

8.0 Het Ketelrendement

Algemene inleiding:

8.1 Historie

Toen ongeveer 30 jaar geleden de eerste waterpijpketels boven de afvalverbrandingsovens werden gebouwd, bestonden er nog geen speciaal voor dit doel ontwikkelde ketels.

In die tijd werden de bestaande ketelconcepten aangepast om boven afvalverbrandingsovens te worden gebruikt. Omdat het doel van het bouwen van deze waterpijpketels boven ovens toen ook het produceren van stoom voor een turbine generatorset was, diende deze stoom droog, dus oververhit, te zijn. Om energetische redenen en om te “natte” stoom aan het eind van de expansie in de turbine te voorkomen, werd aan de stoom in oververhitters extra warmte toegevoegd.

Problemen

Bij de eerste in AVI's toegepaste waterpijpketels heeft men een aantal problemen niet voorzien. Een van deze problemen is de, in dit boek elders beschreven, hoge temperatuur corrosie, die voornamelijk optreedt ten gevolge van Vanadium, Natrium en Zwavel in de rookgassen. De oververhitters zijn zeer gevoelig voor deze vorm van corrosie.

Kringlooprendement

Aan de ene kant bestond de gedachte al om in verband met het betere kringlooprendement de druk en temperatuur van de oververhitte stoom zo hoog mogelijk op te voeren, zoals dit toen al bij centrale ketels gebruikelijk was; aan de andere kant was het gevaar van hoge temperatuur corrosie niet geheel onbekend. Bij de meeste in die periode ontworpen waterpijpketels voor afvalverbrandingsovens, ligt de stoomdruk tussen 30 en de 50 bar en de oververhitte stoomtemperatuur tussen 360 °C en de 420°C. Hierbij is het gevaar voor hoge temperatuur corrosie redelijk beperkt. Bovendien was het kringloop rendement, ook wel het Rankine rendement genoemd, aanvaardbaar in vergelijking met andere (kolengestookte) centrale ketels in die tijd.

8.1.1 De verbetering van het rendement

De ontwikkelingen met betrekking tot rendementsverbetering zijn niet stil blijven staan. Vooral bij de ketels van elektriciteitscentrales hebben druk en temperatuur in de loop der jaren een forse stijging ondergaan tot drukken van 230 bar en bijbehorende oververhitte stoom temperaturen van 560 °C. Het rendement van deze installaties verbeterde hierdoor enorm.

De inspanningen hiertoe zijn eenvoudig te verklaren. Door de steeds hoger wordende energieprijzen, dus de prijzen van fossiele brandstoffen en in bepaalde periodes ook de schaarste hiervan,

Energieopwekking

werd in de loop van de jaren het rendement van de productie-eenheden een steeds belangrijker factor bij het ontwerp.

Het primaire doel bij elektriciteit centrales is immers energieopwekking tegen een zo laag mogelijke prijs. Bij de afvalverbranding ligt dit wel wat anders. Daar is het primaire doel het verwerken van afval. De opgewekte energie kan weliswaar de uiteindelijke verwerkingsprijs per ton afval gunstig beïnvloeden, maar dat heeft er bij de geldende energieprijzen nooit toe geleid dat er sprake kon zijn van een positieve balans. Daar komt nog bij dat in die tijd de elektriciteit productie bedrijven een afhoudend beleid voerden ten aanzien van die categorie bedrijven, die we tegenwoordig ook wel 'zelfopwekkers' noemen. Hieronder worden uiteraard ook AVI's gerekend.

De interesse voor energie opwekking uit afval bij zowel afvalverbranders als bij elektriciteit productie bedrijven was dus niet erg groot. Dit kwam omdat bij de afvalverbranding de energieopbrengst uiteindelijk een relatief klein deel uitmaakte van de verwerkingsprijs per ton afval. Bij de elektriciteitsproductiebedrijven kwam dit omdat de AVI's een voortdurend wisselende productie hebben, afhankelijk van het aanbod. Bovendien leverde de energieproductie op landelijk niveau geen substantiële bijdrage. In deze situatie is tegenwoordig echter verandering gekomen.

