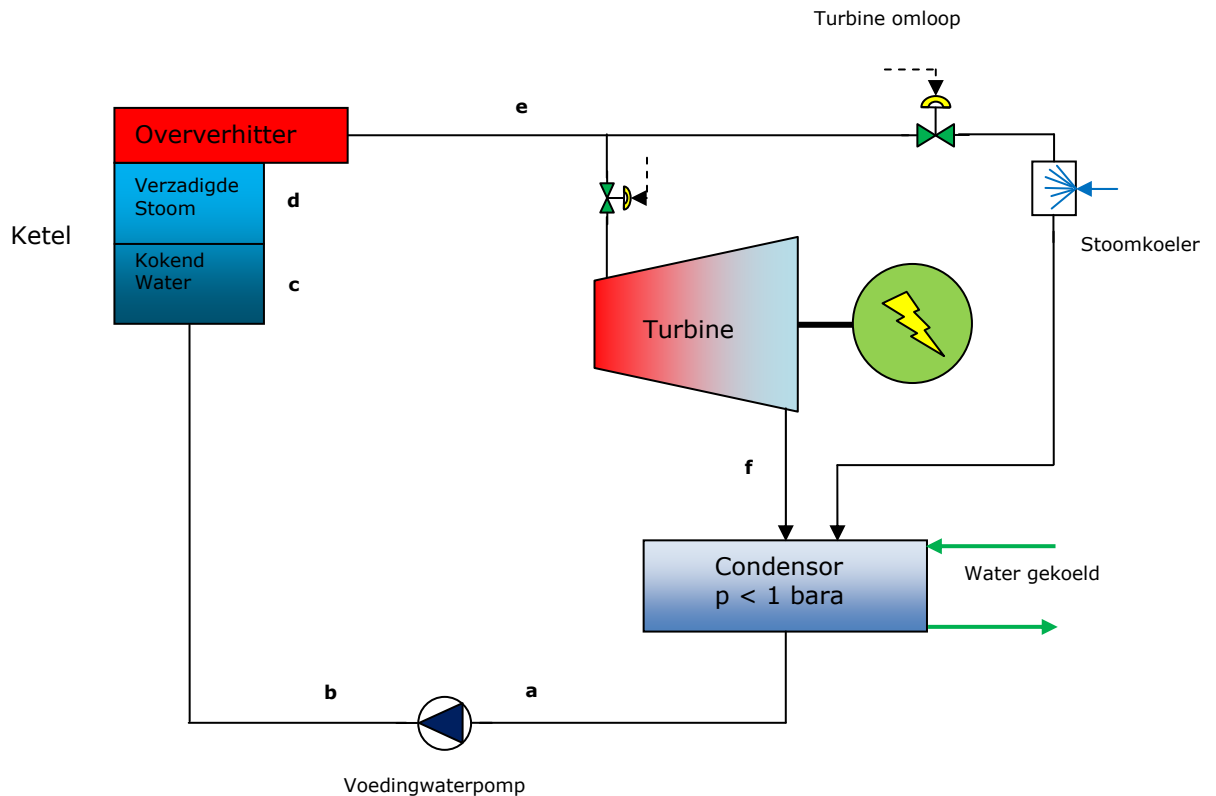


12.0 Het rendement

Als we een installatie gaan bouwen die elektriciteit levert, dan is het uitgangspunt altijd zo min mogelijk brandstof verstoken en daarbij zoveel mogelijk elektriciteit leveren. Zodra we dat voor elkaar hebben zeggen we, het rendement van de installatie is hoog. Maar wat verstaan we nu eigenlijk onder het rendement. We nemen een zeer eenvoudige installatie zoals weergegeven op afbeelding 1.



Afbeelding 1. Condensatie turbine installatie zonder voorwarmer.

Waarin:

