
THERMODYNAMICA 2 (WB1224)

donderdag 27 januari 2005
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.

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

Lucht wordt gecompriemd in een zuigercompressor met een compressieverhouding van 1:10. Aan de uitlaat van de compressor wordt een temperatuur gemeten van 607 °C.

De zuigercompressor zuigt lucht aan uit de omgeving met een druk van 1 atmosfeer (= 1,01325 bar) en een temperatuur van 22 °C. De hoeveelheid lucht die bij deze inlaatcondities kan worden gecompriemd bedraagt $\dot{\Phi}_{m,\text{lucht}} = 0,04875 \text{ kg/s}$.

Voor de evaluatie van dit proces mag worden verondersteld dat lucht zich gedraagt als een ideaal gas. De volgende gegevens zijn beschikbaar voor de beantwoording van onderstaande vragen:

- tabel A-22 voor de eigenschappen van lucht
- universele gasconstante: $\bar{R} = 8,3143 \text{ kJ/kmol K}$
- molmassa van lucht: $M_{\text{lucht}} = 28,97 \text{ kg/kmol}$

Vragen:

- a) bereken de luchttemperatuur (T_{2s}) en de druk (p_{2s}) aan de uitlaat van de compressor in geval van isentropische compressie.
- b) bepaal het isentropische rendement ($\eta_{s,\text{compr}}$) en het benodigde vermogen (P_{compr}) voor de aandrijving van de compressor
- c) bereken ook het exergieverlies van de compressor ($Ex_{\text{verl,compr}}$).

OPGAVE 2

Gecomprimeerde lucht ($\dot{\Phi}_{m,\text{lucht}} = 1,0 \text{ kg/s}$) met een druk van 30 bar en een temperatuur van 544 °C wordt bij gelijkblijvende druk afgekoeld tot omgevingstemperatuur ($T_0 = 22 \text{ °C}$).

Voor de evaluatie van dit proces mag worden verondersteld dat lucht zich gedraagt als een ideaal gas.

De volgende gegevens zijn beschikbaar voor de beantwoording van onderstaande vragen:

- tabel A-22 voor de eigenschappen van lucht
- universele gasconstante: $\bar{R} = 8,3143 \text{ kJ/kmol K}$
- molmassa van lucht: $M_{\text{lucht}} = 28,97 \text{ kg/kmol}$

Vragen:

- a) bepaal de hoeveelheid warmte die per kilogram lucht wordt afgegeven bij de afkoeling tot omgevingstemperatuur en ook de exergie van deze warmte
- b) om te voorkomen dat deze exergie geheel verloren gaat wordt 80 % van de warmte gebruikt voor de opwarming van water van 40 tot 80 °C (stel druk is 25 bar) voor ruimteverwarming; welk percentage van de door de luchtstroom afgegeven exergie wordt dan opgenomen door het water (voor eigenschappen water zie tabel A2 t/m A5)
- c) controleer met behulp van de “generalised compressibility charts” (Figure A-1, A-2, A3) of er terecht is aangenomen dat lucht mag worden beschouwd als ideaal gas; bepaal daartoe de compressibiliteitscoëfficiënt Z van lucht bij de toestand na afkoeling.

MEERKEUZEVRAGEN THERMODYNAMICA 2 (WB1224)**donderdag 27 januari 2005, 14.00 - 17.00 u.**

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

MK-1

Het triple punt van een willekeurige stof wordt gekenmerkt door het feit dat in dit punt:

1. De inwendige energie van de stof gelijk is aan nul

2. De verdampingswarmte van een stof gelijk is aan nul

3. Alle drie de fasen van een stof (vast, vloeibaar en gas) met elkaar in evenwicht zijn

4. Er geen onderscheid meer bestaat tussen de vloeibare en gasvormige fase

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

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

c) 2 en 3 zijn waar, 1 en 4 niet

d) 3 is waar, 1, 2 en 4 niet

MK-2

De volgende processen zijn als voorbeelden van een reversibel proces te beschouwen:

1. een slinger in een vacuüm ruimte

2. warmteoverdracht in een hoog-rendementsketel

3. scheiding van gassen via een wrijvingsloos membraan

4. compressie in een zuigermachine

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

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

c) 3 en 4 zijn waar, 1 en 2 niet

d) 2 is waar, 1, 3 en 4 niet

MK-3

Uitgaande van de tweede hoofdwet van de thermodynamica mogen de volgende uitspraken worden gedaan:

