T) \frac{1}{\bar{v}^2}$
 $\lim_{\bar{v} \rightarrow \infty} = p^{\text{id}}$

kan $p < p^{\text{id}}$ voor $T < T^b$
 en $p > p^{\text{id}}$ voor $T > T^b$

d) $\Sigma 3$

$$p_1 = p^{\text{subl.}}(T_1 = 194.95 \text{ K}) = 101.3 \text{ kPa}$$

$$p_2 = p^{\text{subl.}}(T_2 = 204.05 \text{ K}) = 202.6 \text{ kPa}$$

$$p_3 = p^{\text{subl.}}(T^{\text{tr.}} = 216.58 \text{ K}) = ?$$

$$\ln \frac{p_2}{p_1} = -\frac{\Delta^{\text{vsl}}}{\bar{R}} \left(\frac{1}{T_2} - \frac{1}{T_1} \right) \Rightarrow \frac{\Delta^{\text{vsl}}}{\bar{R}} = \frac{-\ln \frac{202.6}{101.3}}{\left(\frac{1}{204.05 \text{ K}} - \frac{1}{194.95 \text{ K}} \right)} = +9.243 \text{ K} \quad \textcircled{1}$$

$$p_3 = p_2 \cdot \exp\left(-\frac{\Delta^{\text{vsl}}}{\bar{R}} \left(\frac{1}{T_3} - \frac{1}{T_2} \right)\right) = 202.6 \text{ kPa} \cdot \exp\left(-9.243 \left(\frac{1}{216.58} - \frac{1}{204.05} \right)\right) \quad \textcircled{1}$$

$$p_3 = 478. \text{ kPa} = p^{\text{tripel}} \quad \textcircled{1}$$

opgave 2 $\Sigma 10$

a) $\frac{dE_{cv}}{dt} = \dot{Q}_{cv} - \dot{W}_{cv} - \dot{m}(h_2 - h_1) \Rightarrow \underline{h_2 = h_1}$ (1)

$\frac{dJ_{cv}}{dt} = \frac{\dot{Q}_{cv}}{T_{transf.}} - \dot{m}(s_2 - s_1) + \dot{G}_{cv} \Rightarrow \underline{\dot{m}(s_2 - s_1) = \dot{G}_{cv}}$ (1)

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

$\bar{v}_1 = \frac{1}{2} \left(\frac{RT}{P} \left(\pm \sqrt{\left(\frac{RT}{P}\right)^2 + 4 \frac{RT}{P} B(T)} \right) \right)$ (1)

$\frac{RT}{P} = \frac{8.314 \cdot 410 \frac{J}{mol}}{10^6 \frac{J}{m^3}} \cdot 10^6 \frac{cm^3}{m^3}$

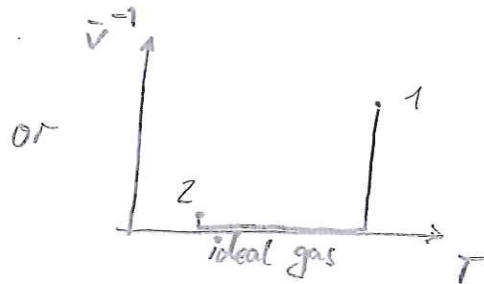
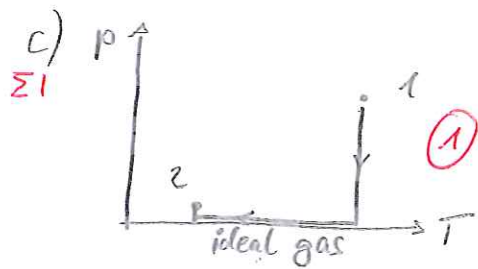
$= 3409 \frac{cm^3}{mol}$ (3492)

voor $T = 400 K$

$\bar{v}_1 = 3042 \frac{cm^3}{mol}$ (3145) voor $T = 420 K$

$B(T) = \left(297.6 - \frac{256100}{410} \right) \frac{cm^3}{mol}$

$= -327 \frac{cm^3}{mol}$ (-312.)



