

Opgave 1

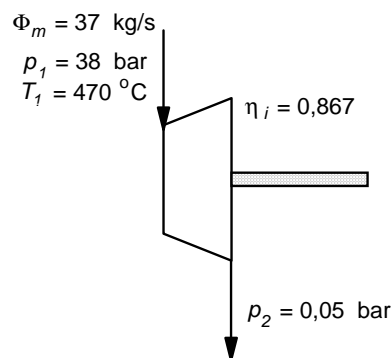
Stoom met een druk van 38 bar en een temperatuur van 470 °C wordt geëxpandeerd in een stoom-turbine tot een druk van 0,05 bar. De warmteuitwisseling van de turbine met de omgeving is verwaarloosbaar klein. De massastroom stoom door de turbine bedraagt 37 kg/s. De stoomturbine heeft een inwendig rendement van 0,867.

Bij de beantwoording van onderstaande vragen mogen de potentiële en kinetische energie van de in- en uitgaande stromen worden verwaarloosd; verder mag gebruik worden gemaakt van de volgende gegevens:

toestand	T [°C]	p [bar]	x [-]	h [kJ/kg]	s [kJ/kg K]
0 (omgeving)	12	0,014	1	2523,6	8,8536
1 (inlaat turbine)	470	38	1	3379,32	7,0272
2' (kokend water)	32,90	0,05	0	137,77	0,4763
2'' (verzadigde stoom)	32,90	0,05	1	2561,6	8,3960

Gevraagd:

- Bepaal de exergie van de stoom aan de inlaat van de turbine
- Bereken de enthalpie van de stoom na isentrope expansie; bereken daartoe eerst de stoomfractie
- Bereken de door de turbine afgegeven asarbeid per seconde en de stoomfractie aan de uitlaat van de turbine
- Bereken het exergieverlies in de turbine per seconde

Uitwerking opgave 1

- Bepaal de exergie van de stoom aan de inlaat van de turbine.
Voor de specifieke exergie aan de inlaat van de turbine geldt:

$$ex_1 = (h_1 - h_0) - T_0 \cdot (s_1 - s_0)$$

Met de opgegeven waarden volgt:

$$ex_1 = (3379,32 - 2523,6) - (273 + 12) \times (7,0272 - 8,8536) = 1376,24 \quad \text{kJ/kg}$$

De totale exergie aan de inlaat wordt dan:

$$Ex_1 = \Phi_m \cdot ex_1$$

$$Ex_1 = 37 \times 1376,24 = 50921 \quad \text{kW}$$

- Bereken de enthalpie na isentrope expansie; bereken daartoe eerst de stoomfractie.

De entropie van de stoom aan de uitlaat is na isentrope expansie dezelfde als aan de inlaat; deze entropie is kleiner dan de entropie van verzadigde stoom bij de uitlaatdruk, dus:

$$s_{2s} = x_{2s} \cdot s'' + (1 - x_{2s}) \cdot s'$$

hieruit volgt voor de stoomfractie x_{2s} :

$$x_{2s} = \frac{s_{2s} - s'}{s'' - s'} = \frac{7,0272 - 0,4763}{8,3960 - 0,4763} = 0,8272$$

met behulp van de stoomfractie kan dan de specifieke enthalpie worden bepaald:

$$h_{2s} = x_{2s} \cdot h'' + (1 - x_{2s}) \cdot h'$$

$$h_{2s} = 0,8272 \times 2561,6 + (1 - 0,8272) \times 137,77 = 2142,7 \quad \text{kJ/kg}$$

- c) Bereken de door de turbine afgegeven asarbeid per seconde en de stoomfractie aan de uitlaat van de turbine. Indien geen warmte wordt uitgewisseld met de omgeving en de potentiële en kinetische energie mogen worden verwaarloosd kan voor de energiebalans van de turbine worden geschreven:

$$P_{as} = \dot{\Phi}_m \cdot (h_1 - h_2)$$

Met: $h_1 - h_2 = \eta_i \cdot (h_1 - h_{2s})$

volgt dan: $P_{as} = \eta_i \cdot \dot{\Phi}_m \cdot (h_1 - h_{2s})$

$$P_{as} = 0,867 \times 37 \times (3379,3 - 2142,7) = 39669 \quad \text{kW}$$

Voor de specifieke enthalpie aan de uitlaat van de turbine geldt:

$$h_2 = h_1 - \eta_i \cdot (h_1 - h_{2s})$$

$$h_2 = 3379,3 - 0,867 \times (3379,3 - 2142,7) = 2307,2 \quad \text{kJ/kg}$$

voor de specifieke enthalpie van stoom in deze toestand geldt eveneens:

$$h_2 = x_2 \cdot h'' + (1 - x_2) \cdot h'$$

hieruit volgt voor de stoomfractie:

$$x_2 = \frac{h_2 - h'}{h'' - h'} = \frac{2307,2 - 137,77}{2561,6 - 137,77} = 0,8950$$

- d) Bereken het exergieverlies in de turbine per seconde.

Het exergieverlies in de turbine kan worden berekend met de volgende relatie:

$$Ex_{verlies} = \dot{\Phi}_m \cdot T_0 \cdot \sigma$$

hierin is F de entropietoename in de turbine.

De entropie aan de uitlaat van de turbine kan worden bepaald met behulp van de stoomfractie:

$$s_2 = x_2 \cdot s'' + (1 - x_2) \cdot s'$$

$$s_2 = 0,8950 \times 8,3960 + (1 - 0,8950) \times 0,4763 = 7,5647 \quad \text{kJ/kgK}$$

De entropietoename wordt dan:

$$\sigma = s_2 - s_1 = 7,5647 - 7,0272 = 0,5375 \quad \text{kJ/kgK}$$

Voor het exergieverlies volgt hieruit:

$$Ex_{verlies} = \dot{\Phi}_m \cdot T_0 \cdot \sigma = 37 \times (273 + 12) \times 0,5375 = 5668 \quad \text{kW}$$

Opgave 2

In een aardgasgestookte centrale wordt elektriciteit geproduceerd met behulp van een stoomkringloop. Deze stoomkringloop bestaat uit een stoomketel, een turbine, een condensor en een ketelvoedingspomp. In de stoomketel wordt een stoom opgewekt (toestand 1) met een druk van 40 bar en een temperatuur van 470 °C. De massastroom stoom bedraagt 99,36 kg/s. Deze stoom wordt in de regelklep van de turbine gesmoord tot 38 bar en vervolgens in de turbine geëxpandeerd tot een druk van 0,05 bar (toestand 2). De geëxpandeerde stoom wordt gecondenseerd in de condensor, waarna het condensaat door een pomp wordt teruggevoerd naar de ketel (toestand 4).