1) alle reversibele kringprocessen die gebruikmaken van dezelfde warmtereservoirs hebben hetzelfde rendement

2) het thermisch rendement van een irreversibel kringproces (voor de productie van arbeid) is altijd lager dan het rendement van een reversibel kringproces indien beide kringprocessen gebruik maken van dezelfde warmtereservoirs

3) alle reversibel werkende warmtepompen hebben dezelfde COP

4) de COP van een irreversibele warmtepomp is altijd lager dan de COP van een reversibele warmtepomp indien beide warmtepompen gebruik maken van dezelfde warmtereservoirs

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

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

c) 1, 2 en 4 zijn waar, 3 niet

d) 1, 2, 3 en 4 zijn waar

Een warmtepomp levert 40,4 kW warmte met een temperatuur van 303 K en onttrekt daarbij warmte aan de omgeving, die een temperatuur van 288 K heeft. De arbeid die aan de warmtepomp moet worden toegevoerd is vijf keer de hoeveelheid arbeid die een reversibele warmtepomp nodig zou hebben om bij dezelfde temperaturen dezelfde hoeveelheid warmte te genereren.

De hoeveelheid warmte, die de (irreversibele) warmtepomp aan de omgeving onttrekt, bedraagt:

a) 20,2 kW

b) 30,4 kW

c) 30,2 kW

d) 40,4 kW

MK-5

Het Carnot proces is opgebouwd uit een viertal processen die in een bepaalde volgorde worden doorlopen. Het Carnot proces bestaat uit:

1. Twee adiabatische processen

2. Twee isobare processen

3. Vier reversibele processen

4. Twee isentrope processen

a) 1, 2, 3 en 4 zijn waar

b) 3 is waar, 1, 2 en 4 niet

c) 1, 3 en 4 zijn waar, 2 niet

d) 1 en 2 zijn waar, 3 en 4 niet

MK-6

Als een stof mag worden beschouwd als een ideaal gas, dan geldt dat:

1. $p \cdot V = R \cdot T$

2. Het verschil tussen de soortelijke warmte bij constante druk en de soortelijke warmte bij constant volume gelijk is aan de gasconstante

3. De entropie alleen een functie is van de temperatuur

4. De soortelijke warmte bij constante druk alleen afhankelijk is van de temperatuur

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

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

c) 2 en 4 zijn waar, 1 en 3 niet

d) 1 is waar, 2, 3 en 4 niet

MK-7

Een adiabatisch proces is een proces waarbij

1. Alleen warmte wordt afgevoerd
2. De entropie altijd toeneemt
3. Geen warmte wordt uitgewisseld met de omgeving
4. De wrijving verwaarloosbaar klein is

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

MK-8

In het algemeen mag worden verondersteld dat de processen in compressoren adiabatisch verlopen. Het isentropisch rendement kan dan worden beschouwd als:

1. een maat voor de hoeveelheid warmte die aan het proces moet worden toegevoerd
2. een maat voor de entropietoename tijdens het proces
3. een maat voor de irreversibiliteit van het proces
4. de arbeid die wordt afgegeven in geval van isentrope compressie

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

MK-9

Voor de bepaling van de exergie van een hoeveelheid stof wordt gebruik gemaakt van een systeem dat aan een aantal eisen moet voldoen:

1. In het systeem wordt alleen gebruik gemaakt van reversibele processen
2. Het systeem wisselt geen warmte uit met de omgeving
3. Het systeem brengt de stof in evenwicht met de omgeving
4. Het systeem wordt stationair doorstroomd

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

MK-10

Het exergierendement van de processen die zich afspelen in een open stationair doorstroomd systeem

kan in het algemeen op een zinnvolle manier worden bepaald door:

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

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

MK-11

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

MK-12

Het gedrag van veel stoffen wijkt onder bepaalde omstandigheden af van het gedrag van ideaal gas. Voor het vastleggen van het afwijkende gedrag wordt doorgaans gebruik gemaakt van zogenaamde p, v, T -vergelijkingen. Dit wordt gedaan omdat:

1. Dit de enige grootheden zijn die van belang zijn
2. Deze grootheden relatief eenvoudig kunnen worden gemeten
3. Deze vergelijkingen altijd een eenvoudige vorm hebben

4. De overige grootheden die van belang zijn voor thermodynamische berekeningen hiermee kunnen worden berekend
- 2 en 4 zijn waar, 1 en 3 niet
 - 1, 2, 3 en 4 zijn waar
 - 2 en 3 zijn waar, 1 en 4 niet
 - 1, 2 en 4 zijn waar, 3 niet
2. de volume-uitzettingscoëfficiënt (β)
3. de inwendige energie
4. de isotherme compressibiliteitscoëfficiënt (β of β_T)
- 1 en 4 zijn waar, 2, en 3 niet
 - 1 en 3 zijn waar, 2 en 4 niet
 - 1, 2 en 4 zijn waar, 3 niet
 - 3 en 4 zijn waar, 1 en 2 niet

MK-13

Voor de beschrijving van het gedrag van stoffen wordt veel gebruik gemaakt van de toestand in het kritisch punt. Dit wordt gedaan omdat:

- De relatieve p, v, T -waarden voor een groot aantal stoffen sterke overeenkomst vertonen
- Voor een isotherm in het kritisch punt de eerste afgeleide van p naar v gelijk is aan nul
- Er in het kritisch punt geen problemen zijn met de fasenovergang
- Voor een isotherm in het kritisch punt de tweede afgeleide van p naar v gelijk is aan nul

- 1 is waar, 2, 3 en 4 niet
- 2 en 3 zijn waar, 1 en 4 niet
- 1 en 2 zijn waar, 3 en 4 niet
- 1, 2 en 4 zijn waar, 3 niet

MK-14

Voor de nauwkeurige beschrijving van water en stoom wordt gebruik gemaakt van speciaal voor deze stof vastgelegde vergelijkingen. Dit is gedaan omdat:

- Algemene vergelijkingen voor de beschrijving van niet-ideaal gas onvoldoende nauwkeurig zijn
- De constanten in de Redlich-Kwong vergelijking niet zijn te bepalen voor water en stoom
- Water en stoom zeer veel worden gebruikt in industriële toepassingen
- Het gedrag in het hele gebied voor praktische toepassingen met een enkele vergelijking kan worden beschreven

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

MK-15

Bij de bepaling van de thermodynamische eigenschappen van stoffen wordt gebruik gemaakt van een beperkt aantal te meten grootheden. Naast druk, temperatuur en volume wordt ook gebruik gemaakt van de volgende (direct of indirect) meetbare grootheden:

- de soortelijke warmte bij constante druk (c_p)

De juiste oplossingen voor de meerkeuze vragen zijn (tentamen 27 januari 2005):

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

UITWERKING TENTAMEN WB1224, 27 januari 2005

OPGAVE 1

Lucht wordt gecomprimeerd in een zuigercompressor met een compressieverhouding van 1:10. Aan de uitlaat van de compressor wordt een temperatuur gemeten van 607 °C.

De zuigercompressor zuigt lucht aan uit de omgeving met een druk van 1 atmosfeer (= 1,01325 bar) en een temperatuur van 22 °C. De hoeveelheid lucht die bij deze inlaatcondities kan worden gecomprimeerd bedraagt $\dot{\Phi}_{m,\text{lucht}} = 0,04875 \text{ kg/s}$.

Voor de evaluatie van dit proces mag worden verondersteld dat lucht zich gedraagt als een ideaal gas. De volgende gegevens zijn beschikbaar voor de beantwoording van onderstaande vragen:

- tabel A-22 voor de eigenschappen van lucht
- universele gasconstante: $\bar{R} = 8,3143 \text{ kJ/kmol K}$
- molmassa van lucht: $M_{\text{lucht}} = 28,97 \text{ kg/kmol}$

Vragen:

- a) bereken de luchttemperatuur (T_{2s}) en de druk (p_{2s}) aan de uitlaat van de compressor in geval van isentropische compressie.
- b) bepaal het isentropische rendement ($\eta_{s,\text{compr}}$) en het benodigde vermogen (P_{compr}) voor de aandrijving van de compressor
- c) bereken ook het exergieverlies van de compressor ($Ex_{\text{verl,compr}}$).