In de afgelopen jaren, zeker sinds het veranderen van de structuur van de vergoeding voor geleverde elektriciteit, zijn de inkomsten uit elektriciteit aanmerkelijk toegenomen.

Beschikbaarheid

De beschikbaarheid van AVI's ligt nu rond de 90 % en is daarmee vergelijkbaar met de beschikbaarheid van kolengestookte centrales. Bij nieuwe AVI's kan de beschikbaarheid zelfs oplopen tot boven de 92 %.

Een afvalverbrandingsproces kan met behulp van moderne technologieën zodanig geautomatiseerd worden dat een meer gelijkmatige verbranding met een daaruit volgende constante stoomproductie wordt bereikt.

De hoeveelheid te verbranden afval neemt nog steeds toe, mede door het overheidsbeleid dat het storten van niet herbruikbaar brandbaar afval tegengaat. Daar komt nog bij dat het algemene besef groeit om maximale energierugwinning na te streven. Dit leidde ertoe dat de afvalverbranding als kleine energiecentrale aan belang wint. Momenteel wordt er bij AVI's in Nederland dan ook zonder meer van uitgegaan dat er elektriciteit wordt opgewekt. Hier zijn slechts enkele uitzonderingen op. Dit zou dan, al dan niet in eigen installaties, in combinatie met stadsverwarming of andere vormen van warmte afzet, moeten gebeuren.

Niet voor niets worden de AVI's als energieproducenten erkend. Stadsverwarming bedrijven tonen in toenemende mate belangstelling voor de warmte die door de AVI's geleverd kan worden.

8.1.2 De stoomketel

De verhoging van stoomdruk en temperatuur heeft zijn beperkingen. De voornaamste beperking voor energiecentrales ligt bij de sterkte van turbineschoepen bij hoge temperaturen, terwijl de beperking bij afvalverbrandingsketels meer ligt bij de oververhitters van de ketels. (Toenemende wandtemperatuur geeft meer kans op hoge-temperatuur corrosie). In de verbrandingswereld overheerst het toepassen van een stoomdruk van 40 bar en een stoomtemperatuur van 400 °C nog steeds. De redenen hiervan zijn reeds genoemd. Incidenteel worden hier en daar wel installaties gebouwd met hogere stoomdruk en temperatuur. Toch zal er een afweging moeten worden gemaakt tussen de hogere opbrengst aan energie en de mogelijk kortere levensduur van oververhitters of de hogere investering voor andere materialen.

Alternatieven

Daarom is het de moeite waard na te denken over alternatieven om de stoomtemperatuur te verhogen. Hieronder zal een aantal mogelijkheden worden genoemd die afwijken van de traditionele denkwijze. Het betreft technieken en methoden die in Nederland en vaak ook in het buitenland, nog geen toepassing vonden. De opsomming is uiteraard zuiver indicatief, maar misschien kan het een aanzet zijn om het traditionele denken op dit gebied te doorbreken.

1. Andere materialen voor oververhitters, zoals oververhitterpijpen van duplexstaal, waarbij de buitenmantel van corrosievast materiaal is uitgevoerd, worden onder meer in een AVI in Baltimore (USA) toegepast
2. Oververhitting van stoom buiten de ketel met behulp van afgassen van een gasturbine die een generator aandrijft.
3. Oververhitting van stoom buiten de ketel door middel van een gasbrander, eventueel gestookt op een mengsel van aardgas en biogas.
4. Oververhitting van stoom buiten de ketel met behulp van een oliebrander die afgewerkte olie verbrandt, of een mengsel van afgewerkte olie en aardolie.