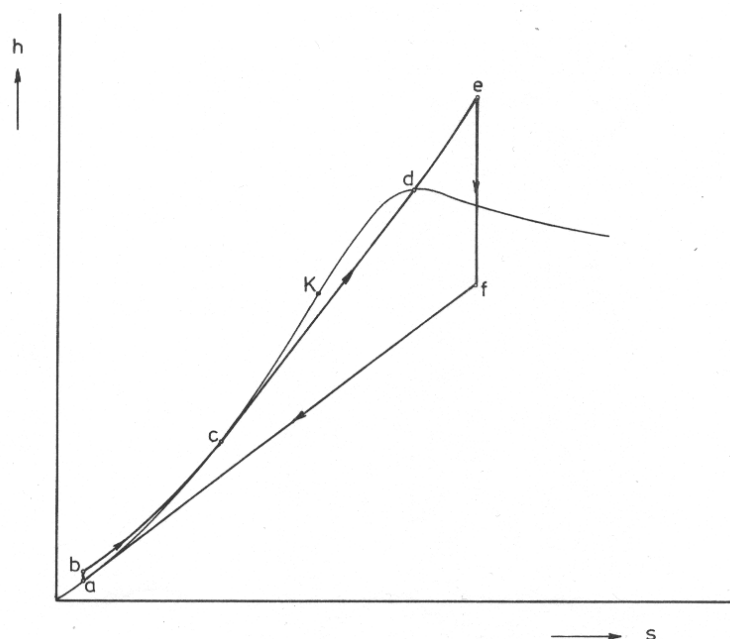
- a : Kokend water uit de condensor, op condensordruk
- b : Voedingwater op keteldruk.
- c : Kokend water in de ketel.
- d : Verzadigde stoom in de keteldrum.
- e : Oververhitte stoom
- f : Natte stoom na de turbine

- a → b : Drukverhoging door de voedingwaterpomp van condensordruk naar keteldruk.
- b → c : Warmtetoevoer in de ketel, het voedingwater wordt op kooktemperatuur gebracht. De druk blijft constant.
- c → d : Warmtetoevoer in de ketel, het kokende water wordt verdampt tot verzadigde stoom. De druk blijft constant.
- d → e : Warmtetoevoer in de ketel, verzadigde stoom wordt in de oververhitter omgezet in oververhitte stoom. De druk blijft constant.
- e → f : Expansie in de turbine, er wordt arbeid geleverd.
- f → a : De natte stoom uit de turbine wordt in de condensor verdicht tot water op kooktemperatuur. Hier wordt warmte afgevoerd door het koelwater.

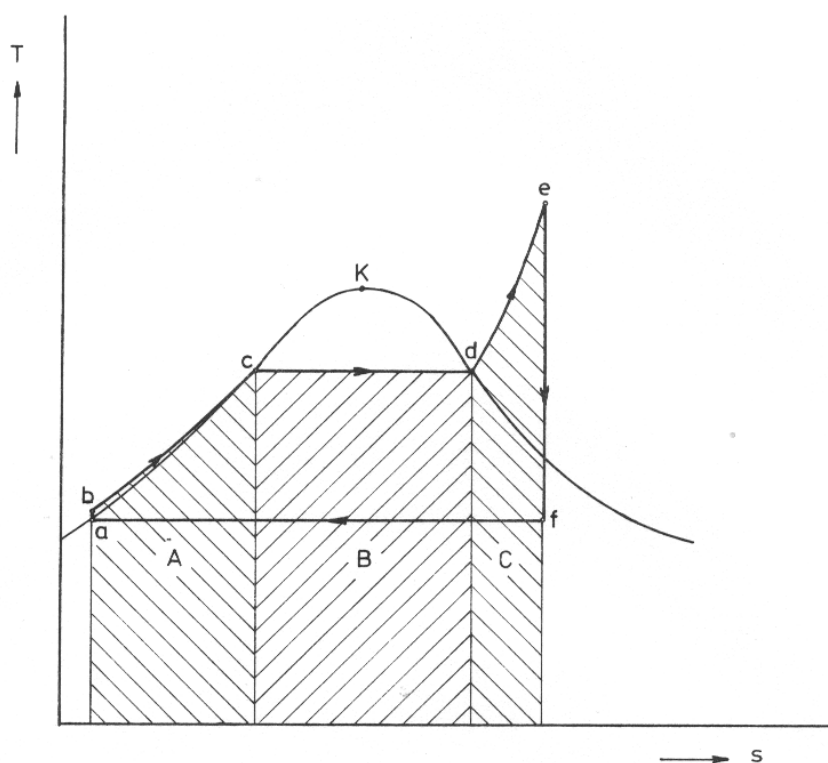
We zullen het proces, zoals weergegeven op afbeelding 1, in het h-s en in het T-s diagram weergeven. Dit is afgebeeld op afbeelding 2 en 3. We gaan er van uit dat de stoom in de turbine isentropisch expandeert. Dus de entropie blijft constant en er wordt geen warmte gewisseld met de omgeving.

Rankine

We noemen dit ook wel een Rankine proces. Het punt k stelt het kritisch punt voor.



Afbeelding 2. Het Rankine proces in het h-s diagram.



Afbeelding 3. Het Rankine proces in het T-s diagram.

