

## **Toepassing van een bioverbrandingsinstallatie ten behoefte van houtdroging**



**Afstudeerverslag ter verkrijging van de graad van  
Bachelor of Applied Technology (BTech.)  
in de studierichting Werktuigbouwkunde**

**P.A. Ramadhin**  
Paramaribo, juli 2013

## **Toepassing van een bioverbrandingsinstallatie ten behoefte van houtdroging**



Naam student + studentenreg. nr: Anshala Ramadhin 10874  
Docent-begeleiders: dhr. ir. Jimmy Narain  
dhr. Jaikisen Sital BSc.

Paramaribo, 17 juli 2013

## **Voorwoord**

Ter afronding van de bachelorstudie op het Polytechnic College dient de student een bachelorafstudeeropdracht uit te voeren. Deze opdracht heeft als doel de integratie te bevorderen van opgedane inhoudelijke kennis en oplossingsgerichte kennis en vaardigheden. De bachelorafstudeeropdracht is bedoeld ter oriëntatie op de beroepspraktijk en kan een onderzoeksgericht karakter hebben. Het te kiezen onderwerp van de bachelorafstudeeropdracht is afhankelijk van de persoonlijke belangstelling, maar moet wel gerelateerd zijn aan het werkgebied van de desbetreffende studierichting. Over dit onderwerp wordt er een technisch verslag geschreven en na goedkeuring door de begeleiders volgt een powerpointpresentatie hierover.

Gedurende de studie op het PTC en tijdens het uitvoeren van de bachelorafstudeeropdracht ben je afhankelijk van de medewerking van anderen. Zo is de totstandkoming van mijn bachelorafstudeeropdracht afhankelijk geweest van de medewerking, de begeleiding, het vertrouwen en geduld van de volgende mensen: de directeur van Ramzons N.V., dhr. Rampersad, mijn begeleiders, dhr. J. Sital BSc en dhr. ir. J. Narain, de richtingscoördinator WTB (tevens mijn levenspartner) dhr. S. Bissesar MSc, docent Nederlands, mw. Long Him Nam, mijn vader dhr. A.D. Ramadhin, mijn medestudenten WTB cohort 2007, mijn collega's en overige familieleden.

Paramaribo, juli 2013

# INHOUDSOPGAVE

SAMENVATTING

SUMMARY

LIJST VAN SYMBOLEN

LIJST VAN AFKORTINGEN

LIJST VAN FIGUREN

LIJST VAN TABELLEN

<b>1</b>	<b>INLEIDING .....</b>	<b>11</b>
<b>2</b>	<b>HOUT ALS ENERGIEDRAGER.....</b>	<b>14</b>
2.1	De stofsamenstelling van hout.....	14
2.2	Hout als biobrandstof.....	15
2.3	Keuze van het energie-omzettingsproces voor houtafval .....	15
2.3.1	<i>De toe te passen technologie .....</i>	<i>15</i>
2.3.2	<i>Het verbrandingsproces en bijbehorende parameters.....</i>	<i>16</i>
2.4	Mogelijkheden in Suriname .....	19
2.4.1	<i>De productie van hout en houtafval.....</i>	<i>19</i>
<b>3</b>	<b>HOUTDROGINGSTECHNIEKEN.....</b>	<b>22</b>
3.1	Het houtdrogingsproces.....	22
3.1.1	<i>De “heat and vent kiln” .....</i>	<i>23</i>
3.1.2	<i>De “dehumidifier” dryer.....</i>	<i>24</i>
3.2	Keuzecriteria voor het te kiezen proces.....	26
<b>4</b>	<b>DE ENERGIE-OMZETTING IN EEN STIRLINGMOTOR.....</b>	<b>28</b>
4.1	Keuzecriteria voor de energie-omzetting .....	28
4.2	De stirlingmotor.....	29
4.2.1	<i>Kenmerk en de algemene opbouw .....</i>	<i>30</i>
4.2.2	<i>Voor- en nadelen van de stirlingmotor .....</i>	<i>32</i>
4.3	Het werkingsprincipe van de verschillende types stirlingmotoren.....	33
4.3.1	<i>De alpha- stirlingmotor.....</i>	<i>34</i>
4.3.2	<i>De beta-stirlingmotor.....</i>	<i>35</i>

4.3.3	<i>De gamma- stirlingmotor</i> .....	37
4.3.4	<i>De dubbelwerkende stirlingmotor</i> .....	37
4.4	De SD4-E DK stirlingmotor .....	39
4.4.1	<i>Gehanteerde keuzecriteria voor de SD4-E</i> .....	39
4.4.2	<i>Technische specificaties van de SD4-E</i> .....	41
<b>5</b>	<b>DE BIOVERBRANDINGSINSTALLATIE</b> .....	<b>45</b>
5.1	Componentenopbouw en proces van de bioverbrandingsinstallatie .....	45
5.2	Berekening van de nodige hoeveelheid houtafval .....	46
5.3	Kostenplan voor het opzetten van het model.....	47
<b>6</b>	<b>CONCLUSIES EN AANBEVELINGEN</b> .....	<b>48</b>
	<b>LITERATUURLIJST</b> .....	<b>49</b>
	<b>BIJLAGE A BLOKSCHEMA DAT HET STAPPENPLAN VOORSTELT</b> .....	<b>51</b>
	<b>BIJLAGE B BEGRIPPENLIJST</b> .....	<b>52</b>
	<b>BIJLAGE C TECHNISCHE SPECIFICATIES EN AFBEELDING VAN EEN PLANT, .....</b> <b>AANGEDREVEN DOOR DE SD4-E DK STIRLINGMOTOR</b> .....	<b>53</b>

## SAMENVATTING

Suriname kent de laatste drie en een half jaar een bloeiende houtsector. Tijdens de houtproductie komt er houtafval, een biomassasoort, vrij. Dit houtafval wordt op grote schaal gedumpt of ongecontroleerd verbrand.

De probleemstelling van dit onderzoek luidt dus als volgt: houtafval, een energiedrager, komt veelal op een onverantwoorde wijze en onbenut in het milieu terecht.

Het doel van dit afstudeerproject is om in houtbedrijven een installatie toe te passen die bio-energie uit houtafval kan aanwenden voor het bedienen van een houtdroger van desbetreffend bedrijf.

Middels veld- en literatuuronderzoek is achterhaald dat het land inkomsten genereert uit de jaarlijkse gemiddelde rondhoutproductie van 282.050 m<sup>3</sup>. Deze inkomsten kunnen toenemen als hout vóór de verkoop ervan gedroogd wordt. In Suriname wordt in de meeste gevallen de “dehumidifier” toegepast om hout kunstmatig te drogen. Ook is gebleken dat de hoeveelheid vrijkomende houtafval op z'n minst gelijk is aan de houtproductie. Houtafval bevat ‘gebonden’ chemische energie die door verbranding omgezet wordt in thermische energie. Door toepassing van een warmtekrachtkoppeling, met name de SD4-E DK stirlingmotor, wordt de ontwikkelde thermische energie indirect omgezet in elektriciteit. Door de “dehumidifier” te koppelen aan de generator van de SD4-E kan het in werking gesteld worden om hout te drogen. Voor deze bio-verbrandingsinstallatie is er een kostenplan beraamd.

Uit dit onderzoek is gebleken dat er voldoende houtafval beschikbaar is om aangewend te worden voor de toe te passen bioverbrandingsinstallatie. Het opzetten van een dergelijke installatie zal minstens US\$ 404.000,- kosten.

Er wordt aanbevolen dat er een pilotproject in Suriname uitgevoerd wordt om de haalbaarheid van een plant met deze bioverbrandingsinstallatie te onderzoeken. Ook kan er verder onderzoek gedaan worden naar grotere typen stirlingmotoren voor een plant.

## SUMMARY

Suriname has the last three and a half years a thriving timber industry. During the woodproduction wood waste, a kind of biomass is produced. This wood waste is mostly dumped or combusted irresponsibly.

The research question of this study is as follows: wood waste, an energy carrier, mostly ends up in an irresponsible manner and untapped in the environment.

The aim of this thesis project is to apply an installation in timber companies that can use bi energy from wood waste for operating a wood dryer of relevant company.

By means of field-and literature research is obsolete that the country generates income from the annual average production of 282.050 m<sup>3</sup> of round timber. This income could increase if wood is dried before it is sold. In most cases in Suriname the dehumidifier is applied to dry wood artificially. Also, it has been found that the amount of wood waste that is released is at least equal to the production of timber. Wood waste contains bound chemical energy which can be converted into thermal energy by combustion. By applying a combined heat and power, especially the SD4-E DK Stirling engine, the developed heat energy can indirectly be converted into electricity. By connecting the dehumidifier to the generator of the SD4-E it can be used to dry wood. For this bio-incineration plant a cost plan has been made.

This research has shown that there is enough wood waste available to be used for the bio-incineration plant. Setting up such a plant will cost at least US \$ 404.000,-.

It is recommended that a pilot project is carried out in Suriname to research the feasibility of this bio-incineration plant. Further research to larger types of stirlingengines for a plant can also be done.

## LIJST VAN SYMBOLEN

$m^3$	Kubieke meter
kWh/kg	Kilowattuur per kilogram
$^{\circ}\text{C}$	Graden Celsius
$\lambda$	Lambda
ha	Hectare
$W$	De massa van het hout vlak voordat het gedroogd wordt
$D$	De massa van het hout nadat/als het gedroogd is
$P$	Druk
$V$	Volume
$T$	Temperatuur
kW	Kilowatt
Pa	Pascal
$t$	Tijd
$E$	Energie
$E_k$	Kinetische energie
$I$	Traagheidsmoment om de rotatie-as
$\omega$	Hoeksnelheid
$n$	Toerental = aantal rotaties per seconde
$\pi$	Pi = 25/7
$k$	Traagheidsconstante
$m$	Massa
$r$	Straal
J	Joule
$M$	Molmassa
$R$	Gasconstante
$W$	Arbeid
$\rho$	Rho (dichtheid)



## LIJST VAN AFKORTINGEN

SBB Stichting Bosbeheer en Bostoezicht

MC “Moisture Content” (vochtgehalte)

RH “Relative Humidity” (relatieve vochtigheidsgraad)

DH “Dehumidifier” (ontvochtiger)

WKK Warmtekrachtkoppelingen

CHP “Combined Heat and Power” (WKK)

RPM “Rotation per minute” (toerental x 60)