8.1.3 Rendement verbetering

Het netto elektrisch rendement van een moderne afvalverbrandingsinstallatie bedraagt 20 tot 25 %. Voor een kolencentrale geldt een netto rendement van circa 40 %. Door een aantal oorzaken, die alle zijn terug te voeren op het heterogene karakter en de chemische samenstelling van het afval, zijn de verliezen bij afvalverbranding groter.

Het elektrisch rendement van een afvalverbrandingsinstallatie is in principe te verbeteren door een verbetering van het ketelrendement

of een verbetering van het cyclusrendement van de stoomturbine-installatie.

Het ketelrendement is te verbeteren door de volgende maatregelen:

- Verhoging temperatuur verbrandingslucht.
- Verlaging van de luchtfactor tot 1,6
- Een beperking van de rookgasverliezen is mogelijk door een verlaging van de luchtvermaat Een luchtfactor van 1,8 is zondermeer haalbaar. Bij een luchtfactor van 1,6 zal het afval voor een volledige verbranding moeten worden gehomogeniseerd, dit gebeurt tegenwoordig dan ook.
- Rookgasrecirculatie
Door rookgasrecirculatie is een luchtfactor van 1,6 mogelijk zonder dat voorbewerking van het afval nodig is.
Recirculatie van 10 tot 20 % van de rookgassen is goed te realiseren
- Verlaging van de rookgas uittredetemperatuur.
Een verlaging van de temperatuur van de rookgassen tot circa 180 °C is in moderne ketels zondermeer mogelijk.

Terugverdientijd

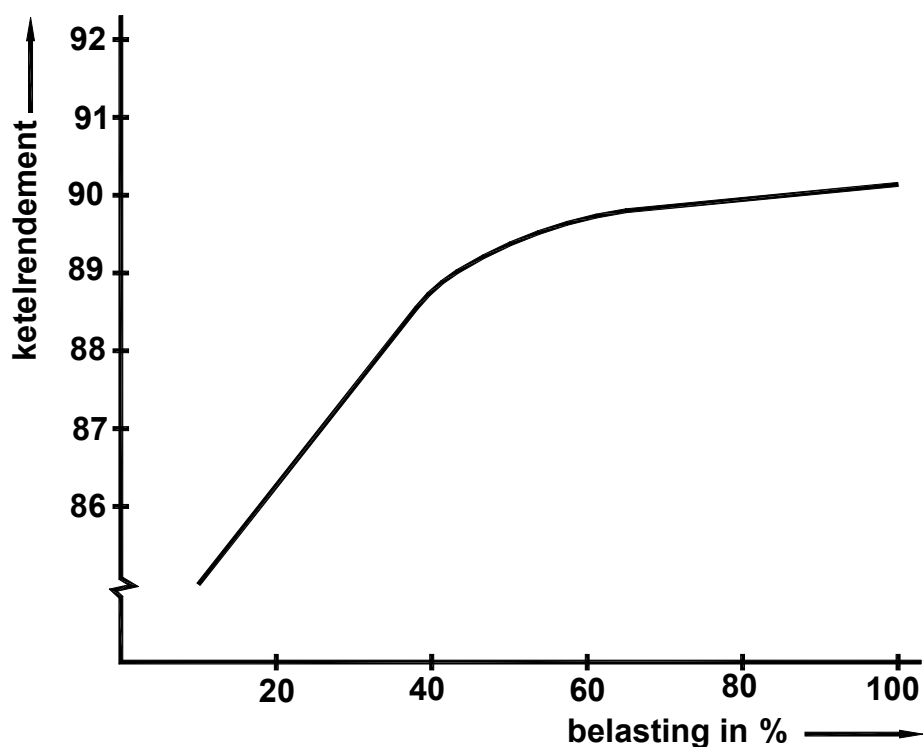
De economische haalbaarheid is te vertalen in terugverdientijden die in de orde van grootte liggen van drie jaar. Een uitzondering hierop vormt de homogenisering van afval middels een mechanische relatief kostbare bewerking om te komen tot een luchtfactor van 1,6.