De turbine drijft een elektrische generator aan. Deze generator heeft een rendement van 0,97

De entropietoename over de regelklep bedraagt 0,0228 kJ/kg K.

De stoomturbine heeft een inwendig rendement van 0,84.

De smoring in de regelklep en de expansie in de turbine geschieden adiabatisch.

De ketel wordt gestookt met aardgas; het ketelrendement bedraagt 0,930. De stookwaarde van aardgas bedraagt 38 MJ/kg. De bijbehorende exergiefactor (f_{ex}) van de brandstof is 1,04.

Bij de beantwoording van onderstaande vragen mag gebruik worden gemaakt van de volgende gegevens:

toestand water/stoom	T [°C]	p [bar]	x [-]	h [kJ/kg]	s [kJ/kg K]
0 (omgeving)	12	0,014	1	2523,6	8,8536
4 (inlaat ketel)	33,4	47	0	144,06	0,4814
1 (uitlaat ketel)	470	40	1	3376,82	7,0010
2' (kokend water)	32,90	0,05	0	137,77	0,4763
2'' (verzadigde stoom)	32,90	0,05	1	2561,6	8,3960

Gevraagd:

- Bereken de entropie van de stoom aan de uitlaat van de turbine
- Bereken het elektrisch vermogen dat wordt afgegeven door de generator.
- Bereken het thermisch rendement van de centrale
- Bereken het exergieverlies ten gevolge van de smoring in de regelklep en ten gevolge van expansie in de turbine
- Bereken het exergieverlies in de ketel

Uitwerking opgave 2

- Bereken de entropie van de stoom aan de uitlaat van de turbine
Daartoe moet, in geval van een adiabatische turbine, eerst de toestand aan de uitlaat van de turbine worden bepaald na isentrope expansie. De werkelijk enthalpieverandering kan worden afgeleid uit de isentrope enthalpieverandering met behulp van het inwendig rendement van de turbine. Aan de hand van de werkelijke enthalpieverandering kan dan de entropie na werkelijke expansie worden bepaald.

De entropie aan de inlaat van de turbine (s_{1a}) is als volgt te bepalen:

$$s_{1a} = s_1 + \Delta s_{klep} = 7,0010 + 0,0228 = 7,0238 \text{ kJ/kg K}$$

In geval van isentrope expansie is de entropie aan de uitlaat van de turbine gelijk aan de entropie aan de inlaat. Om de enthalpie na isentrope expansie te kunnen bepalen moet eerst de stoomfractie worden bepaald:

$$x_{2s} = \frac{s_{2s} - s_{2'}}{s_{2''} - s_{2'}} = \frac{7,0238 - 0,4763}{8,3960 - 0,4763} = 0,8267$$

De enthalpie na isentrope expansie is dan als volgt te berekenen:

$$h_{2s} = h_{2'} + x_{2s} \cdot (h_{2''} - h_{2'})$$

$$h_{2s} = 137,77 + 0,8267 \times (2561,6 - 137,77) = 2141,6 \text{ kJ/kg}$$

Aangezien geldt: $\eta_i = \frac{h_1 - h_2}{h_1 - h_{2s}}$

In geval van een smoorproces zonder warmteuitwisseling, is de enthalpie voor en na smoring dezelfde, dus $h_{1a} = h_1 = 3376,82 \text{ kJ/kg}$.

Voor de enthalpie h_2 volgt hieruit:

$$h_2 = h_1 - \eta_i \cdot (h_1 - h_{2s}) = 3376,82 - 0,84 \times (3376,82 - 2141,6) = 2339,2 \text{ kJ/kg}$$

Met behulp van deze enthalpie kan vervolgens de stoomfractie na werkelijke expansie worden bepaald:

$$x_2 = \frac{h_2 - h_{2'}}{h_{2''} - h_{2'}} = \frac{2339,2 - 137,77}{2561,6 - 137,77} = 0,9082$$

En hiermee kan dan de entropie na werkelijke expansie worden berekend:

$$s_2 = s_{2'} + x_2 \cdot (s_{2''} - s_{2'}) = 0,4763 + 0,9082 \times (8,3960 - 0,4763) = 7,669 \text{ kJ/kgK}$$

- b) Bereken het elektrisch vermogen dat wordt afgegeven door de generator.

Het elektrisch vermogen dat afgegeven wordt door de generator volgt uit de energiebalans voor turbine en generator tezamen:

$$P_e = \eta_{gen} \cdot \Phi_m \cdot (h_1 - h_2)$$

Dus: $P_e = 0,97 \times 99,36 \times (3376,82 - 2339,2) = 100,0 \text{ MW}_e$

- c) Bereken het thermisch rendement van de centrale.

Het (bruto) thermisch rendement van de centrale geeft aan welk deel van de toegevoerde energie (warmte) in vorm van brandstof wordt omgezet in het verlangde product (elektriciteit). Daartoe moet de met de brandstof toegevoerde energie worden berekend. Uit de energiebalans voor de ketel volgt:

$$P_B = \frac{1}{\eta_k} \cdot \Phi_m \cdot (h_1 - h_4)$$

Dus: $P_B = \frac{1}{0,930} \times 99,36 \times (3376,82 - 144,06) = 345,38 \text{ MW}_{th}$

Het thermisch rendement wordt dan:

$$\eta_{th} = \frac{P_e}{P_B} = \frac{100,0}{345,38} = 0,290$$

- d) Bereken het exergieverlies ten gevolge van de smoring in de regelklep en ten gevolge van expansie in de turbine.

Voor het exergieverlies in een open stationair doorstroomd systeem geldt:

$$Ex_{verlies} = T_0 \cdot \sigma$$

In geval van een adiabatisch systeem geldt: $\sigma = \Phi_m \cdot \Delta s$

Zowel de smoorklep als de turbine zijn te beschouwen als een adiabatisch systeem.

