
THERMODYNAMICA 2 (WB1224)

donderdag 2 februari 2006
14.00 - 17.00 u.

AANWIJZINGEN

Het tentamen bestaat uit twee of drie open vragen en 15 meerkeuzevragen. Voor de beantwoording van de meerkeuzevragen is een formulier bijgesloten.

Het tentamen is een OPEN BOEK tentamen. Dit betekent dat tijdens het tentamen uitsluitend het boek: 'Fundamentals of engineering thermodynamics (Moran & Shapiro)' mag worden ingekeken. Ook mag een formuleblad ter grootte van 1 A4-tje worden gebruikt. Het gebruik van college sheets is NIET TOEGESTAAN.

Het is met klem **VERBODEN** uitgewerkte opgaven (anders dan in het boek) bij de hand te hebben!!!

Open vragen

Gebruik voor de beantwoording van **elk van de open vragen** een **afzonderlijk blad papier**.

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 punten die voor de meerkeuzevragen worden verkregen bedragen $(n - 3) \times 0,4$. Hierin is n het aantal goed beantwoorde vragen. Met 15 meerkeuzevragen kunnen dus maximaal 4,8 punten worden behaald (op een schaal van 1 tot 10).

Voor de open vragen kunnen maximaal 5,2 punten worden verkregen. Alle deelvragen tellen even zwaar mee.

OPGAVE 1

Hete lucht, met een temperatuur $T_1 = 1200 \text{ K}$ en een druk $p_1 = 11,032 \text{ bar}$, wordt geëxpandeerd in een turbine voor de productie van elektriciteit. De geëxpandeerde lucht wordt zonder verder drukverlies afgevoerd naar de omgeving. De omgevingsdruk bedraagt 1 atm ($p_0 = 1,01325 \text{ bar}$).

Het op te wekken elektrisch vermogen bedraagt: $P_{\text{electr}} = 4,746 \text{ MW}$

Verder is gegeven:

het isentropisch rendement van de turbine: $\eta_s = 0,800$

het rendement van de generator: $\eta_{\text{gen}} = 0,960$

Lucht mag worden beschouwd als ideaal gas. De stofgegevens in tabel A-22 mogen dan worden gebruikt.

Gevraagd:

- Bereken de enthalpie (h_2) en de temperatuur (T_2) van de geëxpandeerde lucht bij het verlaten van de turbine.
- Bereken de massastroom lucht ($\Phi_{m,\text{air}}$) die nodig is om het verlangde elektrische vermogen te produceren.

OPGAVE 2

In een warmtewisselaar wordt een hoeveelheid kooldioxide ($\Phi_{m,\text{CO}_2} = 13,83 \text{ kg/s}$) met een druk van 3 bar afgekoeld van $T_1 = 600 \text{ K}$ tot een temperatuur $T_2 = 460 \text{ K}$. De afgegeven warmte wordt gebruikt om een water om te zetten in oververhitte stoom.

Het water komt de warmtewisselaar binnen in kokende toestand bij een druk van 5,0 bar. De geproduceerde stoom heeft een temperatuur $T_4 = 280,0 \text{ °C}$. De drukdaling als gevolg van wrijving is verwaarloosbaar.

Overige gegevens:

Kooldioxide is te beschouwen als ideaal gas. De stofgegevens gegevens in tabel A-27 mogen dan worden gebruikt. De molmassa van kooldioxide bedraagt: $M_{\text{CO}_2} = 44,01 \text{ kg/kmol}$

De omgevingstemperatuur bedraagt: $T_0 = 288,15 \text{ K}$

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

Gevraagd:

- Bereken de massastroom stoom ($\Phi_{m,\text{steam}}$) die in deze warmtewisselaar kan worden geproduceerd.
- Bereken de exergie die per tijdseenheid door de kooldioxide wordt afgegeven in de warmtewisselaar ($\Phi_{\text{Ex,CO}_2}$) en het exergierendement (η_{ex}).

OPGAVE 3

In een vat bevindt zich een hoeveelheid kooldioxide met een temperatuur van $T_{\text{CO}_2} = 395 \text{ K}$ en een druk van $p_{\text{CO}_2} = 600 \text{ bar}$. Om te weten hoeveel energie kan worden onttrokken aan het gas moet worden vastgesteld in welke mate de werkelijke enthalpie afwijkt van de enthalpie van deze stof indien deze wordt beschouwd als ideaal gas. Daarvoor kan gebruik worden gemaakt van het gegeneraliseerde correctie diagram in figuur A-4.