Menging

Door een goede menging van het afval is naar verwachting een luchtfactor van 1,6 te benaderen. Goede instructies voor de kraanmachinist zijn dus ook uit energetisch oogpunt na te streven. De verbetering van de procesbeheersing van de verbranding (stookautomaat) waardoor met lagere luchtvermaat wordt verbrand, is verder aan te bevelen. Dit heeft bovendien een nuttig effect op de vorming van schadelijke stoffen. Zo beperkt een lage luchtvermaat gecombineerd met een goede procesbeheersing de vorming van dioxinen. Ook wanneer er technische mogelijkheden zijn om de rookgas uittredetemperatuur te verlagen, is deze aanpassing nuttig.

8.2 Theoretische beschouwing van het ketelrendement

Het rendement van de ketel zegt iets over hoe goed de ketel zijn werk doet. Men kan simpelweg zeggen dat wanneer er veel van de aan de ketel toegevoerde warmte wordt omgezet in bijvoorbeeld een bepaalde stoomproductie met bijbehorende temperatuur, het rendement hoog zal zijn. Maar wat is nu veel en weinig, bij een ketel zouden we moeten rekenen op een rendement van minimaal 90 %. Tenminste uitgaande van volle belasting. Het rendement is namelijk afhankelijk van de belasting van de ketel. In afbeelding 1 is het ketelrendement afgezet als functie van de belasting.



Afb. 1 Verband tussen rendement en belasting.

Uit de afbeelding blijkt dat de ketel vele rendementen heeft, we zullen dus moeten aangeven bij welke belasting het rendement geldt. Is niet specifiek de belasting opgegeven dan wordt 100 procent belasting bedoeld.

Conventioneel

Als gekeken wordt naar de conventionele gestookte ketelinstallaties dan werd op een gemakkelijke manier het ketelrendement bepaald met de volgende formule:

$$\eta_k = \frac{\dot{m}_s \cdot (h_{os} - h_{vw})}{\dot{m}_b \cdot H_o} \cdot 100 \%$$

Waarin

- η_k = het ketelrendement in procenten.
- \dot{m}_s = de stoomproductie van de ketel in kg/s.
- h_{os} = de enthalpie van de oververhitte stoom in kJ/kg.
- h_{vw} = de enthalpie van het voedingwater dat aan de economizer wordt toegevoerd in kJ/kg.
- \dot{m}_b = de toegevoerde brandstofhoeveelheid in kg/s.
- H_o = de stookwaarde van de brandstof in kJ/kg.

DIN 1942

Op deze manier werd snel het rendement van de ketel bepaald. Aangezien deze manier te veel speelruimte had werd het ketelrendement volgens DIN-norm 1942 ingevoerd. In deze norm wordt de toegevoerde energie aan de ketel duidelijk omschreven, dus wat nu wel en wat geen toegevoerde energie is.

Toegevoerde energie aan de ketel.

Wanneer de verstuivingsstoom voor een eventuele brander en een stoomluvo buiten beschouwing gelaten wordt, dan is de *toegevoerde* energie:

- $Q_{brstf} = \dot{m}_b \cdot H_o + \dot{m}_{br} \cdot c_b \cdot (t_b - t_r)$
- $Q_{lucht} = \dot{m}_b \cdot M_{lpr} \cdot c_l \cdot (t_l - t_r)$
- $Q_{toe} = Q_{brstf} + Q_{lucht} + P_{circpomp}$
- $Q_{toe} = \dot{m}_b \cdot H_o + \dot{m}_b \cdot c_b \cdot (t_b - t_r) + \dot{m}_b \cdot M_{lpr} \cdot c_l \cdot (t_l - t_r) + P_{circpomp}$

Waarin:

- \dot{m}_b = het brandstofverbruik in kg/s;
- H_o = stookwaarde van de brandstof in kJ/kg;
- c_b = soortelijke warmte van de brandstof in kJ/kg·K;
- t_b = brandstoftemperatuur in °C ;
- t_r = de richttemperatuur in °C (= volgens DIN 1942 25 °C) ;
- M_{lpr} = de werkelijke hoeveelheid lucht die per kg brandstof wordt toegevoerd in kg lucht/ kg brandstof;
- c_l = soortelijke warmte van de lucht in kJ/kg·K;
- t_l = de temperatuur van de lucht na de ketelfan in °C ;
- P_{circ} = het benodigde vermogen om de circulatiepomp aan te drijven in kW.