Dus voor beide geldt: $Ex_{verlies} = T_0 \cdot \Phi_m \cdot \Delta s$

Exergieverlies klep:

$$Ex_{\text{verlies, klep}} = 285,15 \times 99,36 \times 0,0228 = 646 \text{ kW}$$

Voor de entropietoename in de turbine geldt:

$$\Delta s_{\text{turbine}} = s_2 - s_{1a} = 7,669 - 7,0238 = 0,645 \text{ kJ/kgK}$$

Exergieverlies turbine:

$$Ex_{\text{verlies, turbine}} = 285,15 \times 99,36 \times 0,645 = 18274 \text{ kW}$$

e) Bereken het exergieverlies in de ketel.

Het exergieverlies in de ketel is gelijk aan het verschil tussen de toegevoerde exergie (met de brandstof) en de afgevoerde exergie (met het water).

Voor de toegevoerde exergie geldt: $Ex_B = f_{ex} \cdot P_B = 1,04 \times 345,38 = 359,20 \text{ MW}$

Voor de afgevoerde exergie: $\Delta ex_{\text{water}} = (h_1 - h_4) - T_0 \cdot (s_1 - s_4)$

Dus: $\Delta ex_{\text{water}} = (3376,82 - 144,06) - 285,15 \times (7,0010 - 0,4814) = 1374 \text{ kJ/kg}$

Het exergieverlies in de ketel wordt dan:

$$Ex_{\text{verlies}} = Ex_B - \Phi_m \cdot \Delta ex_{\text{water}} = 359,20 - 99,36 \times 1374 \times 10^{-3} = 222,7 \text{ MW}$$

Opgave 3

In een aardgasgestookte ketel wordt stoom geproduceerd voor het aandrijven van een stoomturbine. In de stoomketel wordt een stoom opgewekt met een druk van 40 bar en een temperatuur van 470 °C (toestand 1). De stookwaarde van aardgas bedraagt 38,0 MJ/kg. De bijbehorende exergiefactor (f_{ex}) van de brandstof is 1,04; het ketelrendement bedraagt 0,930.

Deze stoomkringloop bestaat verder uit een turbine, een condensor en een ketelvoedingspomp. Als gevolg van verliezen in de leiding van de ketel naar de turbine bedragen de condities aan de inlaat van de turbine 38 bar en 450 °C (toestand 2). Na expansie in de turbine tot een druk van 0,05 bar (toestand 3) wordt de stoom gecondenseerd in de condensor, waarna het condensaat door een pomp wordt teruggevoerd naar de ketel (toestand 4).

De stoomturbine drijft een elektrische generator aan. Deze generator heeft een rendement van 0,97

De expansie in de turbine geschiedt adiabatisch; de turbine heeft een isentropisch rendement van 0,84.

Bij de beantwoording van onderstaande vragen mag gebruik worden gemaakt van de volgende gegevens:

toestand water/stoom	T [°C]	p [bar]	x [-]	h [kJ/kg]	s [kJ/kg K]
0 (omgeving)	12	0,014	1	2523,6	8,8536
1 (uitlaat ketel)	470	40	1	3376,8	7,0010
2 (inlaat turbine)	450	38	1	3099,7	6,6163
3' (kokend water)	32,90	0,05	0	137,77	0,4763
3'' (verzadigde stoom)	32,90	0,05	1	2561,6	8,3960
4 (inlaat ketel)	33,4	47	0	144,06	0,4814

Gevraagd:

- Bereken de exergie van de toegevoerde brandstof in de ketel.
- Bereken de exergie die door water/stoom opgenomen wordt in de ketel en bepaal tevens het exergieverlies in de ketel (per kilogram stoom).
- Bereken het warmteverlies en het exergieverlies in de stoomleiding van ketel naar turbine.
- Bereken de enthalpie van de stoom aan de uitlaat van de turbine.
- Bereken het afgegeven elektrisch vermogen aan de klemmen van de generator (per kilogram stoom).

Uitwerking opgave 3

- Bereken de exergie van de toegevoerde brandstof in de ketel per kilogram stoom.
De exergie van de toegevoerde brandstof is gelijk aan het brandstofvermogen vermenigvuldigd met de exergie-factor van de brandstof.
Er is voor de installatie geen vermogen opgegeven. Stel dat alle vermogens per kilogram opgewekte stoom in de ketel worden opgegeven. De massastroom brandstof per kilogram stoom kan als volgt worden bepaald:

$$P_B = \frac{1}{\eta_k} \cdot \Phi_{m, \text{stoom}} \cdot (h_1 - h_4) = \frac{1}{\eta_k} \cdot (h_1 - h_4)$$

$$\text{Dus: } P_B = \frac{1}{0,930} \times (3376,8 - 144,06) = 3476,1 \text{ kW}$$

De exergie van de toegevoerde brandstof per kilogram stoom wordt dan:

$$Ex_B = f_{ex} \cdot P_B = 1,04 \times 3232,7 = 3615,1 \text{ kW}$$

- b) Bereken de exergie die door water/stoom opgenomen wordt in de ketel en bepaal tevens het exergieverlies in de ketel (per kilogram stoom).

De exergie-toename in de ketel (per kilogram water/stoom) kan worden berekend met de volgende vergelijking:

$$\Delta ex_{water} = (h_1 - h_4) - T_0 \cdot (s_1 - s_4)$$

Met behulp van de opgegeven waarden volgt hieruit:

$$\Delta ex_{water} = (3376,8 - 144,06) - 285,15 \times (7,0010 - 0,4814) = 1373,6 \text{ kJ/kg}$$

Het exergieverlies in de ketel kan worden gedefinieerd als de exergie van de toegevoerde brandstof minus de exergie die opgenomen wordt door de stoom. Het exergieverlies per kilogram geproduceerde stoom in de ketel wordt dan:

$$Ex_{verlies, ketel} = Ex_B - \Delta ex_{water} = 3615,1 - 1373,6 = 2241,5 \text{ kJ per kg stoom}$$

- c) Bereken het warmteverlies en het exergieverlies in de stoomleiding van ketel naar turbine.

Voor de warmtebalans van een leiding kan worden geschreven:

$$Q = h_{uit} - h_{in} \quad \text{dus:} \quad Q_{leiding} = h_2 - h_1 = 3099 - 3376,8 = -277,1 \text{ kJ/kg stoom}$$

Hierin is Q de warmte die aan het systeem (de leiding) wordt toegevoerd. Het negatieve teken geeft aan dat door de leiding warmte wordt afgegeven aan de omgeving.