UITWERKING OPGAVE 1

- a) Bereken de luchttemperatuur (T_{2s}) en de druk (p_{2s}) aan de uitlaat van de compressor in geval van isentropische compressie.

Stel: toestand 1 = toestand aan inlaat van zuigercompressor
toestand 2 = toestand aan uitlaat van zuigercompressor

De opgegeven compressieverhouding is in feite een volumeverhouding. In geval van isentropische compressie geldt dat de werkelijke volumeverhouding gelijk is aan de verhouding in de relatieve

volumina, dus:
$$\frac{v_2}{v_1} = \frac{v_{\text{rel},2s}}{v_{\text{rel},1}} = \frac{1}{10}$$

Voor de condities aan de inlaat geldt (zie tabel A-22):

$$T_1 = 295 \text{ K} \quad \text{dus dan:} \quad v_{\text{rel},1} = 647,9 \quad \text{en} \quad p_{\text{rel},1} = 1,3068$$

Het relatieve soortelijk volume aan de uitlaat van de zuigercompressor wordt dan:

$$v_{\text{rel},2s} = \frac{1}{10} \times v_{\text{rel},1} = \frac{1}{10} \times 647,9 = 64,79$$

Uitgaande van het berekende relatieve soortelijke volume kan dan de temperatuur na isentropische compressie worden gevonden met gebruikmaking van tabel A-22 (via interpolatie):

$$T_{2s} = 719 \text{ K} \quad \left[= 720 - \frac{64,79 - 64,57}{67,07 - 64,57} \times 10 \right]$$

De druk aan de uitlaat van de compressor kan op soortgelijke wijze worden berekend:

$$\frac{p_{2s}}{p_1} = \frac{p_{\text{rel},2s}}{p_{\text{rel},1}} = \frac{p_{\text{rel}}(719 \text{ K})}{p_{\text{rel}}(295 \text{ K})}$$

$$\text{Uit tabel A-22 volgt:} \quad p_{\text{rel}}(719 \text{ K}) = 31,86 \quad \left[= \frac{9}{10} \times (32,02 - 30,38) + 30,38 \right]$$

$$\text{Dus: } p_{2s} = p_1 \times \frac{p_{\text{rel}}(719 \text{ K})}{p_{\text{rel}}(295 \text{ K})} = 1,01325 \times \frac{31,86}{1,3068} = 24,70 \text{ bar}$$

- b) Bepaal het isentropische rendement ($\eta_{s,\text{compr}}$) en het benodigde vermogen (P_{compr}) voor de aandrijving van de compressor

Voor het isentropisch rendement van een compressor geldt: $\eta_{s,\text{compr}} = \frac{h_{2s} - h_1}{h_2 - h_1}$

De temperatuur na isentropische compressie (T_{2s}) is reeds berekend, de enthalpie kan dan worden afgelezen uit tabel A-22: $h_{2s} = 733,74 \text{ kJ/kg}$ $\left[= \frac{719 - 710}{720 - 710} \times (734,82 - 724,04) + 724,04 \right]$

De temperaturen aan inlaat en uitlaat van de compressor zijn gegeven, dus:

met $T_1 = 295 \text{ K}$ volgt uit tabel A-22: $h_1 = 295,17 \text{ kJ/kg}$

met $T_2 = 880 \text{ K}$ volgt uit tabel A-22: $h_2 = 910,56 \text{ kJ/kg}$

Het isentropische rendement wordt dan: $\eta_{s,\text{compr}} = \frac{h_{2s} - h_1}{h_2 - h_1} = \frac{733,74 - 295,17}{910,56 - 295,17} = 0,7127$

Het vermogen voor de aandrijving van de compressor bedraagt:

$$P_{\text{compr}} = \Phi_{m,\text{lucht}} \times (h_2 - h_1) = 0,04875 \times (910,56 - 295,17) = 30,0 \text{ kW}$$

- c) Bereken ook het exergieverlies van de compressor ($Ex_{\text{verl,compr}}$).