## Lijst van figuren

<i>Figuur 1 De jaarlijkse rondhoutproductie van 2001 tot en met 2011 .....</i>	<i>11</i>
<i>Figuur 2 De reactievergelijking bij volledige verbranding van hout .....</i>	<i>17</i>
<i>Figuur 3 Schema van het verbrandingsproces van houtafval .....</i>	<i>17</i>
<i>Figuur 4 Het verband tussen de luchtfactor <math>\lambda</math> en het exergierendement .....</i>	<i>18</i>
<i>Figuur 5 Het verband tussen de voorverwarming van lucht en het exergetische rendement bij enkele brandstoffen.....</i>	<i>19</i>
<i>Figuur 6 Een schematische weergave van de “heat and vent kiln” droger.....</i>	<i>24</i>
<i>Figuur 7 Een schematische weergave van de “dehumidifier” droger .....</i>	<i>25</i>
<i>Figuur 8 Zij-aanzicht van het drogen van hout met behulp van de “dehumidifier” .....</i>	<i>26</i>
<i>Figuur 9 Schets van een stirlingmotor .....</i>	<i>31</i>
<i>Figuur 10 P – V diagram van een Stirling proces .....</i>	<i>31</i>
<i>Figuur 11 Een schets van de alpha- stirlingmotor .....</i>	<i>34</i>
<i>Figuur 12 Isothermische expansie in de beta-stirlingmotor .....</i>	<i>35</i>
<i>Figuur 13 Volumeverplaatsing met warmte afvoer .....</i>	<i>36</i>
<i>Figuur 14 Isothermische compressie .....</i>	<i>36</i>
<i>Figuur 15 Volumeverplaatsing met warmtetoevoer.....</i>	<i>36</i>
<i>Figuur 16 Schets van de gamma- stirlingmotor .....</i>	<i>37</i>
<i>Figuur 17 Lineaire opstelling van de dubbelwerkende stirlingmotor .....</i>	<i>38</i>
<i>Figuur 18 Schets van de cirkelvormige opstelling van dubbelwerkende stirlingmotoren .....</i>	<i>39</i>
<i>Figuur 19 De SD4-E DK stirlingmotor.....</i>	<i>41</i>
<i>Figuur 20 Doorsnede van de SD4-E stirlingmotor.....</i>	<i>41</i>
<i>Figuur 21 Procesdiagram van de WKK-plant, waarvan de SD4-E deel uitmaakt.....</i>	<i>45</i>

## LIJST VAN TABELLEN

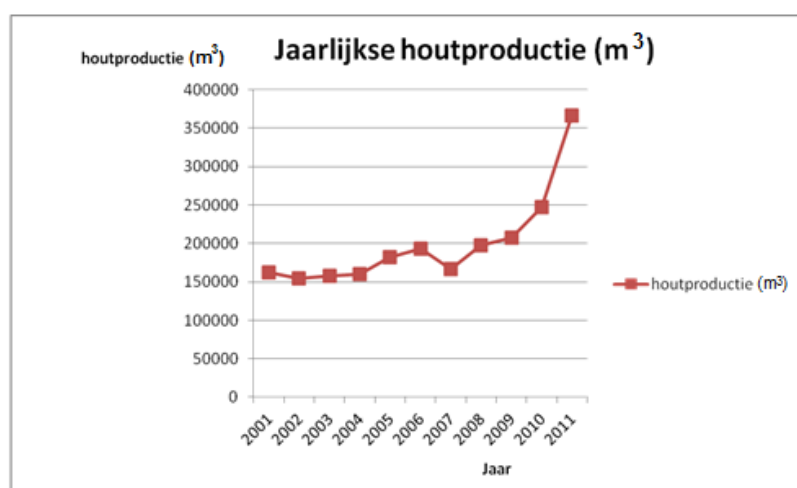
<i>Tabel 1 De procentuele stofsamenstelling van hout .....</i>	<i>14</i>
<i>Tabel 2 Korte omschrijving van de technologieën ter verwerking van hout tot biobrandstof.....</i>	<i>15</i>
<i>Tabel 3 De voor- en nadelen per technologie .....</i>	<i>16</i>
<i>Tabel 4 Houtproductie per assortiment .....</i>	<i>20</i>
<i>Tabel 5 De productie van rondhout en houtafval .....</i>	<i>20</i>
<i>Tabel 6 Verschillen tussen de “Heat and vent kiln” en de “Dehumidifier kiln” droger.....</i>	<i>26</i>
<i>Tabel 7 Korte beschrijving van de methoden ter omzetting van warmte in elektriciteit.....</i>	<i>28</i>
<i>Tabel 8 Keuzecriteria voor het te kiezen systeem .....</i>	<i>29</i>
<i>Tabel 9 Overzicht van de types stirlingmotoren met bijbehorende opbouw .....</i>	<i>34</i>
<i>Tabel 10 Beschrijving van de drie vormen van warmte-overdracht.....</i>	<i>43</i>
<i>Tabel 11 De nodige hoeveelheid houtafval ter aandrijving van de SD4-E stirlingmotor.....</i>	<i>46</i>
<i>Tabel 12 ‘Elektrische’ benutting van de gemiddelde beschikbare hoeveelheden aan houtafval .</i>	<i>47</i>
<i>Tabel 13 Prijslijst van de belangrijke onderdelen van de bioverbrandingsinstallatie .....</i>	<i>47</i>

# 1 Inleiding

In Suriname is waterkracht de belangrijkste leverancier van elektrische energie gevolgd door thermische krachtcentrales (<http://www.nvebs.com/over-ebs-activiteiten/-productie>). In deze centrales wordt er gebruikgemaakt van fossiele brandstoffen. De vraag naar elektrische energie neemt in Suriname jaarlijks toe met 8 tot 10% (KEMA Consulting, 2008). De waterkrachtcentrale in het Afobaka Stuwmeer kan niet voldoen aan deze behoefte aan energie. Bovendien dreigen de fossiele brandstoffen op te raken, worden ze door hun schaarste duurder worden en zijn ze zeer milieu-onvriendelijk. De laatste decennia is het mogelijk om middels verbeterde energie-omzettingstechnieken, energie op efficiënte wijze op te wekken uit biomassa. Suriname kent momenteel een bloeiende houtsector, waarbij er grote hoeveelheden aan houtafval vrijkomen tijdens de productie van hout. Houtafval behoort tot biomassa.

## *Achtergrondinformatie*

Suriname heeft een tropisch vochtig klimaat. Van het totale landoppervlak is 148.000 km<sup>2</sup>, dus negentig procent van het landoppervlak, bedekt met bos (Bosbouw Sector Analyse 2010, 2011). Suriname is het tweede land met het hoogste percentage aan bosvoorkomen. In 2011 is de productie van hout in Suriname 366.000 m<sup>3</sup> geweest (Bosbouw Sector Analyse 2011, 2012). Geschat wordt dat tegen 2015 de houtproductie zal stijgen tot 500.000 m<sup>3</sup> (R. Matai, persoonlijke communicatie, maart 2013). Figuur 1 geeft een voorstelling weer van de houtproductie van 2001 tot en met 2011.



*Figuur 1 De jaarlijkse rondhoutproductie van 2001 tot en met 2011*

Uit de grafiek blijkt dat de houtproductie de laatste vier jaren snel is gestegen. Tijdens de houtproductie komt er relatief veel houtafval vrij. Tot houtafval behoren takken, de bast van boomstammen, zaagsel, en vrijkomende houtdelen tijdens de bewerking van hout. Uit gegevens van de Stichting Bosbeheer en Bostoezicht (SBB) blijkt dat 50% van een gevelde boom in het bos blijft liggen, terwijl er tijdens de verwerking van de gezaagde boomstam tot eindproducten, circa 60% houtafval vrijkomt (R. Matai, persoonlijke communicatie, 2013). Vrijgekomen houtafval wordt op grote schaal vaak onverantwoord gedumpt (heel vaak ook in de rivier) of verbrand. Het onverantwoordelijk dumpen en verbranden van houtafval heeft schadelijke invloeden op het milieu: er komen namelijk broeikasgassen vrij die voor een snellere opwarming van de aarde zorgen. Deze snelle opwarming heeft op zijn beurt weer schadelijke gevolgen voor de mens en de aarde. Met het houtafval doen houtbedrijven weinig nuttige dingen, terwijl houtafval een belangrijke energiedrager is.

Door houtproducten, middels bijvoorbeeld houtdroging, te verwerken tot een product van betere kwaliteit, kan de vraag naar zulk een product toenemen. Een positief gevolg hiervan is dat eventueel de inkomsten voor het land uit deze sector hierdoor zullen toenemen. Voornamelijk houtbedrijven willen hun houtproductie op peil houden, kwalitatief goede producten leveren en tegelijkertijd ook de hiermee gepaarde energiekosten laag houden. Een optie om dit te kunnen doen is om uit houtafval energie te winnen, die aangewend kan worden voor bijvoorbeeld het bedienen van een houtdroger (zie het blokschema in bijlage A).

### ***Probleemstelling en doelstelling***

Uit het bovenstaande wordt geconstateerd dat bij de verwerking van een boom tot eindproduct 80% aan houtafval vrijkomt. Met het in acht nemen van data betreffende de houtproductie de laatste jaren, kan gesteld worden dat er veel houtafval vrijkomt.

De probleemstelling luidt als volgt: houtafval, een energiedrager, komt veelal op een onverantwoorde wijze én onbenut in het milieu terecht.

Het doel van dit afstudeerproject is om in houtbedrijven een installatie toe te passen die bio-energie uit houtafval kan aanwenden voor het bedienen van een houtdroger van desbetreffend bedrijf.

### ***Opbouw van het verslag***

Dit verslag is als volgt opgebouwd:

In hoofdstuk 2 wordt aangegeven waarom hout als energiedrager beschouwd mag worden en op welke manieren de energie die hierin is opgeslagen, getransformeerd kan worden tot bruikbare energie. Hierbij wordt ook globaal aangegeven wat de mogelijkheden zijn om gebruik te maken van hout als energiedrager voor de energievoorziening in Suriname. In hoofdstuk 3 worden de huidige houtproductie en -verwerkingsmethoden in Suriname besproken. Onder andere worden de in ons land meestgebruikte houtdrogingstechnieken, alsook de voordelen van het drogen van hout, besproken. Er wordt, uitgaande van enkele criteria, gekozen voor de “dehumidifier” om hout te drogen. Op grond van onderzoeken in Suriname wordt in hoofdstuk 4 een kritische keuze gemaakt voor een bioverbrandingsinstallatie die toegepast kan worden om de “dehumidifier” te laten werken op energie, vrijgekomen door verbranding van houtafval. Aan de hand van de technische specificaties volgt in hoofdstuk 5 de opbouw van het model en wordt er een kostenplan opgesteld.