De verliezen die in rekening moeten worden gebracht.

Bij een afvalgestookte ketel hebben we met een aantal verliezen te maken die in rekening dienen te worden gebracht. Deze verliezen zijn:

- Het schoorsteenverlies.

$$Q_{sv} = \dot{m}_g \cdot c_g \cdot (t_g - t_r)$$

- Het stralingsverlies

$$Q_{straling} = k \cdot Q_{toe}^{0,7}$$

- Het verlies door onverbrand.

$$Q_{CO} = \dot{V}_g \cdot \left(\frac{\text{vol \% CO}}{100} \right) \cdot H_{CO}$$

- Het verlies met de slak.

$$Q_{slak} = \dot{m}_{slak} \cdot c_{slak} \cdot (t_{slak} - t_r)$$

- Het verlies met het vliegass.

$$Q_{vliegass} = \dot{m}_{vliegass} \cdot c_{vliegass} \cdot (t_{vliegass} - t_r)$$

- Het verlies met het spuiwater.

$$Q_{spui} = \dot{m}_{spui} \cdot (h_{spui} - h_{voedingwater})$$

Hierin is:

\dot{m}_g	=	De massa rookgassen in kg/s
c_{slak}	=	De soortelijke warmte van de slak in kJ/kgK
$c_{vliegass}$	=	De soortelijke warmte van de vliegass in kJ/kgK
$\dot{m}_{vliegass}$	=	De massa vliegass in kg/s
\dot{m}_{spui}	=	De massa spuiwater in kg/s
h_{spui}	=	De enthalpie van het spuiwater in kJ/kg
$h_{voedingwater}$	=	De enthalpie van het voedingwater voor de eco in kJ/kg
\dot{V}_g	=	Het volume <i>droge</i> rookgassen in m ³ /s
H_{CO}	=	De stookwaarde van CO in MJ/m ³
vol % CO	=	Het volume percentage CO in de <i>droge</i> rookgassen

De DIN Norm 1942 rekt altijd met de volgende waarden:

Soortelijke warmte water	c_w	=	4,19 kJ/kgK
Soortelijke warmte stoom	c_d	=	1,86 kJ/kgK
Soortelijke warmte lucht	c_l	=	1,005 kJ/kgK
Soortelijke warmte rookgas	c_g	=	1,0 kJ/kgK
Soortelijke warmte aardgas	c_a	=	2,2 kJ/kgK
Richttemperatuur	t_r	=	25 °C
Soortelijke warmte vlieg	c_{vlieg}	=	0,84 kJ/kgK
Soortelijke warmte slak	c_{slak}	=	1 kJ/kgK
Stookwaarde CO	H_{CO}	=	12,633 MJ/m ³
De k factor	k	=	0,0113

We kunnen nu drie verschillende ketelrendementen noemen, te weten:

- 1 Het eenvoudige rendement

$$\eta_k = \frac{\dot{m}_s \cdot (h_{os} - h_{vw})}{\dot{m}_b \cdot H_o} \cdot 100 \%$$

- 2 Het rendement volgens de directe methode

$$\eta_{direct} = \left(\frac{Q_{opgenomen}}{Q_{toe}} \right) \cdot 100\%$$

- 3 Het rendement volgens de indirecte methode.

$$\eta_{indirect} = \left(1 - \frac{Q_{verlies}}{Q_{toe}} \right) \cdot 100\%$$

Onder opgenomen warmte wordt verstaan:

- Warmte die door de ketel opgenomen wordt om oververhitte stoom te maken uit voedingwater.
- Warmte die het spuiwater opgenomen heeft in de ketel uit het voedingwater.