Overige gegevens:

temperatuur en druk van kooldioxide in het kritisch punt: $T_c = 304 \text{ K}; p_c = 73,9 \text{ bar}$

universele gasconstante: $\bar{R} = 8,3143 \text{ kJ/kmolK}$

Gevraagd:

Bereken procentuele afwijking van de enthalpie van kooldioxide beschouwd als reëel gas ten opzichte van de enthalpie van kooldioxide beschouwd als ideaal gas.

MEERKEUZEVRAGEN THERMODYNAMICA 2 (WB1224)**donderdag 2 februari 2006, 14.00 - 17.00 u.**

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

MK-1

De volgende energiesoorten zijn met behulp van een reversibel proces volledig om te zetten in arbeid:

1. Inwendige energie
2. Elektrische energie
3. Warmte
4. Potentiele energie

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

MK-2

Met behulp van de tweede hoofdwet kan worden bewezen dat:

1. Er een temperatuurschaal kan worden gedefinieerd die onafhankelijk is van stoffeigenschappen
2. De prestatiefactor (COP) van een koude machine altijd kleiner is dan van een arbeidsproces
3. De prestatiefactor (COP) van een reversibele koudemachine uitsluitend afhankelijk is van de temperatuur van het koude en het warme reservoir
4. Rendementen bij de elektriciteitsproductie altijd kleiner zijn dan 0,75

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

MK-3

Ten aanzien van de Kelvin temperatuurschaal mag worden gesteld dat:

1. Temperaturen lager dan 0 K mogelijk zijn
2. De stapgrootte van de schaal (= 1 K) is ontleend aan de Celsius temperatuurschaal
3. Kelvin temperaturen kunnen worden gemeten met behulp van de constant-volume gasthermometer
4. De temperatuurschaal is gebaseerd op de uitzetting van gassen bij lage temperatuur

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

MK-4

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

MK-5

Voor reversibele kringprocessen kan worden bewezen dat het thermisch rendement onafhankelijk is van:

1. De opbouw van het systeem
2. De temperatuur waarmee warmte uit het systeem wordt afgevoerd
3. De stof in het systeem
4. Het proces dat door het systeem wordt beschreven

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

MK-6

Voor het berekenen van de arbeid die afgegeven wordt indien een hoeveelheid stof een drukverandering ondergaat kan gebruik worden gemaakt van de volgende vergelijking:

$$\frac{W}{\Phi_m} = - \int_1^2 v \cdot dp$$

De vergelijking is allen geldig voor:

1. Expansieprocessen
2. Processen in open stationair doorstroomde systemen
3. Processen waarbij de verandering in potentiele energie verwaarloosbaar klein is
4. Systemen waarin geen sprake is van wrijving

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

MK-7

In een straalbuis wordt een gas adiabatisch geëxpandeerd met als doel de snelheid van het gas te verhogen. Verondersteld mag worden dat de snelheid van het gas aan de inlaat (= toestand 1) van de straalbuis verwaarloosbaar klein is. Voor een stationair proces met wrijving geldt dan:

1. $c_2 = \sqrt{2 \cdot (h_1 - h_2)}$ (g)
2. $\eta_{\text{straalbuis}} = \frac{c_2^2}{c_{2s}^2}$ (g)
3. $h_1 = h_2$
4. $\eta_{\text{straalbuis}} = \frac{h_1 - h_2}{h_1 - h_{2s}}$ (g)

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

MK-8

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 warmte wordt afgevoerd uit het systeem
2. De entropieproductie gelijk moet zijn aan nul
3. Er geen warmte wordt uitgewisseld met de omgeving
4. De entropieproductie negatief moet zijn

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

MK-9

De thermodynamisch equivalente temperatuur voor de warmtetoevoer aan een gasstroom of hoeveelheid gas kan bij benadering worden berekend met de volgende

$$\text{vergelijking: } \bar{T} = \frac{T_{\text{uit}} - T_{\text{in}}}{\ln \frac{T_{\text{uit}}}{T_{\text{in}}}}$$

Deze vergelijking mag alleen worden gebruikt indien:

1. Het gas mag worden beschouwd als ideaal gas
2. Het volume van het gas constant is
3. De soortelijk warmte van het gas over het betreffende temperatuurtraject constant is
4. De druk van het gas constant is

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

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

MK-10

De exergie van een energiedrager is de hoeveelheid arbeid die uit deze energiedrager kan worden verkregen door deze in evenwicht te brengen met de omgeving. Daarbij moet gebruik worden gemaakt van één of meer processen die alle aan de volgende eisen voldoen:

1. Het proces moet omkeerbaar zijn
2. Het proces moet zich afspelen in een open systeem met constant volume dat stationair wordt doorstroomd
3. Het proces mag geen arbeid produceren
4. Het proces mag alleen warmte uitwisselen met de omgeving

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

MK-11

Het exergierendement van een elektriciteitscentrale verschilt slechts weinig van het energierendement (= thermisch rendement). Dit komt doordat:

1. De thermische verliezen in de ketel gering zijn
2. De exergie van de brandstof slechts weinig afwijkt van de verbrandingswaarde
3. De turbine een hoog rendement heeft
4. Het exergieverlies in de condensor klein is.

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

MK-12

In een stoomturbinekringproces is, bij gelijkblijvende stoomtemperatuur, verhoging van de stoomdruk van belang om warmte met een hoge thermodynamisch gemiddelde temperatuur aan het kringproces te kunnen toevoeren. Over de maximaal haalbare stoomdruk bij verdamping kunnen de volgende uitspraken worden gedaan:

1. De maximaal haalbare stoomdruk wordt begrensd door het eindvochtgehalte in de turbine
2. Verlaging van de condensatietemperatuur maakt een hogere stoomdruk mogelijk
3. Een slechter isentropisch rendement van de turbine maakt een hogere stoomdruk mogelijk
4. Door toepassing van herverhitting moet de stoomdruk worden verlaagd

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

MK-13

Een centrale, bestaande uit een stoomketel en turbine, heeft een rendement van 35 %. Om de uitstoot van CO₂ te verminderen wil men het rendement verbeteren. Dit kan worden bereikt door het nemen van de volgende maatregelen:

1. De druk aan de inlaat van de turbine wordt verhoogd
2. De wrijving in de turbineschoepen wordt gereduceerd door de aanschaf van een nieuwe rotor
3. De druk in de condensor wordt verlaagd
4. De stoomtemperatuur aan de inlaat van de turbine wordt verlaagd

- a) maatregelen 1, 2 en 3 verhogen het rendement, maatregel 4 niet
- b) maatregelen 2, 3 en 4 verhogen het rendement, maatregel 1 niet
- c) maatregelen 1, 2, 3 en 4 verhogen het rendement
- d) maatregelen 1, 3 en 4 verhogen het rendement, maatregel 2 niet

2. De constanten kunnen eveneens worden bepaald door gebruik te maken van de toestand in het kritisch punt
3. De constanten, bepaald door gebruik te maken van de toestand in het kritisch punt, zijn doorgaans nauwkeuriger dan constanten die langs empirische weg zijn bepaald
4. De nauwkeurigheid van een p, v, T -vergelijking is in het algemeen beter als het aantal constanten in de vergelijking groter is

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

MK-15

De Joule-Thomson coëfficiënt is:

1. Gelijk aan de temperatuurverandering als gevolg van een drukverandering bij constante enthalpie
2. Voor koudemiddelen positief voor alle condities
3. Gelijk aan de temperatuurverandering als gevolg van een drukverandering bij constante entropie
4. Gelijk aan nul in het inversiepunt

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

MK-14

De zogenaamde p, v, T -vergelijkingen, zoals bijv. de vergelijkingen van van der Waals, Redlich-Kwong, Beattie-Bridgeman etc., kunnen worden gebruikt voor de berekening van toestandsgrootheden van stoffen.

Over deze vergelijkingen kunnen de volgende uitspraken worden gedaan:

1. De vergelijkingen bevatten een aantal constanten. Met één set empirisch bepaalde waarden van deze constanten kan het volledige toepassingsgebied nauwkeurig worden beschreven.