Het exergieverlies in de leiding is gelijk aan de exergie van de stoom die de leiding in gaat minus de exergie van de stoom die de leiding uit gaat, dus:

$$Ex_{verlies, leiding} = ex_1 - ex_2 = (h_1 - h_2) - T_0 \cdot (s_1 - s_2)$$

$$Ex_{verlies, leiding} = 277,1 - 285,15 \times (7,0010 - 6,6163) = 167,4 \text{ kJ/kg stoom}$$

- d) Bereken de enthalpie van de stoom aan de uitlaat van de turbine.

De enthalpie van stoom na werkelijke expansie kan worden berekend door de eerst de enthalpie van stoom na isentrope expansie te bepalen. Voor isentrope expansie geldt dat de entropie onveranderd blijft, dus:

$$s_{3s} = s_2 = 6,6163 \text{ kJ/kgK}$$

De enthalpie na isentrope expansie, h_{3s} , is dan te berekenen door eerst de stoomfractie in punt 3s te bepalen:

$$x_{3s} = \frac{s_{3s} - s_{3'}}{s_{3''} - s_{3'}} = \frac{6,6163 - 0,4763}{8,3960 - 0,4763} = 0,7753$$

De enthalpie kan dan als volgt worden bepaald:

$$h_{3s} = h_{3'} + x_{3s} \cdot (h_{3''} - h_{3'})$$

$$h_{3s} = 137,77 + 0,7753 \times (2561,6 - 137,77) = 2017,0 \text{ kJ/kg}$$

Aangezien voor het isentropisch rendement van de turbine geldt: $\eta_i = \frac{h_2 - h_3}{h_2 - h_{3s}}$

Volgt hieruit voor de enthalpie h_3 :

$$h_3 = h_2 - \eta_i \cdot (h_2 - h_{3s}) = 3099,7 - 0,84 \times (3099,7 - 2017,0) = 2190,2 \text{ kJ/kg}$$

- e) Bereken het afgegeven elektrisch vermogen aan de klemmen van de generator (per kilogram stoom).

Voor het vermogen aan de as van de turbine (per kilogram stoom) geldt:

$$P_{as} = (h_2 - h_3)$$

Het vermogen aan de klemmen van de generator is iets kleiner als gevolg van de verliezen in de generator:

$$P_{gen} = \eta_{gen} \cdot P_{as} = \eta_{gen} \cdot (h_2 - h_3)$$

Dus: $P_{gen} = 0,97 \times (3099,7 - 2190,2) = 882,2 \text{ kW}_e \text{ per kg stoom}$

Opgave 4

In een stoomketel wordt rookgas afgekoeld van 2100 °C tot 300 °C. De massastroom rookgas ($M_{m, rg}$) bedraagt 580 kg/s en de c_p -waarde 1,29 kJ/kg K. Deze soortelijke warmte mag over het afkoeltraject als een constante worden beschouwd.

De afgegeven warmte wordt opgenomen door een water/stoom kringproces. Daarbij moeten twee uitvoeringen onderling worden vergeleken:

- een stoomketel zonder herverhitter
- een stoomketel met herverhitter

In beide gevallen zijn de rookgasmassastroom en de condities van het rookgas dezelfde.

De stoomketel bestaat uit een economizer, een verdamper en een oververhitter. In de economizer wordt het voedingswater opgewarmd van intreetemperatuur (= 280 °C) tot kooktemperatuur, in de verdamper wordt de kokende vloeistof omgezet in verzadigde stoom en in de oververhitter wordt de verzadigde stoom opgewarmd tot de verlangde stoomtemperatuur (= 530 °C). Aangenomen wordt dat de stoomproductie geschiedt bij een constante druk van 180 bar.

Wordt gebruik gemaakt van een herverhitter, dan moet 80 % van de geproduceerde stoom worden herverhit (dus $M_{m, HEROVO} = 0,8 \cdot M_{m, voeding}$). In de herverhitter wordt stoom opgewarmd van 300 °C tot 530 °C bij een druk 34 bar. De omgevingstemperatuur bedraagt 12 °C.

N.B. De thermodynamische eigenschappen van water, nodig voor het uitvoeren van de berekeningen, zijn vermeld in onderstaande tabel:

toestand water/stoom	T [°C]	p [bar]	x [-]	h [kJ/kg]	s [kJ/kg K]
0 (omgeving)	12	0,014	1	2523,6	8,8536
1 (inlaat ketel)	280	180	0	1232,0	3,0319
2 (uitlaat oververhitter)	530	180	1	3359,0	6,3366
3 (inlaat herverhitter)	300	34	1	2982,2	6,4669
4 (uitlaat herverhitter)	530	34	1	3519,2	7,2581

Gevraagd

- Bereken de massastroom voedingswater die aan de ketel wordt toegevoerd indien geen herverhitter wordt toegepast en bereken de totaal opgenomen exergie door water/stoom.
- Bereken eveneens de massastroom voedingswater en de totaal opgenomen exergie door water/stoom in geval van de ketel met herverhitting
- Bereken de exergie van de warmte die door het rookgas wordt afgegeven in de ketel.
- Bereken het exergieverlies ten gevolge van de warmteoverdracht in de ketel voor beide situaties (met en zonder herverhitter).
- Bereken voor beide situaties (met en zonder herverhitter) de thermodynamisch gemiddelde temperatuur waarmee warmte wordt opgenomen door de stoomkringloop.

Uitwerking opgave 4

- Bereken de massastroom voedingswater die aan de ketel wordt toegevoerd indien geen herverhitter wordt toegepast en bereken de totaal opgenomen exergie door water/stoom.

De warmte die afgegeven wordt door het rookgas als gevolg van de afkoeling in de ketel bedraagt:

$$\Phi_{Q,rg} = \Phi_{m,rg} \cdot c_{p,rg} \cdot (T_{in} - T_{uit}) = 580 \times 1,29 \times (2100 - 300) = 1347 \cdot 10^3 \text{ kW}_{th}$$