In afbeelding 1, 2 en 3 is duidelijk te zien dat, om uitgaande van punt a in punt e te komen er warmte moet worden toegevoerd. We kunnen dan stellen dat het enthalpieverschil tussen punt e en punt a de toegevoerde warmte in het proces voorstelt. De toegevoerde warmte komt natuurlijk uit de brandstof.

We vinden dan dat:

$$Q_{\text{Toegevoerd}} = h_e - h_a \quad [\text{kJ} / \text{kg}]$$

Van het punt e \rightarrow f vindt er een isentrope warmteval in de turbine plaats, hier wordt arbeid (W) geleverd. Dit is natuurlijk de theoretisch geleverde arbeid. Het enthalpieverschil tussen e en f levert dan de theoretische arbeid op.

We vinden dan:

$$W_{\text{Theoretisch}} = h_e - h_f \quad [\text{kJ} / \text{kg}]$$

Dan hebben we tot slot nog het proces van punt f \rightarrow a. Hier wordt de stoom, die uit de turbine in de condensor gevoerd wordt, verdicht tot water. Hier vindt condensatie plaats, de druk en temperatuur blijven hierbij constant. Er vindt warmteafvoer plaats. Het enthalpieverschil tussen punt f en a stelt hier de afgevoerde warmte voor. Dit wordt ook wel het condensorverlies genoemd.

We vinden dan:

$$Q_{\text{Afgevoerd}} = h_f - h_a \quad [\text{kJ} / \text{kg}]$$

Voor elk rendement geldt:

$$\text{Rendement} = \frac{\text{Doel}}{\text{Offer}} \cdot 100\% \quad [\%]$$

Voor het rendement van het Rankine proces, dit wordt het thermisch rendement van de installatie genoemd, kunnen we dan noteren:

$$\text{Thermisch Rendement} = \frac{\text{Doel}}{\text{Offer}} \cdot 100\% \quad [\%]$$

$$\eta_{\text{Thermisch}} = \frac{W_{\text{Theoretisch}}}{Q_{\text{Toegevoerd}}} \cdot 100\% \quad [\%]$$

Aan te tonen is dat:

$$W_{\text{Theoretisch}} = Q_{\text{Toegevoerd}} - Q_{\text{Afgevoerd}}$$

$$Q_{\text{Toegevoerd}} - Q_{\text{Afgevoerd}} = (h_e - h_a) - (h_f - h_a) \quad [\text{kJ} / \text{kg}]$$

$$Q_{\text{Toegevoerd}} - Q_{\text{Afgevoerd}} = h_e - h_a - h_f + h_a \quad [\text{kJ} / \text{kg}]$$

$$Q_{\text{Toegevoerd}} - Q_{\text{Afgevoerd}} = h_e - h_f \quad [\text{kJ} / \text{kg}]$$

$$W_{\text{Theoretisch}} = h_e - h_f \quad [\text{kJ} / \text{kg}]$$

$$\text{Thermisch Rendement} = \frac{\text{Doel}}{\text{Offer}} \cdot 100\% \quad [\%]$$

$$\eta_{\text{Thermisch}} = \frac{W_{\text{Theoretisch}}}{Q_{\text{Toegevoerd}}} \cdot 100\% \quad [\%]$$

$$\eta_{\text{Thermisch}} = \frac{h_e - h_f}{h_e - h_a} \cdot 100\% \quad [\%]$$

Voor de installatie waarin opgenomen zijn: een stoomketel en een turbine en in ons geval geen verwarming van het voedingwater geldt voor het totale rendement:

Totaal rendement = Ketelrendement · Thermisch rendement · Turbine rendement

$$\eta_{Totaal} = \eta_{Ketel} \cdot \eta_{Thermisch} \cdot \eta_{Turbine}$$

12.1 Voorbeeld

Gegeven:

We nemen in ons voorbeeld een condensatieturbine die met een lage stoomdruk werkt. Later zullen we zien waarom we met steeds hogere drukken en temperaturen gaan werken. Er is geen voorwarmer in het systeem aanwezig.

Druk oververhitte stoom	: $p_{os} = 40$ bara
Temperatuur oververhitte stoom	: $t_{os} = 460$ °C
Enthalpie oververhitte stoom	: $h_{os} = 3354,0$ kJ/kg
Entropie oververhitte stoom	: $s_{os} = 6,9702$ kJ/(kg·K)

Condensordruk	: $p_c = 0,05$ bara
Enthalpie kokend water uit condensor	: $h_{vw} = 137,77$ kJ/kg
Enthalpie verzadigde stoom	: $h_{vs} = 2561,6$ kJ/kg
Entropie kokend water uit condensor	: $s_{vw} = 0,4763$ kJ/(kg·K)
Entropie verzadigde stoom	: $s_{vs} = 8,3960$ kJ/(kg·K)

Het ketelrendement	: $\eta_{Ketel} = 97$ %
Het turbinerendement	: $\eta_{Turbine} = 86$ %

Verder nemen we aan dat de stoom in de turbine isentropisch expandeert.