Bron: Stichting voor Bosbeheer en Bostoezicht (september 2012), Bosbouw Sector Analyse 2011, Directoraat: Bosbouw Economische Diensten

## 2 Hout als energiedrager

Biomassa omvat verschillende biobrandstoffen die voorkomen in de verschillende aggregatie-toestanden. Uitgaande van de grondstof is hout een tweede generatie biobrandstof. Hout wordt gerekend tot de energiedragers want het bevat chemische energie die nog omgezet moet worden in bruikbare energie. Om meer inzicht te verkrijgen hierin komt in paragraaf 2.1 eerst de stofsamenstelling van hout ter sprake. Hierop aansluitend wordt in paragraaf 2.2 aangegeven waarom hout als biobrandstof beschouwd mag worden. Paragraaf 2.3 haalt de energetische verwerkingsprocessen van houtafval aan, met als doel één proces gestaafd te kiezen. Door verschillende cijfermatige analyses in de Surinaamse houtsector wordt in paragraaf 2.4 een minimale schatting gemaakt van de hoeveelheid vrijkomend houtafval in Suriname.

Bron: Broom, Matthew Mc (2006), *Wood Science, Temple College of Forestry and Agriculture*  
Stephen F. Austin State University, Texas, USA

### 2.1 De stofsamenstelling van hout

De chemische verbindingen in biomassa zijn energierijk. Om te kunnen achterhalen waarom hout een energiedrager is, moeten de eigenschappen en bouwstoffen van hout worden beoordeeld. Deze informatie is ook van belang om analyses te maken die betrekking hebben op het verwerken van hout tot een bepaald eindproduct. In tabel 2 worden de procentuele hoeveelheden van deze stoffen in hout weergegeven (Mc Broom, 2006).

*Tabel 1 De procentuele stofsamenstelling van hout*

Stof	Droog gewicht (%)
Koolstof (C)	49
Waterstof (H)	6
Zuurstof (O)	44
Stikstof (N)	> 0,1
As	0,2 – 0,5

Volgens tabel 2 is hout voornamelijk opgebouwd uit koolstof en zuurstof. De mate waarin deze stoffen aanwezig zijn, is bepalend voor de energetische waarde van hout, die in de volgende paragraaf belicht wordt.

## 2.2 Hout als biobrandstof

Zoals in de vorige paragraaf vermeld, dragen de in hout voorkomende stoffen bij aan een energetische waarde voor hout, die uitgedrukt wordt in:

1. een energetische onderste verbrandingswaarde oftewel (netto) stookwaarde: dit is de warmte die vrijkomt bij verbranding zonder de condensatiewarmte van de verbrandingsgassen mee te rekenen.
2. een energetische bovenste verbrandingswaarde oftewel calorische waarde: dit is de warmte die vrijkomt bij volledige verbranding. Bij deze verbranding wordt de condensatiewarmte van de verbrandingsgassen meegerekend.

Droog hout (hout met een vochtgehalte van minder dan 15%) heeft een calorische waarde van 19,8 MJ/kg, terwijl de stookwaarde van nat hout gelijk is aan circa 8 MJ/kg (Ode & Vito, 2006). Gedroogd hout is dus op grond van de genoemde waarden een betere biobrandstof dan nat hout.

## 2.3 Keuze van het energie-omzettingsproces voor houtafval

Energie-omzettingsprocessen leiden tot de omzetting van chemische energie in houtafval tot bruikbare energie. Paragraaf 2.3.1 beschrijft drie technologieën die deze processen doen geschieden, met als doel één technologie gestaafd te kiezen. In paragraaf 2.3.2 volgt van deze keuze een procesbeschrijving.

Bron: Vogel, Michael, *Housing and Residential Energy Specialist, Heating of Wood: Principles of Combustion*, Montana State University, Extension MontGuide

### 2.3.1 De toe te passen technologie

De technologieën die toegepast worden om houtafval efficiënt te verwerken tot biobrandstof worden in tabel 2 weergegeven.

Tabel 2 Korte omschrijving van de technologieën ter verwerking van hout tot biobrandstof

Technologie	Effectief toevoegsel	Omschrijving van het eindproduct
Vergisting	Bacteriën	<u>Biogas</u> , met een gehalte van 50% tot 70% aan methaan wordt gevormd. Methaan is een fermentatiegas, dus uiterst brandbaar en kan worden bewerkt tot bio-energie.
Vergassing	Een ondermaat van zuurstof	<u>Syngas</u> , een brandbaar gas dat omgezet kan worden in vloeibare koolwaterstoffen, zodat er energie uit gehaald kan worden.
Verbranding	Een overmaat van zuurstof	<u>Warmte</u> die middels diverse methoden omgezet kan worden in bruikbare energie.



Uit tabel 2 blijkt dat vergisting en vergassing brandbare gassen leveren, die evenals vrijkomende warmte bij verbranding nog verwerkt moeten worden tot bruikbare energie. In tabel 3 worden de voornaamste voor- en nadelen van deze technologieën met elkaar vergeleken.

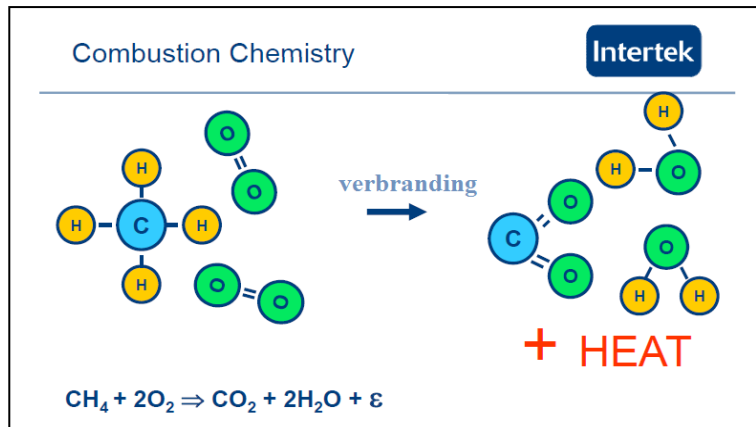
Tabel 3 De voor- en nadelen per technologie

Technologie	Voordelen	Nadelen
Vergisting	Het biogas bevat een zeer laag gehalte aan milieu-schadelijke stoffen.	1. De lignine blijft onafgebroken (Aertsens Joris et al., 2012). 2. Ten opzichte van de overige methoden duurt het relatief langer (minstens 30 dagen) (Bart Naeyaert, 2007).
Vergassing	Houtvergassers zijn een relatief dure investering	Vergassing wordt nog niet toegepast in Suriname. De introductie van deze technologie zal gepaard gaan met dure scholing van personeel en/of het aantrekken van betreffend kader uit andere landen.
Verbranding	Er zijn enkele belangrijke <u>pluspunten</u> : 1. De verbranding is CO <sub>2</sub> neutraal. Bij de verbranding van hout wordt het kooldioxide dat vrijkomt, gecompenseerd door het kooldioxide dat nieuwe jonge bomen op hun beurt uit de lucht halen. Bij de groei van de bomen wordt net zoveel CO <sub>2</sub> opgenomen als er bij de verbranding vrijkomt. Als hout dus verbrand wordt, komt er niet meer koolstofdioxide vrij dan in het natuurlijke proces. 2. Door allerlei fermentatieprocessen worden hout en houtafval afgebroken tot CO <sub>2</sub> als ze niet worden gebruikt door de mens. Bij die natuurlijke afbraak komt eigenlijk een belangrijke hoeveelheid methaan vrij dat eigenlijk veel schadelijker is voor het broeikas effect dan als hout verbrand wordt, want dan komt er geen methaan vrij. 3. Dit proces is vrij bekend en is gemakkelijk aan te leren.	

Uit tabel 3 blijkt dat verbranding ten opzichte van de twee overige technologieën meerdere voordelen en bovendien geen nadelen oplevert. Hierdoor zal de keuze voor het energie-opwekingsproces voor houtafval uitgaan naar verbranding. De volgende paragraaf behandelt het verbrandingsproces.

### 2.3.2 Het verbrandingsproces en bijbehorende parameters

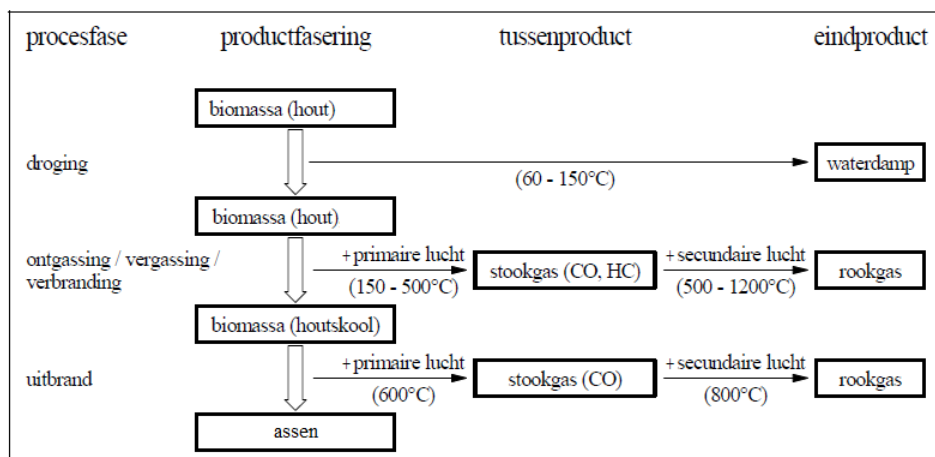
Vaste houtbrandstof in een open vuur verbranden, zet ongeveer 5% van de potentiële energie van het hout om in bruikbare energie. Maar middels efficiënte systemen kan deze omzetting oplopen tot 80% (Greenfacts bos en energie, hoe wordt bio-energie geproduceerd, 2008). Voor iedere volledige verbranding zijn er in bepaalde mate brandstof en zuurstof nodig. Zie figuur 2 voor een reactievergelijking van de volledige verbranding van hout (Rick Curkeet, 2011).



Figuur 2 De reactievergelijking bij volledige verbranding van hout

Uit figuur 2 blijkt dat bij een volledige verbranding van hout er niet alleen warmte ontstaat, maar ook koolstofdioxide en waterdamp.

Houtverbranding kent verschillende fasen. In figuur 3 worden deze fasen schematisch weergegeven (N. Devriendt & P. van der Straeten, 2003).