De juiste oplossingen voor de meerkeuze vragen zijn (tentamen 2 februari 2006):

1a 2 is vervallen 3c 4c 5b
6c 7a 8b 9c 10a
11a 12c 13a 14a 15b

UITWERKINGEN

OPGAVE 1

Hete lucht, met een temperatuur $T_1 = 1200 \text{ K}$ en een druk $p_1 = 11,032 \text{ bar}$, wordt geëxpandeerd in een turbine voor de productie van elektriciteit. De geëxpandeerde lucht wordt zonder verder drukverlies afgevoerd naar de omgeving. De omgevingsdruk bedraagt 1 atm ($p_0 = 1,01325 \text{ bar}$).

Het op te wekken elektrisch vermogen bedraagt: $P_{\text{electr}} = 4,746 \text{ MW}$

Verder is gegeven:

het isentropisch rendement van de turbine: $\eta_s = 0,800$

het rendement van de generator: $\eta_{\text{gen}} = 0,960$

Lucht mag worden beschouwd als ideaal gas. De stofgegevens in tabel A-22 mogen dan worden gebruikt.

Gevraagd:

- Bereken de enthalpie (h_2) en de temperatuur (T_2) van de geëxpandeerde lucht bij het verlaten van de turbine.
- Bereken de massastroom lucht ($\dot{\Phi}_{m,\text{air}}$) die nodig is om het verlangde elektrische vermogen te produceren.

UITWERKING OPGAVE 1

- Bereken de enthalpie (h_2) en de temperatuur (T_2) van de geëxpandeerde lucht bij het verlaten van de turbine.

Om de genoemde uitlaat parameters te kunnen berekenen moeten eerst enthalpie en temperatuur na isentropische expansie worden berekend. Hiervoor kan gebruik worden gemaakt van de volgende regel voor isentropische expansie:

$$\frac{p_1}{p_2} = \frac{p_{\text{rel},1}}{p_{\text{rel},2}}$$

Uit tabel A-22 kan worden afgelezen dat: $p_{\text{rel},1} = 238,0$

Met bovenstaande vergelijking en de gegeven waarden voor de drukken voor en na expansie volgt dan:

$$p_{\text{rel},2} = p_{\text{rel},1} \times \frac{p_2}{p_1} = 238,0 \times \frac{1,01325}{11,032} = 21,86$$

Uit tabel A-22 is dan af te lezen dat: $T_{2s} = 650 \text{ K}$ en $h_{2s} = 659,84 \text{ kJ/kg}$

Het isentropisch rendement van de turbine is als volgt gedefinieerd:

$$\eta_s = \frac{h_1 - h_2}{h_1 - h_{2s}}$$

Met de gegeven turbine-inlaattemperatuur kan de enthalpie uit tabel A-22 worden afgelezen:

$$h_1 = 1277,79 \text{ kJ/kg}$$

De enthalpie aan de uitlaat van de turbine wordt dan:

$$h_2 = h_1 - \eta_s \times (h_1 - h_{2s}) = 1277,79 - 0,80 \times (1277,79 - 659,84) = 783,43 \text{ kJ/kg}$$

De bijbehorende temperatuur kan worden afgelezen uit tabel A-22:

$$T_2 = 764,8 \text{ K} \quad \text{want} \quad \left(\frac{T_2 - 760}{770 - 760} = \frac{783,43 - 778,18}{789,11 - 778,18} \right)$$

- Bereken de massastroom lucht ($\dot{\Phi}_{m,\text{air}}$) die nodig is om het verlangde elektrische vermogen te produceren.

Het te produceren elektrisch vermogen kan worden berekend met de volgende vergelijking:

$$P_{\text{electr}} = \dot{\Phi}_{m,\text{air}} \cdot (h_1 - h_2) \cdot \eta_{\text{gen}}$$

Aangezien het verlangde elektrische vermogen is gegeven, kan met deze vergelijking de massastroom lucht worden berekend:

$$\dot{\Phi}_{m,\text{air}} = \frac{P_{\text{electr}}}{(h_1 - h_2) \cdot \eta_{\text{gen}}} = \frac{4746}{(1277,79 - 783,73) \times 0,960} = 10,0 \text{ kg/s}$$

OPGAVE 2

In een warmtewisselaar wordt een hoeveelheid kooldioxide ($\dot{\Phi}_{m,\text{CO}_2} = 13,83 \text{ kg/s}$) met een druk van 3 bar afgekoeld van $T_1 = 600 \text{ K}$ tot een temperatuur $T_2 = 460 \text{ K}$. De afgegeven warmte wordt gebruikt om water om te zetten in oververhitte stoom.