De energie die de voedingwaterpomp aan het water afgeeft door drukverhoging wordt hier verwaarloosd.

Gevraagd:

Bereken het Thermisch rendement en het totaal rendement van de installatie.

Oplossing:

We zetten het proces eerst uit in het h-s diagram, dit is weergegeven op afbeelding 4.

Alle punten zijn uitgezet in het h-s diagram, behalve de enthalpie van het kokende water en de entropie van het kokende water.

In het diagram zien we dat het punt B, dit is de conditie van de stoom bij verlaten turbine in het natte stoom gebied ligt. Wat we nu moeten doen is de enthalpie van de natte stoom berekenen. Eigenlijk is dit de enige onbekende in het vraagstuk. Een makkelijkere manier is om deze enthalpie rechtstreeks in een h-s diagram op te zoeken, deze manier is wel minder nauwkeurig.

Berekening enthalpie natte stoom, h_{ns} of h_b .

Eerst gaan we het dampgehalte van de stoom in punt B berekenen. Zodra dit berekend is, kunnen we de enthalpie van de natte stoom in punt B berekenen.

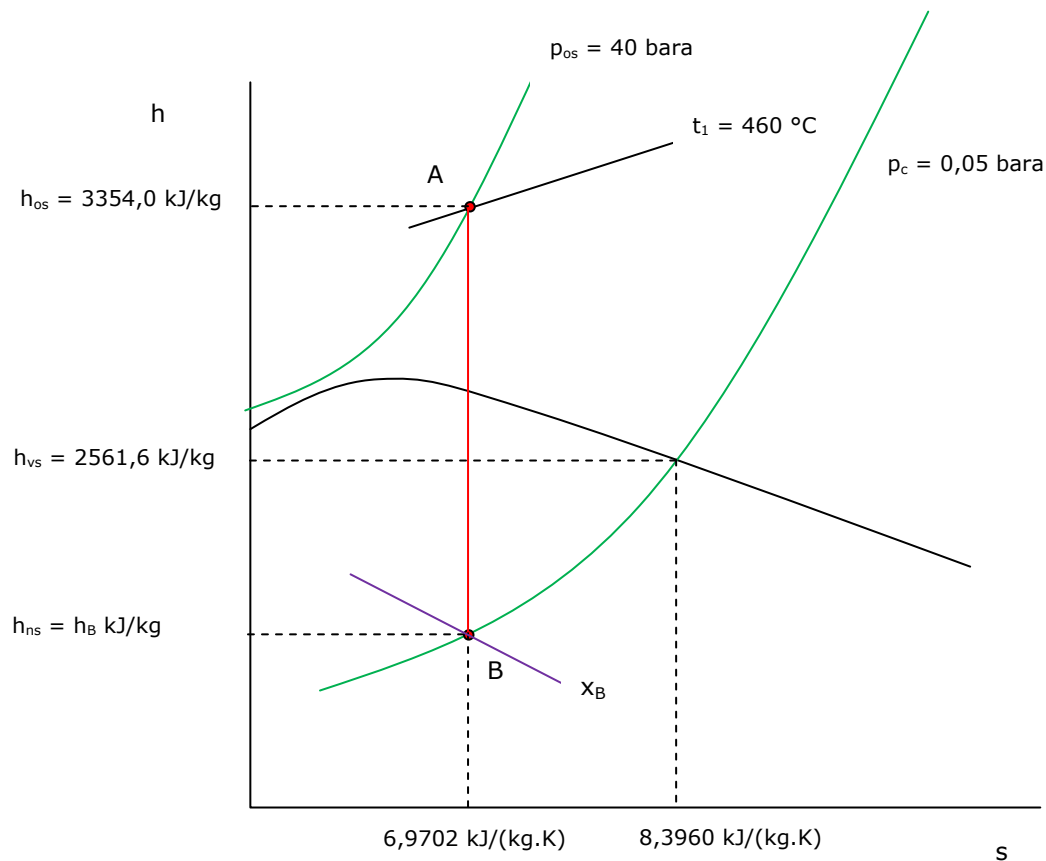
Let op de entropie in punt B is gelijk aan die in punt A. We hebben hier te maken met een isentrope expansie.

$$s_{ns} = s_w + x \cdot (s_{vs} - s_w) \quad [kJ / (kg \cdot K)]$$

$$6,9702 = 0,4763 + x_B \cdot (8,3960 - 0,4763)$$

$$x_B = \frac{6,9702 - 0,4763}{8,3960 - 0,4763} = 0,8199$$

$$x_B = 81,99 \%$$



Afbeelding 4. Het proces in het h-s diagram.