De door het rookgas afgegeven warmte wordt volledig opgenomen door het water. Er geldt dus:

$$\Phi_{Q,rg} = \Phi_{Q,w}$$

Stel dat in de situatie zonder herverhitting de massastroom voedingswater wordt aangeduid met $\Phi_{m,w-a}$ dan geldt:

$$\Phi_{Q,rg} = \Phi_{m,w-a} \cdot (h_2 - h_1)$$

$$\text{Hieruit volgt voor de massastroom water: } \Phi_{m,w-a} = \frac{\Phi_{Q,rg}}{h_2 - h_1} = \frac{1347 \cdot 10^3}{3359,0 - 1232,0}$$

$$\text{Ofwel: } \boxed{\Phi_{m,w-a} = 633,2 \text{ kg/s}}$$

De totaal opgenomen exergie door het water is gelijk aan de exergietoename van het water in de ketel, dus:

$$Ex_{w-a} = \Phi_{m,w-a} \cdot \Delta ex_{w-a}$$

$$\text{met: } ex_{w-a} = (h_2 - h_1) - T_0 \cdot (s_2 - s_1)$$

$$\text{Dus: } Ex_{w-a} = 633,2 \times [(3359,0 - 1232,0) - 285,15 \times (6,3366 - 3,0319)]$$

$$\boxed{Ex_{w-a} = 750,1 \times 10^3 \text{ kW}}$$

- b) Bereken eveneens de massastroom voedingswater en de totaal opgenomen exergie door water/stoom in geval van de ketel met herverhitting

In geval van herverhitting verandert de afgegeven warmte door het rookgas niet. Doordat deze warmte nu moet worden verdeeld over de stoomgenerator (economizer, verdamper en oververhitter) en de herverhitter zal de massastroom voedingswater (= $\Phi_{m,w-b}$) kleiner zijn. Gegeven is dat de massastroom water door de herverhitter 80 % bedraagt van de massastroom voedingswater, dan:

$$\Phi_{Q,rg} = \Phi_{m,w-b} \cdot (h_2 - h_1) + 0,8 \cdot \Phi_{m,w-b} \cdot (h_4 - h_3)$$

$$\text{Dus: } \Phi_{m,w-b} = \frac{\Phi_{Q,rg}}{(h_2 - h_1) + 0,8 \cdot (h_4 - h_3)} = \frac{1347 \cdot 10^3}{(3359,0 - 1232,0) + 0,8 \times (3519,2 - 2982,2)}$$

$$\boxed{\Phi_{m,w-b} = 526,9 \text{ kg/s}}$$

De totaal door het water opgenomen exergie is gelijk aan de som van de opgenomen exergie in de stoomgenerator en de herverhitter. Hiervoor geldt:

$$Ex_{w-b} = \Phi_{m,w-b} \cdot \Delta ex_{w-b1} + 0,8 \cdot \Phi_{m,w-b} \cdot \Delta ex_{w-b2}$$

in deze vergelijking zijn Δex_{w-b1} en Δex_{w-b2} de verandering van de specifieke exergie in de stoomgenerator en de herverhitter,

$$\text{dus: } ex_{w-b1} = (h_2 - h_1) - T_0 \cdot (s_2 - s_1) = ex_{w-a} = 1184,7 \text{ kJ/kg}$$

$$\text{en: } ex_{w-b2} = (h_4 - h_3) - T_0 \cdot (s_4 - s_3)$$

$$ex_{w-b2} = (3519,2 - 2982,2) - 285,15 \times (7,2581 - 6,4669) = 311,4 \text{ kJ/kg}$$

Voor de totaal opgenomen exergie geldt dan:

$$\boxed{Ex_{w-b} = 526,9 \times (1184,7 + 0,8 \times 311,4) = 755,5 \cdot 10^3 \text{ kW}}$$

- c) Bereken de exergie van de warmte die door het rookgas wordt afgegeven in de ketel.

De exergie van de afgegeven warmte kan worden berekend door eerst de thermodynamisch gemiddelde

temperatuur tijdens de afkoeling van het rookgas te bepalen: $\bar{T}_{rg} = \frac{T_{rg,in} - T_{rg,uit}}{\ln\left(\frac{T_{rg,in}}{T_{rg,uit}}\right)} = \frac{2100 - 300}{\ln\left(\frac{2100 + 273,15}{300 + 273,15}\right)} = 1266,9$

De exergie van de warmte kan dan als volgt worden berekend:

$$Ex_{Q,rg} = \left(1 - \frac{T_0}{\bar{T}_{rg}}\right) \cdot \Phi_{Q,rg} = \left(1 - \frac{285,15}{1266,9}\right) \times 1347 \cdot 10^3$$

Dus: $Ex_{Q,rg} = 1043,8 \cdot 10^3 \text{ kW}$

Alternatieve methode: $Ex_{Q,rg} = \int_{in}^{uit} \left(1 - \frac{T_0}{T_{rg}}\right) \cdot dQ = \int_{in}^{uit} \left(1 - \frac{T_0}{T_{rg}}\right) \cdot c_{p,rg} \cdot \Phi_{m,rg} \cdot dT$

Hieruit volgt, met $c_{p,rg}$ en $\Phi_{m,rg}$ constant:

$$Ex_{Q,rg} = c_{p,rg} \cdot \Phi_{m,rg} \cdot \int_{in}^{uit} \left(1 - \frac{T_0}{T_{rg}}\right) \cdot dT = c_{p,rg} \cdot \Phi_{m,rg} \cdot \left[(T_{rg,uit} - T_{rg,in}) - T_0 \cdot \ln \frac{T_{rg,uit}}{T_{rg,in}} \right]$$

$$Ex_{Q,rg} = 1,29 \times 580 \times \left[(2100 - 300) - 285,15 \times \ln \frac{2100 + 273,15}{300 + 273,15} \right] = 1053,8 \cdot 10^3 \text{ kW}$$

- d) Bereken het exergieverlies ten gevolge van de warmteoverdracht in de ketel voor beide situaties (met en zonder herverhitter).

Het exergieverlies ten gevolge van de warmteoverdracht is gelijk aan de exergie die door het rookgas wordt afgegeven (in de vorm van warmte) verminderd met de exergie die door het water wordt opgenomen. Dus in de situatie zonder herverhitting:

$$Ex_{verlies-a} = Ex_{Q,rg} - Ex_{w-a} = 1043,8 \times 10^3 - 750,1 \times 10^3$$

$$Ex_{verlies-a} = 293,7 \times 10^3 \text{ kW}$$

In de situatie met herverhitting:

$$Ex_{verlies-b} = Ex_{Q,rg} - Ex_{w-b} = 1043,8 \times 10^3 - 755,5 \times 10^3$$

$$Ex_{verlies-a} = 288,3 \times 10^3 \text{ kW}$$

- e) Bereken voor beide situaties (met en zonder herverhitter) de thermodynamisch gemiddelde temperatuur waarmee warmte wordt opgenomen door de stoomkringloop.