Rekenvoorbeeld.

Van een afval gestookte ketel is het volgende bekend:

De gemiddelde samenstelling van het afval:

- Het massapercentage Koolstof bedraagt : 18 %
- Het massapercentage Waterstof bedraagt : 4 %
- Het massapercentage Zwavel bedraagt : 2 %

De ketel levert 85 ton oververhitte stoom per uur.

Stoomcondities	:	p_{os}	=	40 bar	
		t_{os}	=	420 °C	
		\dot{m}_s	=	85 ton/uur	
		p_{vs}	=	44 bar	
Voedingwater condities	:	t_{vw}	=	140 °C	
		p_{vw}	=	46 bar	
Spuiwater	:	\dot{m}_{spui}	=	2 ton/uur	
Afval	:	\dot{m}_b	=	28 ton/uur	
		c_b	=	2 kJ/kgK	
		t_b	=	50 °C	
Lucht	:	t_l	=	30 °C	
		p_l	=	1 bar	
		λ	=	1,7	
Slak	:	\dot{m}_{slak}	=	$0,25 \cdot \dot{m}_b$	kg/s
		t_{slak}	=	500 °C	
Vliegas	:	$\dot{m}_{vliegas}$	=	$0,03 \cdot \dot{m}_b$	kg/s
		$t_{vliegas}$	=	180 °C	
Rookgastemperatuur	:	t_g	=	250 °C	
CO percentage	:	%CO	=	0,01 %	

Gevraagd:

Het ketelrendement volgens:

- De eenvoudige manier
- De directe methode
- De indirecte methode.

Oplossing:

Uit de stoomtabel vinden we de volgende gegevens:

Verzadigde stoom.

$$44 \text{ bar} \quad : \quad \begin{array}{l} h_{vs} = 2798,3 \quad \text{kJ/kg} \\ t_{vs} = 256 \quad \text{°C} \\ h_{\text{water}} = 1115,4 \quad \text{kJ/kg} \end{array}$$

Oververhitte stoom.

$$40 \text{ bar, } 420 \text{ °C} : \quad h_{os} = 3262,3 \quad \text{kJ/kg}$$

Voedingwater.

$$46 \text{ bar, } 140 \text{ °C} : \quad h_{vw} = 591,9 \quad \text{kJ/kg}$$

Voor het afval kunnen we het volgende berekenen.

De Stookwaarde van het afval.

$$H_0 = 340 \cdot \%C + 1440 \cdot \left(\%H - \frac{\%O}{8} \right) + 105 \cdot \%S - 25 \cdot (9 \cdot \%H + \%W) \quad \text{kJ/kg}$$

Ingevuld levert dit op:

$$H_0 = 340 \cdot 18 + 1440 \cdot \left(4 - \frac{0}{8} \right) + 105 \cdot 2 - 25 \cdot (9 \cdot 4 + 0) = 11.190 \text{ kJ/kg}$$

De hoeveelheid benodigde lucht.

$$M_{lpr} = \lambda \cdot \frac{1}{23} \cdot \left\{ \frac{8}{3} \cdot \%C + 8 \cdot \left(\%H - \frac{\%O}{8} \right) + \%S \right\} \quad \text{kg lucht/kg afval}$$

Ingevuld bij een luchtfactor van 1,7 levert dit op:

$$M_{lpr} = 1,7 \cdot \frac{1}{23} \cdot \left\{ \frac{8}{3} \cdot 18 + 8 \cdot \left(4 - \frac{0}{8} \right) + 2 \right\} = 6,06 \text{ kg lucht/ kg afval}$$

De massa rookgassen dat de ketel verlaat.