Figuur 3 Schema van het verbrandingsproces van houtafval

Het verbrandingsproces verloopt in vier deelprocessen, te weten:

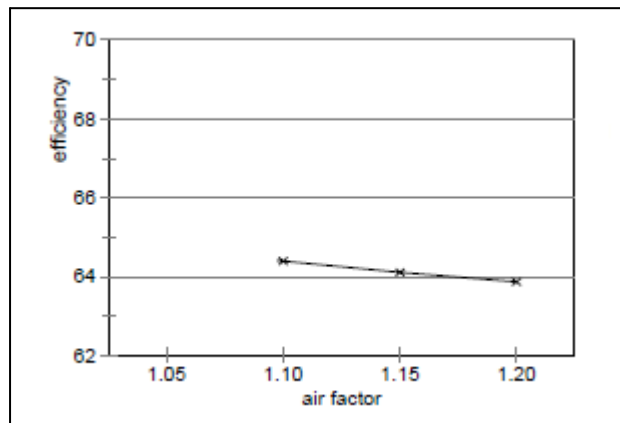
1. droging: er moet warmte aan het hout geleverd worden om het vocht te verdampen. Deze reactie is een endotherme reactie.
2. ontgassing: brandbare houtgassen komen tussen 150 °C en 500 °C vrij.
3. vergassing: samen met zuurstof ontstaat stookgas.
4. verbranding: het stookgas verbrandt, waardoor er rookgassen met een hoge temperatuur gevormd worden.

Bij de processen 2 tot en met 4 komt er warmte vrij; deze processen zijn namelijk exotherme processen.

Enkele belangrijke parameters voor een efficiënte verbranding van houtafval zijn:

**a. Luchtvermaat**

Voor een zo efficiënt mogelijke verbranding is er een overmaat van lucht nodig. Lucht is een samenstelling van gassen en bevat ongeveer 20% zuurstof. De luchtfactor ' $\lambda$ ' is de totale hoeveelheid toegevoegde lucht gedeeld door de theoretisch benodigde lucht voor een volledige verbranding. De maximale vlamtemperatuur wordt bekomen bij  $\lambda = 1$ . Bij een luchtconcentratie  $\lambda < 1$ , dus bij een tekort aan lucht is de verbranding onvolledig en daalt de temperatuur. Bij  $\lambda > 2$  is er een luchtvermaat en koelt de vlam af (A. Dadkhah-Nikoo, D. J. Bushnell, 2009). Voor een efficiënte verbranding van het houtafval moet de  $\lambda$  liggen tussen 1,10 en 1,20 (N. Woudstra, n.d.). In figuur 4 wordt het verband tussen de  $\lambda$  en het thermische rendement van de verbranding grafisch weergegeven.

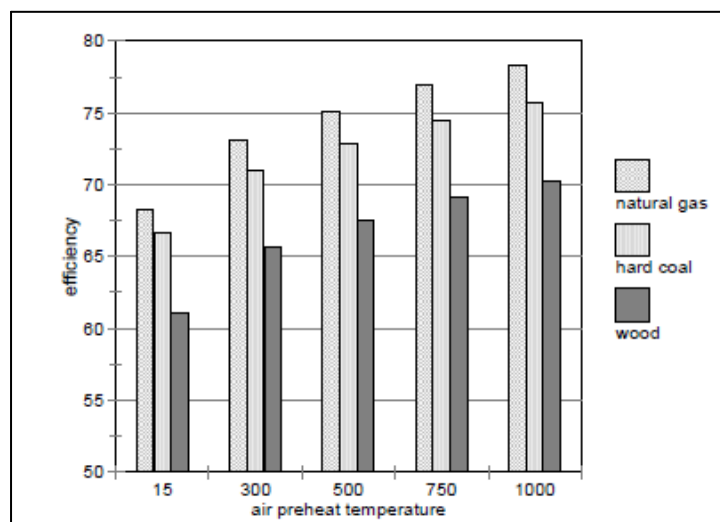


Figuur 4 Het verband tussen de luchtfactor  $\lambda$  en het exergierendement

Uit figuur 4 blijkt dat bij toename van de  $\lambda$  van 1,10 tot 1,20 het thermische rendement afneemt van circa 64,3% tot circa 63,8%.

**b. Voorverwarming van de aangevoerde lucht**

Figuur 5 geeft het verband aan tussen de temperatuurwaarde van voorverwarmde lucht en het thermische rendement van de verbranding van aardgas, steenkool en hout (N. Woudstra, n.d.).



*Figuur 5 Het verband tussen de voorverwarming van lucht en het exergetische rendement bij enkele brandstoffen*

Het staafdiagram van figuur 5 geeft duidelijk aan dat het thermische rendement bij de verbranding van houtafval, bij voorverwarmde lucht met een temperatuurwaarde van 1000 °C, oploopt tot circa 71%.

Daar de theorie rondom de verbranding van hout beschreven is, zullen in de volgende paragraaf data inzake de houtproductie en de daarmee gepaarde productie van houtafval in Suriname geanalyseerd worden.

## 2.4 Mogelijkheden in Suriname

De houtsector in Suriname biedt werkgelegenheid aan ruim 2% van de beroepsbevolking (ongeveer 5000 mensen). Volgens een onderzoeksrapport van SBB (R. Matai, 2013) zijn er 79 actieve en niet-actieve zagerijen, één triplexfabriek, 113 houtmarkten en 91 meubel- en timmerbedrijven in het land. Suriname kent twee vormen van houtverwerking, te weten de verwerking van rondhout tot gezaagd hout of tot triplex. Om een beeld te verkrijgen van de hoeveelheid beschikbare houtafval, staat er in paragraaf 2.4.1 een analyse van de houtproductie.

### 2.4.1 De productie van hout en houtafval

De houtproductie bestaat uit verschillende assortimenten: zie tabel 4 voor zo'n overzicht en de productie per assortiment (voor het jaar 2012 zijn nog niet alle statistieken bekend). Onder het assortiment 'industriële rondhout' vallen de boomstammen van geveld bomen. De overige houtassortimenten vallen onder 'niet-industriële rondhout'. (Bosbouw Analyse 2011, 2012).

Tabel 4 geeft cijfermatig aan dat industrieel rondhout het meest wordt geproduceerd.

*Tabel 4 Houtproductie per assortiment*

Assortiment	Volume (m <sup>3</sup> ) 2010	Volume (m <sup>3</sup> ) 2011
Rondhout (industrieel)	235.830	347.566
Vierkant bekapte palen	1.225	1.281
Korte draadpalen	3.766	3.801
Shingels	7	18
Gezaagd hout	5.330	13.049
Brandhout	1.079	527
Houtskool	140	153
<b>Totaal</b>	<b>247.377</b>	<b>366.395</b>

Uit recente onderzoeksmetingen van SBB (januari/februari 2013) is gebleken dat:

1. van een gevelde boom, circa 50% van de oorspronkelijke boom onbenut achtergelaten wordt in het bos. Dit percentage bestaat uit takken, bladeren, ‘slecht’ deel van de boom en de boomstomp.
2. 40% van de gevelde boom tot eindproduct wordt verwerkt. De overige 60% is afval.
3. van een gevelde boom ten slotte slechts 20% tot bruikbaar hout wordt geproduceerd.

Afhankelijk van de omvang van de bedrijfsactiviteiten kan een houtzagerij 600 m<sup>3</sup> tot 3000 m<sup>3</sup> houtafval per jaar produceren. Kleinere houtverwerkingsbedrijven produceren per jaar minstens 250 m<sup>3</sup> houtafval. Verzamelde data aangaande de rondhoutproductie en houtexport vanaf het jaar 2009 worden tabellarisch in tabel 5 weergegeven. Tevens is de geschatte productie van houtafval berekend: er is uitgegaan van de minimale houtafvalproductie van 50%. Per niet-industrieel rondhoutassortiment is het onbekend wat de werkelijke productie van houtafval is. Door het ontbreken van betrouwbare meet- en inventarisatiemethoden in de periode vóór 2009, zijn er geen exacte numerieke gegevens beschikbaar over de productie van niet-industrieel rondhout.

*Tabel 5 De productie van rondhout en houtafval*

Jaar	Totale rondhout-productie (m <sup>3</sup> )	Totale houtafval-productie (m <sup>3</sup> )	Volume houtexport (m <sup>3</sup> )	Exportinkomsten (US\$)
2009	207.388	207.388	34.276	5.180.300
2010	247.377	247.377	54.157	8.299.977
2011	366.395	366.395	98.359	14.260.359
1 <sup>e</sup> helft 2012	166.016	166.016	62,734	9,056,986
	166.016	166.016	62,734	9,056,986

Uit de cijfers van tabel 5 blijkt dat de houtproductie de laatste jaren stijgende is. De productie van houtafval is op z'n minst gelijk aan de houtproductie en toont vanzelfsprekend ook een stijgende trend. Door de SBB is voorspeld dat de houtproductie zal blijven stijgen en in 2014 wordt de houtproductie geschat op 500.000 m<sup>3</sup>. De gemiddelde hoeveelheid aan houtafval dat jaarlijks wordt geproduceerd is volgens tabel 5 gelijk aan circa 282.050 m<sup>3</sup>. Tevens blijkt dat in de genoemde jaren de export van hout is toegenomen, alsook de verdiensten hiervan.

Het land genereert ook inkomsten uit de houtsector door lokale omzet. Het drogen van hout levert een kwalitatief goed eindproduct op, waardoor het land meer inkomsten kan genereren door de verkoop/export van zulk een product. In hoofdstuk 3 worden verschillende houtdrogingstechnieken behandeld, waarvan één gestaafd toegepast zal worden in de verbrandingsinstallatie behorend bij dit verslag.

### 3 Houtdrogingstechnieken

Omgehakte bomen bevatten over het algemeen vocht. Dit vochtgehalte (“moisture content”, afgekort ‘MC’) is hoofdzakelijk afhankelijk van de dichtheid van het hout en is hierdoor per houtsoort verschillend. Houtsoorten met een grotere dichtheid hebben namelijk een hogere MC dan houtsoorten met een kleinere dichtheid. Om hout te verduurzamen zijn er verschillende houtdrogingstechnieken die hiertoe leiden. Hout wordt hierbij op controleerbare wijze gedroogd totdat een specifiek MC van minder dan 20% wordt bereikt (BS 7543, EN 14298) (Dr. Jos Evertsen, Gordon Knaggs, John O’Dea, Peter Ebdon, Len Gallagher, 1997). Een uitvoerige beschrijving van het houtdrogingsproces volgt in paragraaf 3.1, waarna er in paragraaf 3.2 op basis van enkele criteria één houtdrogingstechniek wordt gekozen behorend bij dit verslag. Het hoofdstuk wordt afgesloten met een resumé.

#### 3.1 Het houtdrogingsproces

Hout droogt vanaf het moment dat het gekapt is. Gekapt hout blijft drogen totdat de vochtigheid ervan in evenwicht is met die van de omgeving. Vanwege deze eigenschap is hout een hygroscopisch materiaal (Dr. Jos Evertsen et al., 1997).