d) $(\bar{h} - \bar{h}^{ig})_1 = \underbrace{\bar{R}T(z-1)}_{B(T) \frac{1}{\bar{v}}} + \int_{\infty}^{\bar{v}} \left[T \left(\frac{\partial p}{\partial T} \right)_{\bar{v}} - p \right] d\bar{v}$, $\frac{p\bar{v}}{\bar{R}T} = 1 + B(T) \frac{1}{\bar{v}}$

$= z$

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

$= p$

$(\bar{h} - \bar{h}^{ig})_1 = \frac{\bar{R}T}{\bar{v}} B(T) + RT^2 \frac{dB}{dT} \int_{\infty}^{\bar{v}} \frac{1}{\bar{v}^2} d\bar{v} = \frac{\bar{R}T}{\bar{v}} \left(B(T) - T \frac{dB}{dT} \right)$ (1/2)

$= -\frac{1}{\bar{v}}$ (1/2)

e) $(\bar{h}_2 - \bar{h}^{ig})_1 = \frac{\bar{R}T}{\bar{v}} \left(\alpha + \frac{\beta}{T} - T\beta \frac{1}{T^2} \right) = \frac{\bar{R}T}{\bar{v}} \left(\alpha + \frac{2\beta}{T} \right)$ (1/2)

$= \frac{8.314 \cdot 410 \frac{J}{mol}}{3042 \frac{cm^3}{mol}} \left(297.6 - \frac{2 \cdot 256100}{410} \right) \frac{cm^3}{mol} = -1066 \frac{J}{mol}$ (1/2)

(-1024)

$$f) \quad \bar{h}_2 = \bar{h}_1 \quad \Rightarrow \quad \Delta_{12} \bar{h} = \bar{h}_2 - \bar{h}_1 = 0$$

$\Sigma 2 + 1$
bonus

$\Delta_{12} \bar{h}$ langs integratiepad zo als in c) getekend

$$\Delta_{12} \bar{h} = -(\bar{h} - \bar{h}^{ig})_1 + (\bar{h}_2^{ig} - \bar{h}_1^{ig}) + (\bar{h} - \bar{h}^{ig})_2 = 0 \quad (1)$$

≤ 0 (ideaal gas voor punt 2)

$$\Rightarrow (\bar{h}_2^{ig} - \bar{h}_1^{ig}) = (\bar{h} - \bar{h}^{ig})$$

$$\int_{T_1}^{T_2} c_p dT = \int_{T_1}^{T_2} (a + b \cdot T) dT = a(T_2 - T_1) + \frac{1}{2} b (T_2^2 - T_1^2) = (\bar{h} - \bar{h}^{ig}) \quad (1/2)$$

$$\Rightarrow \frac{1}{2} b \cdot T_2^2 + a T_2 - \left[(\bar{h} - \bar{h}^{ig})_1 + a T_1 + \frac{1}{2} b T_1^2 \right] = 0 \quad (1/2)$$

$A = 0.0465 \frac{\text{J}}{\text{mol} \cdot \text{K}^2} \quad B = 27.93 \frac{\text{J}}{\text{mol} \cdot \text{K}} \quad C = 18202 \frac{\text{J}}{\text{mol}} \quad (18910)$

$$\Rightarrow T_2 = 393.7 \text{ K} \quad (404.6 \text{ K}) \quad (1/2)$$

OPGAVE 3

In een stoomturbinekringproces wordt een massastroom stoom van 25 kg/s toegevoerd aan de turbine. Na expansie condenseert de stoom bij een druk van 0,10 bar. Aangenomen wordt dat het stoomturbinekringproces een intern rendement heeft van 80 % (dus: $\eta_{ex, kringpr} = 0,80$). Dit rendement is als volgt gedefinieerd: $\eta_{ex, kringpr} = \frac{W_{irrev}}{W_{rev}}$ waarbij de arbeid is gemeten aan de uitgaande as van de turbine. Deze arbeid wordt in een elektrische generator omgezet in elektriciteit.

De eigenschappen van water en stoom zijn te vinden in de **tabellen A-2 t/m A-5**.