$$\dot{m}_g = \dot{m}_b + \dot{m}_l$$

$$\dot{m}_g = (\dot{m}_b - \dot{m}_{slak}) + (\dot{m}_b \cdot M_{lpr})$$

$$\dot{m}_g = \left(\frac{28.000}{3600} - \frac{0,25 \cdot 28.000}{3600} \right) + \left(\frac{28.000}{3600} \cdot 6,06 \right) = 52,9 \text{ kg/s}$$

1 Het ketelrendement op de eenvoudige manier.

$$\eta_k = \frac{\dot{m}_s \cdot (h_{os} - h_{vw})}{\dot{m}_b \cdot H_o} \cdot 100\%$$

Ingevuld:

$$\eta_k = \frac{85 \cdot (3262,3 - 591,9)}{28 \cdot 10071} \cdot 100\% = 80,49\%$$

2 Het ketelrendement volgens de directe methode.

$$\eta_{direct} = \left(\frac{Q_{opgenomen}}{Q_{toe}} \right) \cdot 100\%$$

$$\eta_{direct} = \left(\frac{\dot{m}_s \cdot (h_{os} - h_{vw}) + \dot{m}_{spui} \cdot (h_{spui} - h_{vw})}{\dot{m}_b \cdot H_o + \dot{m}_b \cdot c_b \cdot (t_b - t_r) + \dot{m}_b \cdot M_{lpr} \cdot c_l \cdot (t_l - t_r)} \right) \cdot 100\%$$

$$\eta_{direct} = \left(\frac{\frac{85000}{3600} \cdot (3262,3 - 591,9) + \frac{2000}{3600} \cdot (1115,4 - 591,9)}{\frac{28000}{3600} \cdot 10071 + \frac{28000}{3600} \cdot 2 \cdot (50 - 25) + \frac{28000}{3600} \cdot 6,06 \cdot 1,005 \cdot (30 - 25)} \right) \cdot 100\%$$

$$\eta_{direct} = 80,22\%$$

3 Het ketelrendement volgens de indirecte methode.

$$\eta_{indirect} = 1 - \left(\frac{Q_{verlies}}{Q_{toe}} \right) \cdot 100\%$$

We berekenen nu eerst de afzonderlijke verliezen.

Het schoorsteen verlies.

$$Q_{sv} = \dot{m}_g \cdot c_g \cdot (t_g - t_r)$$

$$Q_{sv} = 52,9 \cdot 1,0 \cdot (250 - 25) = 11902,5 \quad \text{kW}$$

Het stralings verlies

$$Q_{toe} = 78955,7 \quad \text{kW} \quad (\text{uit de voorgaande formule})$$

$$Q_{straling} = k \cdot Q_{toe}^{0,7}$$

$$Q_{straling} = 0,0113 \cdot 78955,7^{0,7}$$

$$Q_{straling} = 30,28 \quad \text{kW}$$

Het verlies door onverbrand.

$$Q_{CO} = \dot{V}_g \cdot \left(\frac{\text{vol\% CO}}{100} \right) \cdot H_{CO}$$

Het volume droog rookgas volgt uit:

$$\dot{V}_g = \dot{m}_b \cdot \{V_{CO_2} + V_{SO_2} + V_{N_2} + V_{O_2}\} \quad \text{m}^3/\text{s}$$

$$V_{CO_2} = \frac{22,4}{12} \cdot \frac{\%C}{100}$$

$$V_{CO_2} = \frac{22,4}{12} \cdot \frac{18}{100} = 0,336 \text{ m}^3/\text{kg}$$

$$V_{SO_2} = \frac{22,4}{32} \cdot \frac{\%S}{100}$$

$$V_{SO_2} = \frac{22,4}{32} \cdot \frac{2}{100} = 0,014 \text{ m}^3/\text{kg}$$

$$V_{N_2} = \frac{79}{21} \cdot \lambda \cdot \left\{ \frac{22,4}{12} \cdot \frac{\%C}{100} + \frac{22,4}{4} \cdot \frac{\%H}{100} + \frac{22,4}{32} \cdot \frac{\%S}{100} \right\}$$