##### *Parameters waarvan de verandering in MC afhankelijk is*

De verdamping van het vocht in hout is afhankelijk van drie belangrijke parameters:

1. de relatieve vochtigheid (“Relative Humidity”, afgekort “RH”),  
Hoe lager de RH van de omringende lucht, des te gunstiger het drogingsproces verloopt. In regenweer bijvoorbeeld is de RH hoog en dit is ongunstig voor het drogingsproces.
2. de omgevingstemperatuur,  
De RH is sterk afhankelijk van de temperatuur van de omringende lucht. Hoe hoger de omgevingstemperatuur, des te groter de capaciteit van lucht om vocht te doen verdampen.
3. de lichtsnelheid.  
Vanwege het feit dat de omringende lucht van ‘nat’ hout vochtig is, is het van belang dat er een goede luchtcirculatie plaatsvindt.

Hout kan op verschillende manieren gedroogd worden:

1. op natuurlijke wijze: luchtdrogen.

2. op kunstmatige wijze door middel van een oven (een “kiln”). Er zijn verschillende typen houtdrogers. Echter zullen er twee typen (de “heat and vent kiln” en de “dehumidifier kiln”) die in Suriname worden gebruikt aan de orde komen.

### ***ad. 1 Luchtdrogen***

#### *Principe*

Hout wordt in lagen in de open lucht opgestapeld. Onderlinge lagen worden gescheiden gehouden middels stukken hout die “stickers” worden genoemd. Hierdoor is luchtcirculatie tussen de houtlagen mogelijk. Afhankelijk van de eerdergenoemde drie parameters ontstaat er een dampverschil tussen het hout en de omringende lucht, waardoor het vocht uit nat hout vrijkomt en weggevoerd wordt (het vocht verdampt). Luchtdrogen kent twee grote nadelen:

- Het drogingsproces duurt ongeveer twee jaren, wat relatief lang is ten opzichte van ontwikkelde technieken die de drogingstijd minimaliseren tot maximaal zes weken.
- Het drogingsproces is sterk afhankelijk van de weersomstandigheden. Het drogingsproces geschiedt óf te snel óf heel langzaam. Een te snel drogingsproces beïnvloedt de kwaliteit van het hout negatief, terwijl een te langzaam proces gepaard gaat met veel kosten.

### ***ad. 2 “Kiln” drogen***

#### *Principe*

Hout wordt in lagen in een gesloten ruimte, een zogenaamde ‘droogkamer’, opgestapeld om zo snel als mogelijk te kunnen drogen zonder dat de kwaliteit van het hout eronder lijdt. Kunstmatige houtdroging kent twee voordelen:

- Het proces duurt drie tot zes weken.
- Het is mogelijk om de parameters verantwoordelijk voor de duur van het drogingsproces volledig te controleren.

De twee typen kiln drogers die in Suriname gebruikt worden, zijn:

1. de “heat and vent kiln” droger (zie de beschrijving in subparagraaf 3.1.1)
2. de “dehumidifier” droger (zie de beschrijving in subparagraaf 3.1.2)

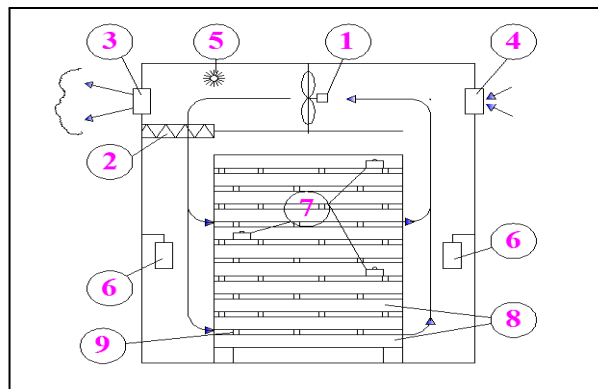
#### **3.1.1 De “heat and vent kiln”**

Om vocht uit hout te laten verdampen, is er thermische energie voor nodig (“heat”). Bovendien moet de waterdamp aan de oppervlakte van het hout afgevoerd worden door luchtstroming



(“vent”) en door vermindering van de RH in de ruimte. Vandaar dus de naam “heat and vent” (zie figuur 6). In de “heat and vent kiln” droger wordt het drogingsproces dus versneld door de drie eerdergenoemde parameters te beïnvloeden:

1. de RH wordt geregeld door temperatuurregeling in de droogkamer en door vocht uit/in de ruimte te onttrekken of te injecteren.
2. in de droogkamer vindt er verwarming plaats, waardoor de temperatuur van de lucht rondom het te drogen hout toeneemt.
3. middels ventilatoren vindt er een sterke uniforme luchtstroming plaats tussen de stapels hout.



Figuur 6 Een schematische weergave van de “heat and vent kiln” droger

Legenda behorende bij figuur 6:

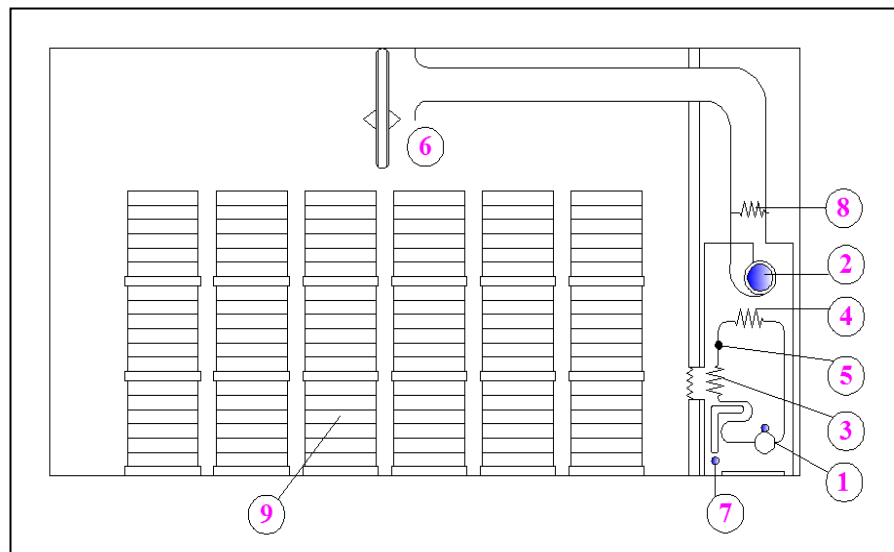
1 = fan	4 = luchtinlaat	7 = elektroden
2 = warmtewisselaar	5 = sproeier	8 = te drogen hout
3 = ventiel voor de uitlaat	6 = vochtigheidssensoren	9 = “stickers”

### 3.1.2. De “dehumidifier” dryer

De “dehumidifier” (DH) is een ontvochtiger voor hout, waarvan de houtdrogingsprincipes overeenkomen met die van de “heat and vent kiln” droger (Dr. Jos Evertsen et al., 1997). Echter is er een verschil in het mechanisme dat effect heeft op het drogen van het hout. Heel belangrijk is de algemene lage temperatuur waarbij een DH werkt, zodat de meeste drogingschema’s gewijzigd moeten worden om te kunnen voldoen aan de bedrijfsomstandigheden van de systemen.

Een DH werkt net als een koelkast, maar met als doel om het vochtigheidsgehalte in de lucht te verlagen en niet de temperatuur van de lucht. Hoe warmer de lucht wordt, hoe groter de capaciteit ervan is om vocht af te voeren. Dus als warme vochtige lucht wordt afgekoeld zal de RH ervan toenemen. Als de RH gelijk is aan 100% en de temperatuur maar dalende is totdat het

dauwpunt wordt bereikt, wordt er water gevormd. De DH wordt hierom ook wel de “heat pump system” genoemd. Zie figuur 7.



Figuur 7 Een schematische weergave van de “dehumidifier” droger

Legenda behorende bij figuur 7:

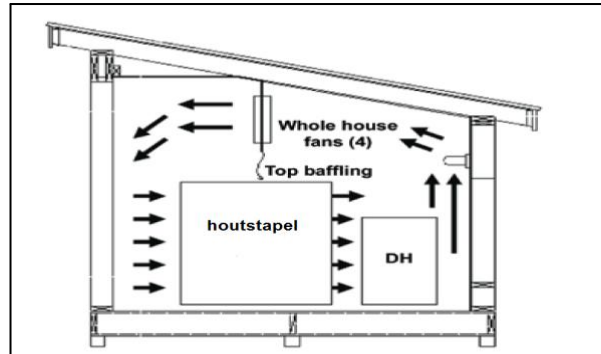
- |                |                  |                             |
|----------------|------------------|-----------------------------|
| 1 = compressor | 4 = condensor    | 7 = waterafvoer             |
| 2 = ventilator | 5 = stuurventiel | 8 = ondersteunende verhitte |
| 3 = verdamper  | 6 = ventilator   | 9 = houtstapel              |

### **Uitleg van de werking van de DH**

Het koelmiddel aan de zijkant van de instroom van het stuurventiel (5) is in samengeperste vloeibare vorm. De uitstroom van het koelmiddel vindt gecontroleerd bij verminderde druk plaats en expandeert en verdampt in de verdamper (3). Energie wordt in de vorm van warmte uit de omgeving aangeleverd om de vloeistof te laten verdampen. Lucht komt via kleppen uit de oven in de verdamper terecht, waar die afkoelt en gauw vocht in de vorm van condensaat verliest. Dit condensaat wordt afgevoerd (7). De compressor (1) comprimeert het koelgas terug naar vloeibare vorm in de condensor (4). Na compressie geven gassen warmte af. Dus de vrijgekomen warmte-energie in de verdamper wordt vrijgegeven in de condensor. De koelere en drogere lucht passeert nu de kleppen in de condensor, wordt warmer en de relatieve vochtigheid wordt verder teruggedrongen.

Als de compressor heel warm wordt kan die worden afgekoeld door droge lucht middels ventilatoren te laten passeren over koelribben. Bovendien resulteert dit in een verdere opwarming van

de lucht op zijn terugweg naar de droogkamer. Typische wijzigingen in RH en temperatuur worden weergegeven in een grafiek. Behalve energiebesparingen, bereikt door het gebruik van een dergelijk warmteherstelsysteem, is ontluchting geen vereiste om de vochtigheid van het systeem te verminderen. In figuur 8 wordt er een zij-aanzicht weergegeven van dit systeem.



Figuur 8 Zij-aanzicht van het drogen van hout met behulp van de “dehumidifier”

In figuur 8 is de stroming van de lucht in de kiln weergegeven door de vetgedrukte pijlen. Tevens is de locatie van het te drogen hout en de “dehumidifier” (DH) aangegeven. De DH kan als het ware op simpele wijze gesitueerd worden. In de volgende paragraaf zal op grond van de verschillen tussen de genoemde houtdrogingstechnieken een keuze gemaakt worden van het houtdrogingsproces welke afhankelijk zal zijn van de te ontwerpen installatie.