Het exergieverlies van de compressor kan worden berekend door gebruik te maken van de vergelijking: $Ex_{\text{verl,compr}} = T_0 \cdot \sigma$

Voor de bepaling van σ is het nodig de entropie aan de inlaat en de uitlaat van de compressor te kennen. Aangezien de druk aan de inlaat gelijk is aan 1 atmosfeer geldt voor de entropie aan de inlaat:

$$s_1 = s_1^0 = 1,68515 \text{ kJ/kgK}$$

Met $T_2 = 880 \text{ K}$ geldt: $s_2^0 = 2,82344 \text{ kJ/kgK}$

De entropie aan de uitlaat is dan als volgt te berekenen: $s_2 = s_2^0 - R \cdot \ln \frac{p_2}{p_1}$

De gasconstante R_{lucht} is: $R_{\text{lucht}} = \frac{\bar{R}}{M_{\text{lucht}}} = \frac{8,3143}{28,97} = 0,2870 \text{ kJ/kgK}$

De druk aan de uitlaat van de compressor kan in geval van ideaal gas worden berekend door gebruik te maken van de vergelijking:

$$\frac{p_2 \cdot v_2}{R \cdot T_2} = \frac{p_{2s} \cdot v_{2s}}{R \cdot T_{2s}}$$

Aangezien: $v_2 = v_{2s}$ volgt voor p_2 : $p_2 = p_{2s} \cdot \frac{T_2}{T_{2s}} = 24,70 \times \frac{880}{719} = 30,23 \text{ bar}$

De entropie wordt dan: $s_2 = s_2^0 - R \cdot \ln \frac{p_2}{p_1} = 2,82344 - 0,2870 \times \ln \frac{30,23}{1,01325} = 1,8489 \text{ kJ/kgK}$

De entropieproductie is in geval van een adiabatisch proces gelijk aan de entropieverandering, dus:

$$Ex_{\text{verl,compr}} = T_0 \cdot \Phi_{m,\text{lucht}} \cdot (s_2 - s_1) = 295 \times 0,04875 \times (1,8489 - 1,68515) = 2,35 \text{ kW}$$

OPGAVE 2

Gecomprimeerde lucht ($\dot{\Phi}_{m,\text{lucht}} = 1,0 \text{ kg/s}$) met een druk van 30 bar en een temperatuur van 544 °C wordt bij gelijkblijvende druk afgekoeld tot omgevingstemperatuur ($T_0 = 22 \text{ °C}$).

Voor de evaluatie van dit proces mag worden verondersteld dat lucht zich gedraagt als een ideaal gas.

De volgende gegevens zijn beschikbaar voor de beantwoording van onderstaande vragen:

- tabel A-22 voor de eigenschappen van lucht
- universele gasconstante: $\bar{R} = 8,3143 \text{ kJ/kmol K}$
- molmassa van lucht: $M_{\text{lucht}} = 28,97 \text{ kg/kmol}$

Vragen:

- a) bepaal de hoeveelheid warmte die per kilogram lucht wordt afgegeven bij de afkoeling tot omgevingstemperatuur en ook de exergie van deze warmte
- b) om te voorkomen dat deze exergie geheel verloren gaat wordt 80 % van de warmte gebruikt voor de opwarming van water van 40 tot 80 °C (stel druk is 25 bar) voor ruimteverwarming; welk percentage van de door de luchtstroom afgegeven exergie wordt dan opgenomen door het water (voor eigenschappen water zie tabel A2 t/m A5)
- c) controleer met behulp van de “generalised compressibility charts” (Figure A-1, A-2, A3) of er terecht is aangenomen dat lucht mag worden beschouwd als ideaal gas; bepaal daartoe de compressibiliteitscoëfficiënt Z van lucht bij de toestand na afkoeling.

UITWERKING OPGAVE 2

- a) Bepaal de hoeveelheid warmte die per kilogram lucht wordt afgegeven bij de afkoeling tot omgevingstemperatuur en ook de exergie van deze warmte.