Het water komt de warmtewisselaar binnen in kokende toestand bij een druk van 5,0 bar. De geproduceerde stoom heeft een temperatuur $T_4 = 280,0 \text{ °C}$. De drukdaling als gevolg van wrijving is verwaarloosbaar.

Overige gegevens:

Kooldioxide is te beschouwen als ideaal gas. De stofgegevens gegevens in tabel A-27 mogen dan worden gebruikt. De molmassa van kooldioxide bedraagt: $M_{\text{CO}_2} = 44,01 \text{ kg/kmol}$

De omgevingstemperatuur bedraagt: $T_0 = 288,15 \text{ K}$

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

Gevraagd:

- Bereken de massastroom stoom ($\dot{\Phi}_{m,\text{steam}}$) die in deze warmtewisselaar kan worden geproduceerd.
- Bereken de exergie die per tijdseenheid door de kooldioxide wordt afgegeven in de warmtewisselaar ($\dot{\Phi}_{\text{Ex},\text{CO}_2}$) en het exergierendement (η_{ex}).

UITWERKING OPGAVE 2

- Bereken de massastroom stoom ($\dot{\Phi}_{m,\text{steam}}$) die in deze warmtewisselaar kan worden geproduceerd.

De hoeveelheid warmte die per tijdseenheid in de warmtewisselaar wordt overgedragen bedraagt:

$$\dot{\Phi}_Q = \dot{\Phi}_{n,\text{CO}_2} \cdot (\bar{h}_1 - \bar{h}_2)$$

Hierin is $\dot{\Phi}_{n,\text{CO}_2}$ de molstroom kooldioxide. Deze kan als volgt worden berekend:

$$\dot{\Phi}_{n,\text{CO}_2} = \frac{\dot{\Phi}_{m,\text{CO}_2}}{M_{\text{CO}_2}}$$

De temperaturen van de ingaande en de uitgaande stroom kooldioxide zijn gegeven. De enthalpiewaarden kunnen dan worden afgelezen in tabel A-27:

$$\bar{h}_1 = 22280 \text{ kJ/kmol} \quad \text{en} \quad \bar{h}_2 = 15916 \text{ kJ/kmol}$$

De hoeveelheid warmte die per tijdseenheid in de warmtewisselaar wordt overgedragen wordt dan:

$$\dot{\Phi}_Q = \frac{\dot{\Phi}_{m,\text{CO}_2}}{M_{\text{CO}_2}} \cdot (\bar{h}_1 - \bar{h}_2) = \frac{13,83}{44,01} \times (22280 - 15916) = 2000 \text{ kW}$$

Voor kokend water bij een druk van 5,0 bar volgt uit tabel A-3:

$$T_3 = 151,9 \text{ °C} \quad h_3 = 640,23 \text{ kJ/kg} \quad s_3 = 1,8607 \text{ kJ/kgK}$$

Met $T_4 = 280,0 \text{ °C}$ kan voor oververhitte stoom worden afgelezen uit tabel A-4:

$$h_4 = 3022,9 \text{ kJ/kg} \quad s_4 = 7,3865 \text{ kJ/kgK}$$

De massastroom stoom volgt dan uit de energiebalans voor de primaire stroom in de warmtewisselaar:

$$\dot{\Phi}_{m, \text{steam}} = \frac{\dot{\Phi}_Q}{h_4 - h_3} = \frac{2000}{3022,9 - 640,23} = 0,8394 \text{ kg/s}$$

- b) Bereken de exergie die per tijdseenheid door de kooldioxide wordt afgegeven in de warmtewisselaar ($\dot{\Phi}_{Ex, \text{CO}_2}$) en het exergierendement (η_{ex}).