### 3.2 Keuzecriteria voor het te kiezen proces

Het houtdrogingsproces zal deel zijn van de toe te passen verbrandingsinstallatie. Terugblikkend op de nadelen van natuurlijke luchtdroging, zal van dit proces afgezien worden. Er zal dus een keuze moeten worden gemaakt tussen de “Heat and vent kiln” droger en de “Dehumidifier kiln” droger. In tabel 6 worden de verschillen tussen deze twee soorten houtdrogers weergegeven om zodoende een keuze vast te stellen.

Tabel 6 Verschillen tussen de “Heat and vent kiln” en de “Dehumidifier kiln” droger

Parameter	“Heat and vent kiln” droger	“Dehumidifier kiln” droger
Temperatuur	Regeling middels verwarmers, ventielen in het dak en stoominlaat.	Regeling middels verwarmers, restwarmte van de ontvochtiger en ventielen.
RH	Regeling middels verwarmers, ventielen in het dak en stoominlaat.	Regeling door een ontvochtiger.
Ventielen	Als de ventielen openstaan, vindt er warmteverlies plaats.	De ventielen zijn niet debet aan warmteverlies.

Minimaal volume van het te drogen hout	4 m <sup>3</sup> tot 5 m <sup>3</sup> .	2 m <sup>3</sup> tot 3 m <sup>3</sup> .
Bediening	Grotendeels geautomatiseerde monitoringssystemen met controlepanelen.	De ovens zijn over het algemeen: <ul style="list-style-type: none"> <li>– goedkoper,</li> <li>– gemakkelijk te verplaatsen,</li> <li>– minder complex,</li> <li>– eenvoudiger te onderhouden en</li> <li>– gemakkelijk te bedienen.</li> </ul>
Drogingsproces	Houtdroging geschiedt sneller.	De droging geschiedt langzamer.

Gelet op het gemak van de bediening, de minimale grootte van de kilndroger en het optredende warmteverlies in tabel 6, gaat de keuze uit naar de DH kiln. Bovendien is uit onderzoek gebleken dat van alle houtbedrijven in Suriname die hout op kunstmatige wijze drogen, slechts één bedrijf (Rudisa) de “heat and vent kiln” droger gebruikt. De DH wordt in Suriname dus het meest gebruikt. Een model dat in Suriname in het bedrijf van Ramzons N.V. wordt gebruikt, is de PM600, een in Engeland vervaardigde DH (<http://www.scosarg.com/parmatam-pm600-20cbm-kiln-kit-softwood-beech.html>).

### **Resumé**

Voor de toe te passen bioverbrandingsinstallatie is nu bekend:

1. dat er relatief veel houtafval beschikbaar is om volgens een thermodynamisch systeem verbrand te kunnen worden voor de indirecte ‘voeding’ van de installatie (hoofdstuk 2).
2. dat de elektrische bediening van de DH afgestemd zal worden op deze installatie (hoofdstuk 3).

Vrijgekomen warmte bij verbranding van houtafval moet dus omgezet worden in elektrische energie om de DH in bedrijf te stellen. In hoofdstuk 4 wordt er nader hierop ingegaan om uiteindelijk een passend werktuig te kiezen hiervoor.

## 4 De energie-omzetting in een stirlingmotor

Zoals eerder gesteld is, komt er bij de verbranding van houtafval thermische energie vrij. Om de DH in werking te stellen, is er elektriciteit voor nodig. De vrijgekomen thermische energie dient dus in elektrische energie omgezet te worden. Voor deze energie-omzetting zijn er verschillende mogelijkheden die in paragraaf 4.1 in het kort worden beschreven. Op basis van keuzecriteria wordt een systeem gekozen: de stirlingmotor. Paragraaf 4.2 beschrijft de algemene opbouw en de types van deze motor. Aan het einde van de paragraaf volgt een kritische keuze van één type uit dit systeem die dan in paragraaf 4.3 gedetailleerd wordt beschreven.

### 4.1 Keuzecriteria voor de energie-omzetting

Thermische energie omzetten in elektrische energie kan direct of indirect geschieden (Ode & Vito, 2006). In tabel 7 wordt een dergelijk overzicht gegeven.

Tabel 7 Korte beschrijving van de methoden ter omzetting van warmte in elektriciteit

	Methoden	Werkingsprincipe	Meest voorkomende toepassing(en)
<b>Directe omzetting</b>	- Thermokoppel	De werking berust op het Seebeck-effect. Temperatuurverschil wordt op het grensvlak van twee metalen of half-geleiders direct omgezet in potentiaalverschil.	In temperatuursensoren.
	- Brandstofcellen	De omzetting is gebaseerd op een chemische reactie tussen pure waterstof en zuurstof.	Breed toepassingsgebied zoals nichetoepassingen in de ruimtevaart en op militair gebied. Grootschalige toepassingen in de "portable", de stationaire en de transportsector.
<b>Indirecte omzetting</b>	Warmtekrachtkoppelingen (WKK)	Warmte wordt eerst omgezet in mechanische energie en dan in elektriciteit.	Er bestaan verschillende systemen, zoals: a. de stoommotor b. de stoomturbine c. de organische rankine cyclus d. de stirlingmotor

Op basis van de weergave van het verkorte werkingsprincipe en de meest voorkomende toepassingen per energie-omzettingmethode in tabel 7 zal tabellarisch in tabel 8 een toepassing van één methode worden gekozen.

Tabel 8 Keuzecriteria voor het te kiezen systeem

Methodetoepassing	Keuzecriteria	Gekozen?
Thermokoppel	Thermokoppels werken het best in instrumenten voor temperatuurmetingen. De verbranding van het houtafval zou volgens dit principe op het grensvlak moeten plaatsvinden. Dit is helaas moeilijk te realiseren.	NEE
Brandstofcellen	Uitgaande van hun werkingsprincipe is er waterstof nodig. Tijdens de verbranding van houtafval is waterstof geen eindproduct. Bovendien zijn ontwikkelingen binnen dit gebied nog gaande.	NEE
WKK: a. de stoommotor b. de stoomturbine c. de organische rankine-cyclus  d. de stirlingmotor	De systemen a, b en c berusten op het gebruik van een ketel. In vergelijking met overige operationele systemen in Suriname zijn ketel-systemen ingewikkelde systemen. Vooral op het gebied van de bediening, eisen ze de nodige “skills en know-how”.  Dit is een verbrandingsmotor waarvan de werking gebaseerd is op expansie van afgesloten lucht door verwarming en compressie door afkoeling. De warmte die bij de verbranding van houtafval vrijkomt, kan gebruikt worden voor het expansieproces. Dit systeem is vanwege zijn constructie minder ingewikkeld en gemakkelijk te bedienen ten opzichte van a,b en c. Op basis van de theorie kunnen de “skills en know how” makkelijker aangeleerd worden.	a, b en c: NEE  JA

Uitgaande van tabel 8 wordt de keuze gemaakt: de omzetting van warmte naar elektriciteit zal indirect geschieden en wel met behulp van een bepaalde toepassing van warmtekrachtkoppeling, met name de stirlingmotor. Echter bestaan er verschillende types stirlingmotoren (Dr. John Walsh, 2012). In de volgende paragraaf zullen de verschillende types besproken worden. Op grond van hun bouw en bediening zal de keuze uitgaan naar één type.

## 4.2 De stirlingmotor

De stirlingmotor werd in 1816 uitgevonden door dominee Robert Stirling, die streefde naar een veiliger alternatief voor de stoommotoren. In die tijd ontploften de stoomketels vaak als gevolg van de hoge stoomdruk en beperkingen aan de primitieve beschikbare materialen. Net als andere verbrandingsmotoren zet de stirlingmotor warmte-energie om in mechanische energie. Stirlingmotoren zijn opgebouwd uit vijf algemene componenten die behandeld worden in paragraaf 4.2.1. Tevens wordt de stirlingcyclus behandeld. Paragraaf 4.2.2 somt de voor- en de nadelen van stirlingmotoren op.

### 4.2.1 Kenmerk en de algemene opbouw

#### *Kenmerk*

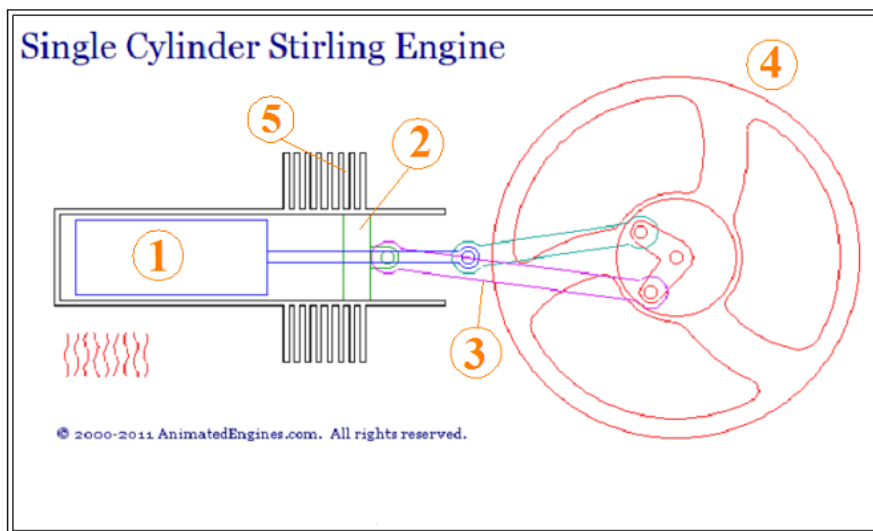
Het essentiële kenmerk van de stirlingmotor is dat het een externe verbrandingsmotor is, waarvan de stirlingcyclus een gesloten cyclus is (Walsh, John, 2012). Dit houdt in dat:

1. de motor gebruikmaakt van een werkmedium met een constante massa die afgesloten is in een goed afgesloten cilinder. Het werkmedium is meestal lucht, maar ook andere gassen mogen gebruikt worden.
2. de warmte die wordt verbruikt door de motor extern wordt toegevoerd. Hierdoor kan de motor uitgevoerd worden op elke warmtebron, zoals fossiele brandstoffen, hete lucht, zonne-energie, chemische en nucleaire energie.
3. aangezien de nodige warmte afhankelijk is van een constante vlam en niet van explosies, zoals in een interne verbrandingsmotor, loopt de motor geruisloos.