Stel: toestand 2 = toestand van lucht voor afkoeling

toestand 3 = toestand van lucht na afkoeling

De temperaturen voor en na afkoeling zijn gegeven, dus:

met $T_2 = 817 \text{ K}$ volgt uit tabel A-22: $h_2 = 840,68 \text{ kJ/kg}$

met $T_3 = 295 \text{ K}$ volgt uit tabel A-22: $h_3 = 295,17 \text{ kJ/kg}$

De afgegeven warmte bij afkoeling per kilogram lucht bedraagt:

$$Q_{\text{lucht}} = 1 \times (h_2 - h_3) = 840,68 - 295,17 = 545,51 \text{ kW}$$

Voor het bepalen van de exergie van deze warmte is het noodzakelijk ook de entropiewaarden te berekenen:

met $T_2 = 817 \text{ K}$ volgt uit tabel A-22: $s_2^0 = 2,74096 \text{ kJ/kgK}$

met $T_3 = 295 \text{ K}$ volgt uit tabel A-22: $s_3^0 = 1,68515 \text{ kJ/kgK}$

De gezochte entropiewaarden worden dan:

$$s_2 = s_2^0 - R \cdot \ln \frac{p_2}{p_0} = 2,74096 - 0,2870 \times \ln \frac{30}{1,01325} = 1,76860 \text{ kJ/kgK}$$

$$s_3 = s_3^0 - R \cdot \ln \frac{p_3}{p_0} = 1,68515 - 0,2870 \times \ln \frac{30}{1,01325} = 0,71278 \text{ kJ/kgK}$$

De exergie kan nu worden berekend door gebruik te maken van de thermodynamisch equivalenten

$$\text{temperatuur: } \bar{T}_{2-3} = \frac{h_2 - h_3}{s_2 - s_3} = \frac{840,68 - 295,17}{1,76860 - 0,71278} = 516,57 \text{ K}$$

De exergie van de warmte wordt dan:

$$Ex_{Q,\text{lucht}} = \left(1 - \frac{T_0}{\bar{T}_{2-3}} \right) \cdot Q_{\text{lucht}} = \left(1 - \frac{295}{517} \right) \times 545,51 = 234,24 \text{ kJ/kg}$$

- b) Om te voorkomen dat deze exergie geheel verloren gaat wordt 80 % van de warmte gebruikt voor de opwarming van water van 40 tot 80 °C (stel druk is 25 bar) voor ruimteverwarming; welk percentage van de door de luchtstroom afgegeven exergie wordt dan opgenomen door het water (voor eigenschappen water zie tabel A2 t/m A5)

De exergie die toegevoerd wordt aan het water tijdens opwarming van 40 tot 80 °C kan worden berekend door gebruik te maken van de volgende vergelijking:

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

De thermodynamisch equivalenten temperatuur van het water tijdens warmtetoevoer wordt dan:

$$\bar{T}_{\text{water}} = \frac{h_w(80^\circ\text{C}) - h_w(40^\circ\text{C})}{s_w(80^\circ\text{C}) - s_w(40^\circ\text{C})} = \frac{336,86 - 169,77}{1,0737 - 0,5715} = 332,72 \text{ K}$$

De warmte die door het water wordt opgenomen bedraagt:

$$Q_{\text{water}} = 0,8 \times Q_{\text{lucht}} = 0,8 \times 545,51 = 436,41 \text{ kW}$$

De exergie wordt dan: $Ex_{Q,\text{water}} = \left(1 - \frac{T_0}{\bar{T}_{\text{water}}}\right) \cdot Q_{\text{water}} = \left(1 - \frac{295,15}{332,72}\right) \times 436,41 = 49,28 \text{ kW}$

Dit is 21,04 % van de exergie die door de luchtstroom wordt afgegeven tijdens afkoeling.

- c) Controleer met behulp van de “generalised compressibility charts” (Figure A-1, A-2, A3) of er terecht is aangenomen dat lucht mag worden beschouwd als ideaal gas; bepaal daartoe de compressibiliteitscoëfficiënt Z van lucht bij de toestand na afkoeling.

Temperatuur en druk in het kritisch punt van lucht bedragen (zie tabel A-1):

$$T_c = 133 \text{ K}; \quad p_c = 37,7 \text{ bar}$$

De gereduceerde druk en temperatuur van lucht na afkoeling zijn dan:

$$T_R = \frac{T_3}{T_c} = \frac{295}{133} = 2,21 \quad \text{en} \quad p_R = \frac{p_3}{p_c} = \frac{30}{37,7} = 0,796$$

Uit figuur A-1 kan dan worden afgelezen dat: $Z \approx 1,0$

Een gas met een compressibiliteitscoëfficiënt van 1 is te beschouwen als een ideaal gas. Er is dus terecht aangenomen dat lucht mag worden beschouwd als ideaal gas.