De thermodynamisch gemiddelde temperatuur bij warmtetoevoer kan worden berekend door de toename van de enthalpie te delen door de toename van de entropie.

Voor de situatie zonder herverhitting geldt dan:

$$\bar{T}_{w-a} = \frac{h_2 - h_1}{s_2 - s_1} = \frac{3359,0 - 1232,0}{6,3366 - 3,0319} = 643,6 \text{ K}$$

Alternatieve methode:

$$\Delta Ex_{w-a} = \left(1 - \frac{T_1}{\bar{T}_{w-a}}\right) \cdot \Phi_{Q,rg}$$

Hieruit volgt voor de thermodynamisch gemiddelde temperatuur:

$$\bar{T}_{w-a} = \frac{T_0}{1 - \frac{\Delta E x_{w-a}}{\Phi_{Q,rg}}} = \frac{285,15}{1 - \frac{750,1}{1347}} = 643,5 \text{ K}$$

Voor de situatie met herverhitting kan eveneens op deze manier de thermodynamisch gemiddelde temperatuur van warmtetoevoer aan het water worden bepaald:

$$\bar{T}_{w-b} = \frac{T_0}{1 - \frac{\Delta E x_{w-b}}{\Phi_{Q,rg}}} = \frac{285,15}{1 - \frac{755,5}{1347}} = 649,4 \text{ K}$$

Opgave 5

In een stoomketel wordt per seconde 560 kg stoom geproduceerd. De stoom aan de uitlaat van de ketel heeft een druk van 180 bar en een temperatuur van 530 °C. Voedingswater wordt aan de ketel toegevoerd met een temperatuur van 280 °C. Ten gevolge van wrijving in de ketel is de druk aan de inlaat 60 bar hoger dan aan de uitlaat.

Warmte voor de stoomproductie wordt geleverd door een rookgasstroom die in de ketel wordt afgekoeld van 2060 °C tot 310 °C. De soortelijke warmte (c_p -waarde) van het rookgas bedraagt 1,29 kJ/kg K en mag over het gehele afkoeltraject als constant worden beschouwd.

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

De omgevingstemperatuur bedraagt 12 °C.

N.B. De thermodynamische eigenschappen van water, nodig voor het uitvoeren van de berekeningen, zijn vermeld in onderstaande tabel:

toestand water/stoom	T [°C]	p [bar]	x [-]	h [kJ/kg]	s [kJ/kg K]
0 (omgeving)	12	0,014	1	2523,6	8,8536
1 (inlaat ketel)	280	240	0	1230,5	3,0153
	530	240	1	3284,5	6,1311
	280	180	0	1232,0	3,0319
2 (uitlaat oververhitter)	530	180	1	3359,0	6,3366

Gevraagd

- Bereken de massastroom rookgas die nodig is voor de productie van de verlangde hoeveelheid stoom.
- Bereken de exergie die per seconde wordt opgenomen door water/stoom bij opwarming in de ketel.
- Bereken de exergie van de warmte die per seconde door het rookgas wordt afgegeven in de ketel.
- Bereken het exergieverlies als gevolg van de warmteoverdracht in de ketel en bepaal het exergierendement van het warmteoverdrachtsproces.

Uitwerking opgave 5

- Bereken de massastroom rookgas die nodig is voor de productie van de verlangde hoeveelheid stoom. De massastroom rookgas kan worden berekend door gebruik te maken van de energiebalans van de gehele stoomketel. Over warmteverliezen is niets gegeven; verondersteld mag worden dat deze verwaarloosbaar zijn. Voor de energiebalans geldt dan:

$$\Delta H = 0$$

Ofwel:

$$(H_{w,uit} - H_{w,in}) + (H_{rg,uit} - H_{rg,in}) = 0$$

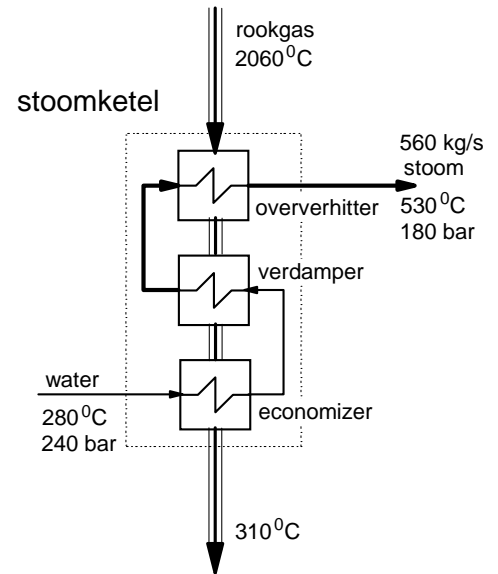
Van water zijn de specifieke enthalpiewaarden en massastroom gegeven, van het rookgas de temperaturen en de soortelijke warmte. De energiebalans kan dan in de volgende vorm worden geschreven:

$$\dot{\Phi}_{m,w} \cdot (h_{w,uit} - h_{w,in}) = \dot{\Phi}_{m,rg} \cdot c_{p,rg} \cdot (T_{rg,in} - T_{rg,uit})$$

De massastroom rookgas kan dan als volgt worden bepaald:

$$\Phi_{m,rg} = \frac{\Phi_{m,w} \cdot (h_{w,uit} - h_{w,in})}{c_{p,rg} \cdot (T_{rg,in} - T_{rg,uit})}$$

$$\Phi_{m,rg} = \frac{560 \times (3359,0 - 1230,5)}{1,29 \times (2060 - 310)} = 528 \text{ kg/s}$$



- b) Bereken de exergie die per seconde wordt opgenomen door water/stoom bij opwarming in de ketel.
De exergie die door het water wordt opgenomen tijdens de opwarming in de ketel is gelijk aan het verschil in exergie tussen de toestand aan de uitlaat en de toestand aan de inlaat:

$$\Delta Ex_w = Ex_{w,uit} - Ex_{w,in} = \Phi_{m,w} \cdot (ex_{w,uit} - ex_{w,in})$$

Met: $ex_{w,uit} - ex_{w,in} = (h_{w,uit} - h_{w,in}) - T_0 \cdot (s_{w,uit} - s_{w,in})$

$$ex_{w,uit} - ex_{w,in} = (3359,0 - 1230,5) - 285,15 \times (6,3366 - 3,0153) = 1181,4 \text{ kJ/kg}$$