#### *De algemene opbouw*

Een stirlingmotor is opgebouwd uit vijf belangrijke componenten (zie figuur 9) (David Haywood, n. d.):

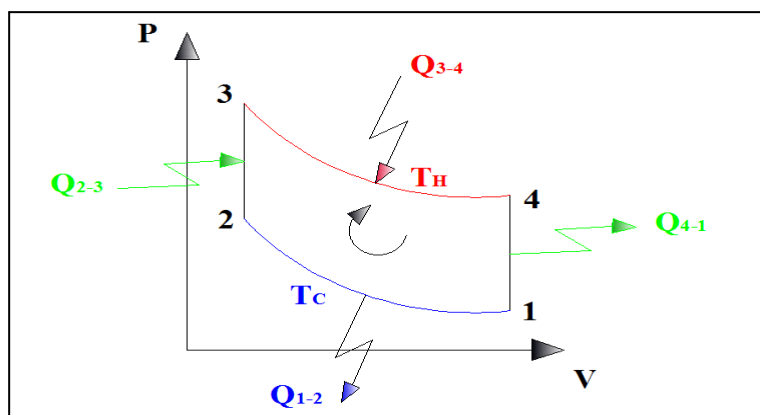
- a. het gas dat in de machine deel uitmaakt van de thermodynamische processen.
- b. twee warmtewisselaars die gebruikt worden voor het warmtetransport vanuit de buitenkant van het systeem (warmte absorberende warmtewisselaar) naar het gas in de machine (warmte afgevende warmtewisselaar).
- c. een regenerator (1). Bij isochore temperatuursdaling neemt een regenerator de warmte uit de lucht op. Bij de isochore temperatuurstijging wordt de warmte in de regenerator opgeslagen en dan weer aan de lucht afgegeven. De regenerator is een soort “warmtespons”, hij moet goed warmte kunnen opslaan. De regenerator kan bijvoorbeeld bestaan uit staalwol, geperforeerde staalplaat of traliën.
- d. Een “displacer”, een verdringermechanisme (1). Dit onderdeel verplaatst het gas in de machine tussen het warme en het koude gedeelte van de motor. Het koude gedeelte van de motor kan voorzien zijn van koelribben (5). De “displacer” kan tegelijkertijd als regenerator functioneren.
- e. een expansie/compressie mechanisme, de arbeidszuiger (2). De zuigerstang is middels een krukas (3) bevestigd aan een vliegwiel (4) om zodoende het vermogen van de motor over te dragen. Afhankelijk van de beweging van de zuiger wordt het gas in de motor geëxpandeerd of gecompriëerd.



Figuur 9 Schets van een stirlingmotor

### De stirlingcyclus

De ideale stirlingmotorcyclus bestaat uit vier thermodynamische processen (twee constante temperatuur- en twee constante volumeprocessen) welke het gas in de cilinder beïnvloeden. In figuur 10 is in een P – V diagram de gehele thermodynamische stirlingcyclus weergegeven.



Figuur 10 P – V diagram van een stirlingproces

Nadere toelichting op figuur 10:

- 1-2: isothermische compressieproces. De arbeid  $W_{1-2}$  wordt uitgeoefend op het gas. Dezelfde hoeveelheid warmte  $Q_{1-2}$  wordt door het systeem afgevoerd naar het koelgedeelte. Het gas koelt af en comprimeert bij een constante temperatuur  $T_c$ .
- 2-3: constant volumeverplaatsingsproces met toevoer van warmte. Warmte  $Q_{2-3}$  wordt geabsorbeerd door het afgesloten gas en de temperatuur stijgt van  $T_c$  naar  $T_H$ . Er wordt



geen arbeid verricht.

- 3-4: isothermische expansieproces. Arbeid  $W_{3-4}$  wordt uitgeoefend door het gas. Dezelfde hoeveelheid warmte  $Q_{3-4}$ , afkomstig van de verbranding van het houtafval, wordt aan het systeem toegevoerd. Het gas wordt verwarmd en zet uit bij een constante temperatuur  $T_H$ .
- 4-1: constant volumeverplaatsingsproces met afvoer van warmte. Warmte  $Q_{4-1}$  wordt afgevoerd door het gas en de temperatuur neemt af van  $T_c$  naar  $T_H$ . Er wordt geen arbeid verricht.

De thermodynamische cyclus is bij benadering gelijk aan de Carnotcyclus en het thermische rendement  $\eta_{th}$  van de motor mag als volgt berekend worden:

$$\eta_{th} = \left(1 - \frac{T_L}{T_H}\right) \times 100 \%$$
  $T_L$  staat voor de temperatuur van het werkmedium aan de koude zijde van de cilinder en  $T_H$  staat voor de temperatuur van het werkmedium aan de hete zijde van de cilinder.

#### 4.2.2 Voor- en nadelen van de stirlingmotor

De verschillende types stirlingmotoren hebben gemeenschappelijke voor- en nadelen. Voordelen zijn (N. Naddaf, 2012):

1. De kans op explosies in een stirlingmotor is heel miniem, vanwege de volgende feiten:
  - Er hoeft geen stoom in een hoge drukketel geproduceerd te worden.
  - Er is maar één soort gas nodig, dus geen vermenging met benzine en lucht.
  - Er zijn geen ontstekingen.
  - De zuiger beweegt ook niet ten gevolge van explosies in de cilinder, zoals het gebeurt bij diesel- en Otto-machines.
  - Er zijn geen ventielen nodig.
2. De afgesloten hoeveelheid gas kan lucht, helium, nitrogen of hydrogen zijn. Er is geen bijvulling van gas nodig, omdat de massa van het gas niet verandert.
3. De keuze van warmtebron is willekeurig.
4. Het externe verbrandingsproces kan een continu proces zijn, waardoor er minder emissie plaatsvindt.
5. Stirlingmotoren kunnen zodanig geconstrueerd worden dat ze geen geluiden maken en niet vibreren.

6. Er is geen luchttoevoer nodig.
7. De lagers kunnen aan de koele zijde van de motor geplaatst worden, waardoor ze minder smering behoeven. Het servicen van de motor kan na langere perioden plaatsvinden (dus lage onderhoudskosten).
8. Door verbeterde warmte-efficiëntie, kan een stirlingmotor meer dan 80% efficiënt functioneren.
9. De motor treedt zelfs bij lage drukken in werking.
10. Ruimere opties voor toepassing.

Nadelen van de stirlingmotor zijn:

1. Het vervaardigen van een stirlingmotor kost veel geld, daar de materialen van goede kwaliteit (hittebestendig) moeten zijn. De warmtewisselaar, vooral de ene aan de compressiezijde van de cilinder, moet de hoge temperaturen kunnen weerstaan. Het vervaardigen en assembleren van hogetemperatuurwarmtewisselaars beslaat zeker 40% van de totale vervaardiging van de motor.
2. Deze motor werkt uitstekend bij een vast toerental en vermogen, maar dit resulteert erin dat hij niet snel kan accelereren. Het warme deel van de motor moet immers op voldoende hoge temperatuur gebracht worden voordat de motor op zijn nominaal vermogen komt. In realiteit duurt dit minstens twee minuten.
3. Het afdichten van de machine is extreem moeilijk.

De stirlingmotor biedt meerdere voordelen dan nadelen. De motor zal de vrijgekomen warmte bij de verbranding van houtafval moeten omzetten in mechanische energie. Deze mechanische energie moet dan in een generator omgezet worden in elektrische energie. Voor deze energieverdracht zal er gebruikgemaakt worden van een vliegwiel, zoals geïllustreerd wordt in figuur 9.

### **4.3 Het werkingsprincipe van de verschillende types stirlingmotoren**

Op grond van de werkruimte worden stirlingmotoren onderverdeeld in vier typen. Tabellarisch worden deze typen stirlingmotoren en de bijbehorende fysieke opbouw in tabel 9 weergegeven (David Haywood, n. d.).

Tabel 9 Overzicht van de types stirlingmotoren met bijbehorende opbouw

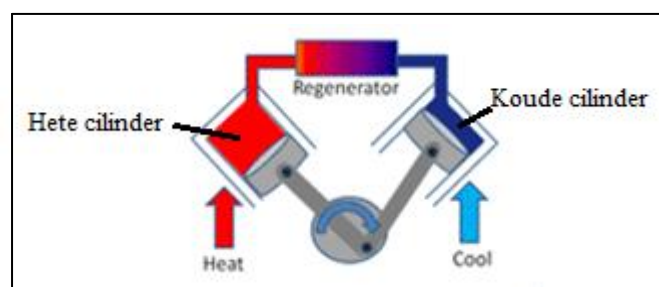
Type motor	Fysieke opbouw
1. De alpha-stirlingmotor	De motor bestaat uit twee aparte zuigers in twee aparte cilinders die verbonden zijn middels een verhitte, een regenerator en een koeler.
2. De beta-stirlingmotor	De beta- configuratie is een klassieke. Deze heeft slechts één zuiger en één cilinder die aan het ene uiteinde wordt verwarmd en aan het andere uiteinde wordt gekoeld.
3. De gamma-stirlingmotor	De gamma-stirlingmotor bestaat uit twee cilinders en één zuiger.
4. De dubbelwerkende stirlingmotor	De motor bestaat uit vier cilinders, die middels warmtewisselaars met elkaar in contact staan.

Echter bestaan er ook andere typen stirlingmotoren, zoals de Rotary stirlingmotor, de Fluidyne pomp en de Ringbompomp. Van deze stirlingmotoren is de configuratie ietwat veranderd. De volgende subparagrafen beschrijven elk het werkingsprincipe van respectievelijk de alpha-, de beta-, de gamma- en de dubbelwerkende stirlingmotor.

#### 4.3.1 De alpha- stirlingmotor

##### *Werkingsprincipe*

Een constante hoeveelheid lucht of ander werkmedium is omsloten door een ‘warme’ en een ‘koude’ cilinder. Het werkmedium shuttelt vooruit en terug tussen de twee cilinders. Hierdoor wordt het werkmedium in de hete cilinder verwarmd en zet het uit. In de koude cilinder wordt het werkmedium afgekoeld en gecomprimeerd, waardoor er arbeid wordt verricht in het proces (zie figuur 11). De twee zuigers zijn verbonden met een krukas, maar hun bewegingen maken steeds weer een hoek van 90° met elkaar. Dus wanneer één zuiger in z'n onderste of bovenste dode punt is, is de andere halverwege tussen de boven- en onderkant.



Figuur 11 Een schets van de alpha- stirlingmotor

### 4.3.2 De beta-stirlingmotor

De beta-stirlingmotor is een configuratie met minder bewegende delen ten opzichte van de overige types stirlingmotoren. Na een beschrijving van het werkingsprincipe van de beta-stirlingmotor, volgt een stapsgewijze uitleg van deze werking ter verduidelijking van de werking van alle types stirlingmotoren.