$$V_{N_2} = \frac{79}{21} \cdot 1,7 \cdot \left\{ \frac{22,4}{12} \cdot \frac{18}{100} + \frac{22,4}{4} \cdot \frac{4}{100} + \frac{22,4}{32} \cdot \frac{2}{100} \right\}$$

$$V_{N_2} = 3,67 \text{ m}^3/\text{kg}$$

$$V_{O_2} = (\lambda - 1) \cdot \left\{ \frac{22,4}{12} \cdot \frac{\%C}{100} + \frac{22,4}{4} \cdot \frac{\%H}{100} + \frac{22,4}{32} \cdot \frac{\%S}{100} \right\}$$

$$V_{O_2} = (1,7 - 1) \cdot \left\{ \frac{22,4}{12} \cdot \frac{18}{100} + \frac{22,4}{4} \cdot \frac{4}{100} + \frac{22,4}{32} \cdot \frac{2}{100} \right\}$$

$$V_{O_2} = 0,4018 \text{ m}^3/\text{kg}$$

Hieruit volgt het volume droge rookgassen.

$$\dot{V}_g = \dot{m}_b \cdot \{V_{CO_2} + V_{SO_2} + V_{N_2} + V_{O_2}\}$$

$$\dot{V}_g = \frac{28000}{3600} \cdot \{0,336 + 0,014 + 3,67 + 0,4018\}$$

$$\dot{V}_g = 34,39 \text{ m}^3/\text{s}$$

Het verlies door onverbrand wordt nu:

$$Q_{CO} = \dot{V}_g \cdot \left(\frac{\text{vol}\% CO}{100} \right) \cdot H_{CO}$$

$$Q_{CO} = 34,39 \cdot \left(\frac{0,01}{100} \right) \cdot 12633$$

$$Q_{CO} = 43,44 \text{ kW}$$

Het verlies met de slak:

$$Q_{slak} = \dot{m}_{slak} \cdot c_{slak} \cdot (t_{slak} - t_r)$$

$$Q_{slak} = 0,25 \cdot \frac{28000}{3600} \cdot 1 \cdot (500 - 25)$$

$$Q_{slak} = 923 \text{ kW}$$

Het verlies met het vlieggas:

$$Q_{vlieg} = \dot{m}_{vlieg} \cdot c_{vlieg} \cdot (t_{vlieg} - t_r)$$

$$Q_{vlieg} = 0,03 \cdot \frac{28000}{3600} \cdot 0,84 \cdot (180 - 25)$$

$$Q_{vlieg} = 30,38 \text{ kW}$$

Het verlies met het spuiwater:

$$Q_{spui} = \dot{m}_{spui} \cdot (h_{spui} - h_{voedingwater})$$

$$Q_{spui} = \frac{2000}{3600} \cdot (1115,4 - 591,9)$$

$$Q_{spui} = 290,8 \text{ kW}$$

Hieruit volgt het totale verlies:

$$Q_{verlies} = 11902,5 + 30,28 + 43,44 + 923 + 30,38 + 290,8 = 13219,94 \text{ kW}$$

Het indirecte rendement bedraagt nu:

$$\eta_{indirect} = \left(1 - \frac{Q_{verlies}}{Q_{toe}} \right) \cdot 100\%$$

$$\eta_{indirect} = \left(1 - \frac{13219,9}{78955,7} \right) \cdot 100\%$$

$$\eta_{indirect} = 83,25 \%$$

Conclusie uit dit verhaal is dat het wel degelijk uitmaakt hoe het berekend wordt, ook al lijkt dit op het eerste gezicht niet zo. Het grote verschil zit hem in het schoorsteenverlies en het verlies door onverbrand. Als de rookgastemperatuur en het CO percentage toeneemt daalt het ketelrendement erg sterk.