Verder is gegeven:

- water/stoom	druk aan inlaat turbine	$p_{turb, in}$	=	60	bar
	temperatuur aan inlaat turbine	$T_{turb, in}$	=	540	°C
	druk aan inlaat ketel	$p_{w, in}$	=	75	bar
	temperatuur aan inlaat ketel	$T_{w, in}$	=	180	°C
	druk in condensor	p_{cond}	=	0,10	bar
- generator	rendement	η_{gen}	=	0,97	

Vragen:

- Bereken de thermodynamisch gemiddelde temperatuur van warmtetoevoer aan het stoomturbinekringproces (veronderstel dat verliezen in de stoomleiding van ketel naar turbine verwaarloosbaar zijn)
- Bereken het (energie)rendement van stoomturbinekringproces
- Bepaal het elektrisch vermogen dat wordt afgegeven door de generator

UITWERKING

- Bereken de thermodynamisch gemiddelde temperatuur van warmtetoevoer aan het stoomturbinekringproces (veronderstel dat verliezen in de stoomleiding van ketel naar turbine verwaarloosbaar zijn)

Warmtetoevoer aan het stoomturbinekringproces vindt plaats in de ketel. Als de verliezen in de stoomleiding van ketel naar turbine verwaarloosbaar zijn, zijn de condities aan de inlaat van de turbine dezelfde als die aan de uitlaat van de ketel. De thermodynamisch gemiddelde temperatuur van warmtetoevoer aan het stoomturbinekringproces kan dan met de volgende vergelijking worden berekend:

$$\bar{T}_{toe, kringpr} = \frac{h_{turbine, in} - h_{ketel, in}}{s_{turbine, in} - s_{ketel, in}} = \frac{3517,0 - 766,55}{6,9999 - 2,1308} = 564,88 \text{ K}$$

1.5pt: using the correct formula

2pt: finding the correct values for h and s

- Bereken het (energie)rendement van stoomturbinekringproces

Het rendement van het stoomturbinekringproces is gelijk aan het rendement van een reversibel kringproces met warmtetoevoer en -afvoer bij dezelfde temperaturen als het werkelijke proces vermenigvuldigd met het intern rendement, dus:

$$\eta_{th,kringpr} = \eta_{ex,kringpr} \cdot \left(1 - \frac{T_{af,kringpr}}{T_{toe,kringpr}} \right)$$

De temperatuur waarbij water uit een stoomturbinekringproces wordt afgevoerd is de condensatietemperatuur van de stoom.

$$T_{af,kringpr} = T_{verz} (0,10 \text{ bar}) = 45,81 \text{ } ^\circ\text{C} (318,96 \text{ K})$$

Het rendement wordt dan:

$$\eta_{th,kringpr} = \eta_{ex,kringpr} \cdot \left(1 - \frac{T_{af,kringpr}}{T_{toe,kringpr}} \right) = 0,80 \cdot \left(1 - \frac{318,96}{564,88} \right) = 0,34828$$

1.5pt: formula for realizing that is it carnot times 0.8

1pt: for realizing that the condensation temperature is calculated from the condensation pressure

1pt: filling in the values correctly in the formula

c) Bepaal het elektrisch vermogen dat wordt afgegeven door de generator

Het elektrisch vermogen dat wordt afgegeven door de generator is gelijk aan warmte die wordt toegevoerd aan het kringproces vermenigvuldigt met het thermisch rendement van het kringproces en het generatorrendement. Dus:

$$P_{gen} = \Phi_{Q,toe} \cdot \eta_{th,kringpr} \cdot \eta_{gen}$$

De toegevoerde warmte aan het kringproces bedraagt:

$$\Phi_{Q,toe} = \Phi_{m,stoem} \cdot (h_{turbine,in} - h_{ketel,in}) = 25 \times (3517,0 - 766,55) = 68761 \text{ kW}$$

Het afgegeven vermogen door de generator is dus:

$$P_{gen} = \Phi_{Q,toe} \cdot \eta_{th,kringpr} \cdot \eta_{gen} = 68761 \times 0,34828 \times 0,97 = 23230 \text{ kW}$$

1pt: formula to compute the power from the generator

1pt: formula to compute the input heat flux

1pt: plugging in the correct numbers