Voor de totale exergieverandering geldt dan:

$$\Delta Ex_w = 560 \times 1181,4 = 661,6 \times 10^3 \text{ kW}$$

- c) Bereken de exergie van de warmte die per seconde door het rookgas wordt afgegeven in de ketel.
Voor de exergie van de afgegeven warmte door het rookgas kan worden geschreven:

$$Ex_{Q,rg} = \int_{in}^{uit} \left(1 - \frac{T_0}{T_{rg}}\right) \cdot dQ = \int_{in}^{uit} \left(1 - \frac{T_0}{T_{rg}}\right) \cdot c_{p,rg} \cdot \Phi_{m,rg} \cdot dT$$

Hieruit volgt, met $c_{p,rg}$ en $\Phi_{m,rg}$ constant:

$$Ex_{Q,rg} = c_{p,rg} \cdot \Phi_{m,rg} \cdot \int_{in}^{uit} \left(1 - \frac{T_0}{T_{rg}}\right) \cdot dT = c_{p,rg} \cdot \Phi_{m,rg} \cdot \left[(T_{rg,uit} - T_{rg,in}) - T_0 \cdot \ln \frac{T_{rg,uit}}{T_{rg,in}} \right]$$

$$Ex_{Q,rg} = 1,29 \times 528 \times \left[(2060 - 310) - 285,15 \times \ln \frac{2060 + 273,15}{310 + 273,15} \right] = 922,7 \cdot 10^3 \text{ kW}$$

- d) Bereken het exergieverlies als gevolg van de warmteoverdracht in de ketel en bepaal het exergie rendement van het warmteoverdrachtsproces.

Het exergieverlies als gevolg van de warmteoverdracht in de ketel is gelijk aan het verschil tussen de door het rookgas afgegeven exergie en de door het water opgenomen exergie, dus:

$$Ex_{verlies} = \Delta Ex_{Q,rg} - \Delta Ex_w = 922,7 \times 10^3 - 661,6 \times 10^3 = 261,1 \times 10^3 \text{ kW}$$

Het exergie rendement van het warmteoverdrachtsproces is gelijk aan de verhouding tussen exergie die opgenomen wordt door het water (= het product) en de exergie die afgegeven wordt door het rookgas (= de bron):

$$\eta_{ex,wo} = \frac{\Delta Ex_w}{\Delta Ex_{Q,rg}} = \frac{661,6 \times 10^3}{922,7 \times 10^3} = 0,717$$

Opgave 6

Een motor geeft aan de as een vermogen af van 3494 kW in ontwerptoestand. In deze toestand krijgt de motor een hoeveelheid brandstof toegevoerd van 0,260 kg/s; de stookwaarde van deze brandstof bedraagt 32,0 MJ/kg, de exergie 33,28 MJ/kg.

Warmte wordt afgevoerd via het koelwater (2008 kJ/s) en de oliekoeler (164,0 kJ/s). Het koelwater wordt in een externe koeler gekoeld van 80 °C tot 60 °C.

Ook wordt warmte afgegeven aan de omgeving door straling en convectie. Deze hoeveelheid bedraagt 2 % van de energie die met de brandstof wordt toegevoerd.

Verder wordt een hoeveelheid warmte afgevoerd met de rookgassen. De rookgassen verlaten de motor met een temperatuur van 438 °C en worden via de schoorsteen afgevoerd naar de omgeving. De soortelijke warmte (c_p) van het rookgas bedraagt 1,16 kJ/kg K; deze mag constant worden verondersteld bij afkoeling tot omgevingstemperatuur.

De omgevingstemperatuur bedraagt 15 °C.

Bij de beantwoording van de onderstaande vragen kunnen de volgende gegevens worden gebruikt:

toestand	T [°C]	p [bar]	h [kJ/kg]	s [kJ/kg K]
1. koud koelwater	60	1,0	251,2	0,8309
2. warm koelwater	80	1,0	335,0	1,0752

Vragen

- Beschouw de motor als een thermodynamisch systeem en stel daarvoor de energiebalans op. Bereken hiermee de warmte die wordt afgevoerd met de rookgassen.
- Geef een relatie voor de berekening van de exergie van de afgevoerde warmte in het rookgas en bereken deze exergie.
- Geef eveneens een relatie voor de berekening van de exergieverandering van het koelwater in de externe koeler en bereken de afgegeven exergie.
- Geef een definitie voor het functioneel exergierendement van de motor en bereken dit rendement. Geef ook aan wat het exergierendement wordt als 50 % van de met rookgas en koelwater afgevoerde exergie nuttig kan worden gebruikt.

Uitwerking opgave 6

- Beschouw de motor als een thermodynamisch systeem en stel daarvoor de energiebalans op. Bereken hiermee de warmte die wordt afgevoerd met de rookgassen.

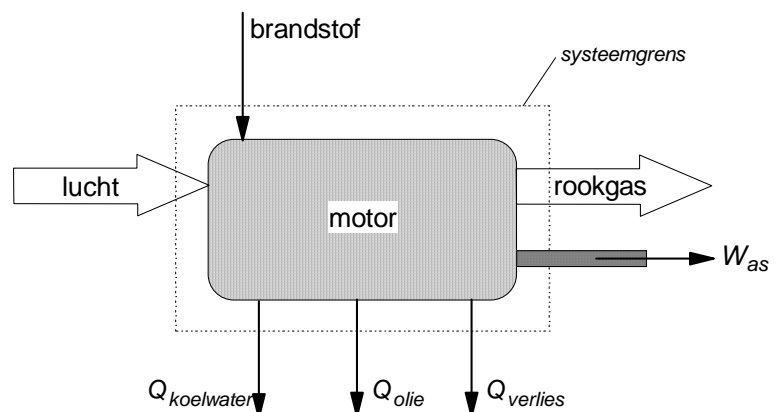
De motor als thermodynamisch systeem kan worden weergegeven als in nevenstaande figuur.

Van de brandstof is de stookwaarde en exergie gegeven. De stookwaarde is gelijk aan de warmte die na verbranding van de brandstof kan worden afgegeven.