De afgegeven exergie per tijdseenheid door de stroom kooldioxide kan worden berekend met de volgende vergelijking:

$$\dot{\Phi}_{Ex, \text{CO}_2} = \left(1 - \frac{T_0}{\bar{T}_{\text{CO}_2}} \right) \cdot \dot{\Phi}_Q$$

De thermodynamisch equivalente temperatuur van de kooldioxide kan worden bepaald met de volgende vergelijking (de soortelijke warmte is vrijwel constant op het beschouwde temperatuurtraject):

$$\bar{T}_{\text{CO}_2} = \frac{T_1 - T_2}{\ln \frac{T_1}{T_2}} = \frac{600 - 460}{\ln \frac{600}{460}} = 526,90 \text{ K}$$

De per tijdseenheid afgegeven exergie wordt dan:

$$\dot{\Phi}_{Ex, \text{CO}_2} = \left(1 - \frac{288,15}{526,90} \right) \cdot 2000 = 906,3 \text{ kW}$$

Om het exergierendement van de warmtewisselaar te kunnen berekenen moet ook de opgenomen exergie door de stoom worden berekend. Dit kan op soortgelijke wijze worden gedaan:

$$\dot{\Phi}_{Ex, \text{steam}} = \left(1 - \frac{T_0}{\bar{T}_{\text{steam}}} \right) \cdot \dot{\Phi}_Q$$

$$\text{met: } \bar{T}_{\text{steam}} = \frac{h_4 - h_3}{s_4 - s_3} = \frac{3022,9 - 640,23}{7,3865 - 1,8607} = 431,19 \text{ K}$$

bedraagt de per tijdseenheid door de stoom opgenomen exergie:

$$\dot{\Phi}_{Ex, \text{steam}} = \left(1 - \frac{288,15}{431,19} \right) \times 2000 = 663,5 \text{ kW}$$

Het exergierendement van de warmtewisselaar is dan:

$$\eta_{ex} = \frac{Ex_{\text{product}}}{Ex_{\text{source}}} = \frac{\dot{\Phi}_{Ex, \text{steam}}}{\dot{\Phi}_{Ex, \text{CO}_2}} = \frac{663,5}{906,3} = 0,732$$

OPGAVE 3

In een vat bevindt zich een hoeveelheid kooldioxide met een temperatuur van $T_{\text{CO}_2} = 395 \text{ K}$ en een druk van $p_{\text{CO}_2} = 600 \text{ bar}$. Om te weten hoeveel energie kan worden onttrokken aan het gas moet worden vastgesteld in welke mate de werkelijke enthalpie afwijkt van de enthalpie van deze stof indien deze wordt beschouwd als ideaal gas. Daarvoor kan gebruik worden gemaakt van het gegeneraliseerde correctie diagram in figuur A-4.

Overige gegevens:

temperatuur en druk van kooldioxide in het kritisch punt: $T_c = 304 \text{ K}$; $p_c = 73,9 \text{ bar}$

universele gasconstante: $\bar{R} = 8,3143 \text{ kJ/kmolK}$

Gevraagd:

Bereken procentuele afwijking van de enthalpie van kooldioxide beschouwd als reëel gas ten opzichte van de enthalpie van kooldioxide beschouwd als ideaal gas.

UITWERKING OPGAVE 3

Bereken procentuele afwijking van de enthalpie van kooldioxide beschouwd als reëel gas ten opzichte van de enthalpie van kooldioxide beschouwd als ideaal gas.

De molaire enthalpie van CO₂ als ideaal gas kan worden verkregen uit tabel A-27:

$$\bar{h}^* = \frac{12960 + 13372}{2} = 13166 \text{ kJ/kmol}$$

Met $T_{\text{CO}_2} = 395 \text{ K}$ en $p_{\text{CO}_2} = 600 \text{ bar}$ geldt:

$$T_{\text{R}} = \frac{T_{\text{CO}_2}}{T_c} = \frac{395}{304} = 1,3 \quad \text{en} \quad p_{\text{R}} = \frac{p_{\text{CO}_2}}{p_c} = \frac{600}{73,9} = 8,12$$

Uit het diagram in figuur A-4 volgt dan: $\frac{\bar{h}^* - \bar{h}}{\bar{R} \cdot T_c} = 3,0$

Het verschil tussen de enthalpie voor ideaal gas en voor reëel gas wordt dan:

$$\bar{h}^* - \bar{h} = 3,0 \times \bar{R} \cdot T_c = 3,0 \times 8,3143 \times 304 = 7583 \text{ kJ/kmol}$$

De afwijking van de enthalpie van het reële gas ten opzichte van ideaal gas is dus:

$$\frac{\bar{h}^* - \bar{h}}{\bar{h}^*} \times 100\% = \frac{7583}{13166} \times 100\% = 57,6\%$$