Op dezelfde manier kunnen we nu de enthalpie van de natte stoom in punt B berekenen.

$$h_{ns} = h_w + x \cdot (h_{vs} - h_w) \quad [kJ / kg]$$

$$h_{ns} = 137,77 + 0,8199 \cdot (2561,6 - 137,77)$$

$$h_{ns} = 2125,06 \quad kJ / kg$$

Voor het thermisch rendement vinden we nu:

$$W_{\text{theoretisch}} = h_a - h_b \quad [kJ/kg]$$

$$W_{\text{theoretisch}} = h_{os} - h_b \quad [kJ/kg]$$

$$Q_{\text{Toegevoerd}} = h_{os} - h_{vw} \quad [kJ/kg]$$

$$\text{Thermisch Rendement} = \frac{\text{Doel}}{\text{Offer}} \cdot 100\% \quad [\%]$$

$$\eta_{\text{Thermisch}} = \frac{W_{\text{Theoretisch}}}{Q_{\text{Toegevoerd}}} \cdot 100\% \quad [\%]$$

$$\eta_{\text{Thermisch}} = \frac{h_a - h_b}{h_{os} - h_w} \cdot 100\% \quad [\%]$$

$$\eta_{\text{Thermisch}} = \frac{3354,0 - 2125,06}{3354,0 - 137,77} \cdot 100\%$$

$$\eta_{\text{Thermisch}} = 38,21 \quad \%$$

Het totaal rendement wordt hiermee:

Totaal rendement = Ketelrendement · Thermisch rendement · Turbine rendement

$$\eta_{\text{Totaal}} = 0,97 \cdot 0,3821 \cdot 0,86$$

$$\eta_{\text{Totaal}} = 0,3187$$

$$\eta_{\text{Totaal}} = 31,87 \quad \%$$

We zien hier direct dat de invloed van het thermisch rendement doorslaggevend is voor wat betreft het totaal rendement. Ondanks het feit dat het ketelrendement en het turbinerendement relatief hoog zijn, wordt de waarde van het totaalrendement onderuit gehaald door de lage waarde van het thermisch, of Rankine, rendement.

Als we een hoog totaal rendement willen, dan zal het thermisch rendement verbeterd moeten worden.

12.2 Warmtebesparing door isoleren van afsluiters

In het volgende hoofdstuk wordt ingegaan op de rendementsverbetering. U zult zien dat dit gepaard gaat met behoorlijk wat rekenwerk. Wat niet zo direct genoemd wordt maar wel belangrijk is, is het isoleren van stoomafsluiters en stoomleidingen. In tabel 1 is weergegeven wat de besparing op jaarbasis wordt als afsluiters geïsoleerd worden. U ziet dat daar winst te halen is. Dit lijken kleine bedragen maar gezien het grote aantal afsluiters dat in een stoomplant aanwezig is kan dit behoorlijk oplopen. Ook dit helpt mee aan rendementsverbetering.

Besparing per jaar en per geïsoleerde afsluiter bij een omgevingstemperatuur van 25 °C en 8760 bedrijfsuren per jaar								
Druk	Eenheid	Type afsluiter						
Bara		DN 50	DN 65	DN 80	DN 100	DN 125	DN 150	DN 200
5	kWh/jaar	2.840	3.663	4.298	5.580	6.862	8.300	10.801
5	Ton stoom per jaar	4,02	5,19	6,09	7,91	9,73	11,76	15,31
9	kWh/jaar	3.526	4.548	5.337	6.928	8.519	10.305	13.410
9	Ton stoom per jaar	4,95	6,39	7,49	9,73	11,96	14,47	18,83
16	kWh/jaar	4.433	5.718	6.711	8.712	10.713	12.958	16.862
16	Ton stoom per jaar	6,18	7,97	9,36	12,15	14,94	18,07	23,51
21	kWh/jaar	4.869	6.280	7.370	9.568	11.766	14.231	18.520
21	Ton stoom per jaar	6,77	8,73	10,24	13,30	16,35	19,78	25,74

Tabel 1. Besparing op jaarbasis door het isoleren van afsluiters