Voor de energiebalans van demotor kan dan worden geschreven:

$$P_B = P_{as} + Q_{kw} + Q_{olie} + Q_{rg} + Q_{verlies}$$

Voor de afgevoerde warmte met de rookgassen volgt uit deze vergelijking:



$$Q_{rg} = P_B - P_{as} - Q_{kw} - Q_{olie} - Q_{verlies}$$

Met: $P_B = \Phi_{m,B} \cdot S_B = 0,260 \times 32,0 \cdot 10^3 = 8320 \text{ kW}$

en $Q_{verlies} = 0,02 \times P_B = 0,02 \times 8320 = 166 \text{ kW}$

wordt de warmte die afgevoerd wordt met het rookgas:

$$Q_{rg} = 8320 - 3494 - 2008 - 164 - 166 = 2488 \text{ kW}$$

- b) Geef een relatie voor de berekening van de exergie van de afgevoerde warmte in het rookgas en bereken deze exergie.

De exergie van een infinitesimale hoeveelheid warmte kan worden berekend met de volgende relatie:

$$dEx_Q = \left(1 - \frac{T_0}{T}\right) \cdot dQ$$

De warmte die afgevoerd wordt met het rookgas komt beschikbaar door het rookgas af te koelen tot omgevingstemperatuur. Er is dus sprake van een veranderende temperatuur tijdens de afgifte van deze warmte. De totale hoeveelheid exergie wordt dan:

$$Ex_Q = \int_{T_0}^{T_{rg}} \left(1 - \frac{T_0}{T}\right) \cdot dQ = \int_{T_0}^{T_{rg}} \left(1 - \frac{T_0}{T}\right) \cdot c_{p,rg} \cdot \Phi_{m,rg} \cdot dT$$

Hieruit volgt, met $c_{p,rg}$ en $\Phi_{m,rg}$ constant:

$$Ex_{Q,rg} = c_{p,rg} \cdot \Phi_{m,rg} \cdot \int_{T_0}^{T_{rg}} \left(1 - \frac{T_0}{T}\right) \cdot dT = c_{p,rg} \cdot \Phi_{m,rg} \cdot \left[(T_{rg} - T_0) - T_0 \cdot \ln \frac{T_{rg}}{T_0} \right]$$

Met: $Q_{rg} = c_{p,rg} \cdot \Phi_{m,rg} \cdot (T_{rg} - T_0)$ kan hiervoor worden geschreven:

$$Ex_{Q,rg} = c_{p,rg} \cdot \Phi_{m,rg} \cdot (T_{rg} - T_0) \cdot \left[1 - T_0 \cdot \frac{\ln \frac{T_{rg}}{T_0}}{(T_{rg} - T_0)} \right] = Q_{rg} \cdot \left[1 - T_0 \cdot \frac{\ln \frac{T_{rg}}{T_0}}{(T_{rg} - T_0)} \right]$$

De exergie van de afgevoerde warmte bedraagt dus:

$$Ex_{Q,rg} = 2488 \times \left[1 - 288,15 \times \frac{\ln \frac{711,15}{288,15}}{(711,15 - 288,15)} \right] = 957 \text{ kW}$$

- c) Geef eveneens een relatie voor de berekening van de exergieverandering van het koelwater in de externe koeler en bereken de afgegeven exergie.

De exergieverandering van het koelwater kan worden bepaald door de exergie aan in- en uitlaat van de koeler te berekenen en het verschil tussen beide te bepalen:

$$\Delta ex_{kw} = ex_{kw,in} - ex_{kw,uit} = (h_{kw,in} - h_{kw,uit}) - T_0 \cdot (s_{kw,in} - s_{kw,uit})$$

De exergieverandering worden berekend door gebruik te maken van de gegevens in de tabel:

$$\Delta ex_{kw} = (335,0 - 251,2) - 288,15 \times (1,0752 - 0,8309) = 13,4 \text{ kW}$$

De afgegeven exergie kan worden bepaald door deze exergieverandering te vermenigvuldigen met de massastroom koelwater. Aangezien:

$$Q_{rg} = \Phi_{m,kw} \cdot (h_{kw,in} - h_{kw,uit})$$

is deze massastroom als volgt te berekenen:

$$\Phi_{m,kw} = \frac{Q_{kw}}{h_{kw,in} - h_{kw,uit}} = \frac{2008}{335,0 - 251,2} = 23,96 \text{ kg/s}$$

De exergie die door het koelwater in de externe koeler wordt afgegeven wordt dan:

$$\Delta Ex_{kw} = \Phi_{m,kw} \cdot \Delta ex_{kw} = 23,96 \times 13,4 = 321 \text{ kW}$$

Alternatieve methode:

De c_p van water verandert op het temperatuurtraject van 60 tot 80 °C slechts weinig. In geval van constante c_p kan de thermodynamisch gemiddelde temperatuur van warmteafgifte worden berekend met de volgende vergelijking:

$$\bar{T}_{kw} = \frac{(T_{kw,in} - T_{kw,uit})}{\ln \frac{T_{kw,in}}{T_{kw,uit}}} = \frac{353,15 - 333,15}{\ln \frac{353,15}{333,15}} = 343,05 \text{ K}$$

De exergie van de afgegeven warmte kan dan als volgt worden berekend:

$$\Delta Ex_{kw} = \left(1 - \frac{T_0}{\bar{T}_{kw}}\right) \cdot Q_{kw} = \left(1 - \frac{288,15}{343,05}\right) \times 2008 = 321 \text{ kW}$$

d)

Geef een definitie voor het functioneel exgerierendement van de motor en bereken dit rendement. Geef ook aan wat het exgerierendement wordt als 50 % van de met rookgas en koelwater afgevoerde exergie nuttig kan worden gebruikt.

In het algemeen wordt het functioneel exgerierendement gedefinieerd als:

$$\eta_{ex,f} = \frac{Ex_{product}}{Ex_{bron}}$$

Wordt alleen asarbeid geleverd door het systeem dan kan hiervoor worden geschreven:

$$\eta_{ex,f} = \frac{P_{as}}{Ex_{brandstof}} = \frac{P_{as}}{\Phi_{m,B} \cdot ex_{brandstof}} = \frac{3494}{0,26 \times 33,28 \cdot 10^3} = 0,4038$$

Wordt eveneens behalve asarbeid ook warmte geleverd, waarbij 50 % van de met rookgas en koelwater afgevoerde exergie wordt benut, dan kan voor het functioneel exgerierendement worden geschreven:

$$\eta_{ex,f} = \frac{P_{as} + 0,5 \times (Ex_{Q,rg} + \Delta Ex_{kw})}{\Phi_{m,B} \cdot ex_{brandstof}} = \frac{3494 + 0,5 \times (957 + 321)}{0,26 \times 33,28 \cdot 10^3} = 0,4776$$