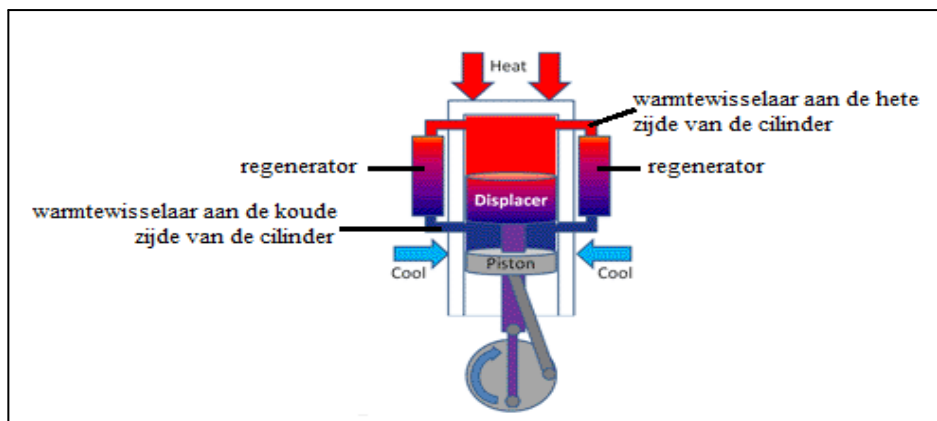
#### *Werkingsprincipe*

De beta-stirlingmotor heeft één cilinder, waarvan het ene uiteinde warm is en het andere uiteinde koel is. Het afgesloten gas wordt middels een “displacer” van het ene uiteinde verplaatst naar het andere uiteinde. De “displacer” lijkt op een grote zuiger, maar heeft een kleinere diameter dan de cilinder. De beweging van de “displacer” verandert het volume van het gas niet. Het gas wordt slechts verplaatst in de cilinder. De figuren 12 tot en met 15 geven de werkingsprincipe van deze motor ook stapsgewijs weer.

#### *Stapsgewijze uitleg van het werkingsprincipe*

##### Stap 1

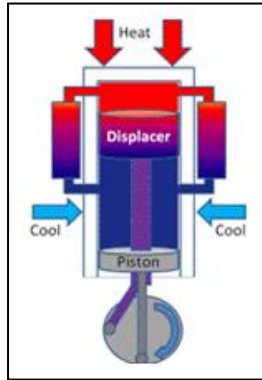
Als het gas in de hete zijde van de cilinder verwarmt, zet het uit en wordt het via de “displacer” verplaatst naar de koude zijde van de cilinder (zie figuur 12). Er is hier sprake van isothermische expansie.



*Figuur 12 Isothermische expansie in de beta-stirlingmotor*

##### Stap 2

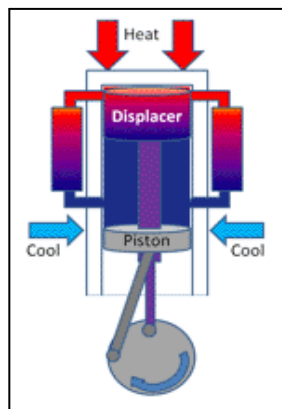
De “displacer” beweegt omhoog, het gas stroomt naar de koude zijde en de arbeidszuiger wordt omlaag geduwd (zie figuur 13). Thermodynamisch is er sprake van volumeverplaatsing met warmteafvoer.



*Figuur 13 Volumeverplaatsing met warmteafvoer*

### Stap 3

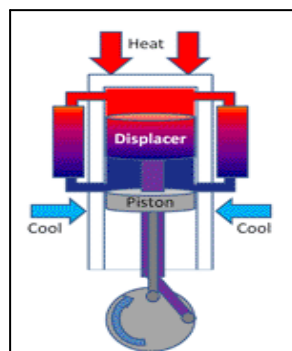
Als de “displacer” het onderste dode punt bereikt, is alle gas verplaatst naar de koude zijde van de cilinder. Het gas koelt daar af en comprimeert. Simultaan volgt de arbeidszuiger de “displacer” omhoog. Er vindt isothermische compressie plaats (zie figuur 14).



*Figuur 14 Isothermische compressie*

### Stap 4

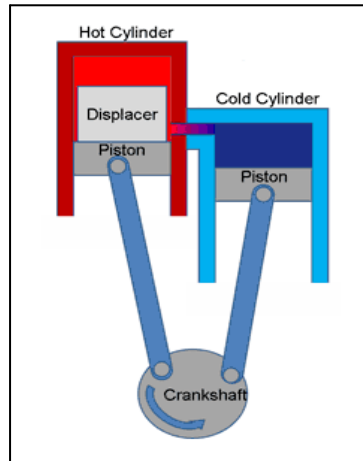
De “displacer” begint omlaag te bewegen, maar de zuiger blijft omhoog bewegen. Het koude werkmedium wordt verplaatst naar de hete zijde van de cilinder (zie figuur 15). Hier is er sprake van volumeverplaatsing met warmtetoevoer. De cyclus herhaalt zich.



*Figuur 15 Volumeverplaatsing met warmtetoevoer*

### 4.3.3 De gamma- stirlingmotor

Deze motor is een configuratie van de beta-stirlingmotor, waarin de zuiger niet coaxiaal is gekoppeld met de “displacer”, maar zich bevindt in een aparte cilinder (zie figuur 16).



Figuur 16 Schets van de gamma- stirlingmotor

#### ***Werkingsprincipe***

Het werkmedium wordt door de zuigers binnen de cilinders gehouden. De zuigers vormen een goede afdichting van het medium met de wanden van de cilinder. De verdringer is een losse passing binnen de hete cilinder en laat door een op- en- neer- beweging het medium via de zijanten stromen. Het werkmedium wordt afwisselend verwarmd en afgekoeld, expandeert en comprimeert tussen de hete en de koude cilinder. Zodoende wordt de energie van het medium overgedragen op de arbeidszuiger in de koude cilinder.

### 4.3.4 De dubbelwerkende stirlingmotor

Deze motor wordt ook wel de “swash plate engine” genoemd en bestaat uit vier cilinders die in verbinding staan met elkaar. Op basis van de manier waarop de cilinders in contact staan, zijn er bij deze configuratie twee mogelijkheden:

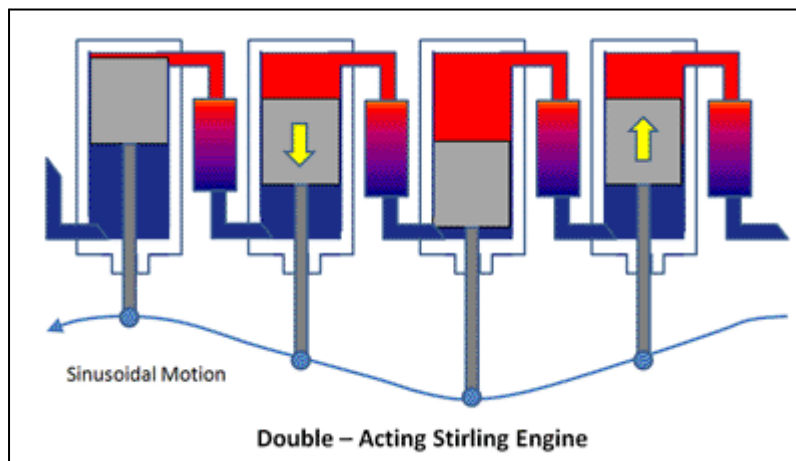
- a. de cilinders kunnen lineair of
- b. in cirkelvorm opgesteld worden.

Ten opzichte van de andere types stirlingmotoren heeft deze configuratie minder bewegende onderdelen en is die beter geschikt voor toepassingen met hogere vermogens.

#### ***ad. a De lineaire opstelling van de dubbelwerkende stirlingmotor***

Het werkmedium wordt heen en weer verplaatst via regenatoren tussen de aangrenzende cilin-

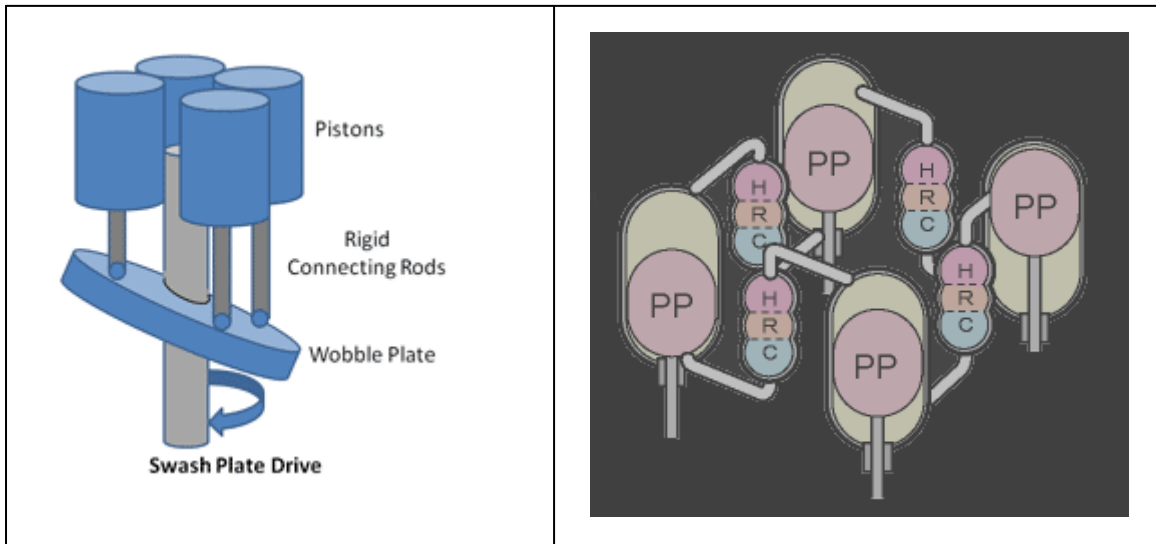
ders. De cilinders zijn aan de bovenkant heet en aan de onderkant koud. Bij deze configuratie zijn er geen “displacers” nodig, omdat de arbeidszuigers de functie hiervan vervullen (zie figuur 17). De cilinders moeten aan beide uiteinden goed afgesloten zijn en de drijfstangen moeten een verzegeling passeren om uit de onderkant van de cilinders te steken. Dit voorkomt dat het werkmedium uit de cilinders ontsnapt. Het voordeel van deze motor is dat de kracht die uitgeoefend wordt door het expanderende medium aan de ene kant van de cilinder wordt aangevuld door de kracht die het gevolg is van de compressie van het medium aan de andere kant. Dus het effectieve drukverschil op de zuigers wordt verhoogd. De beweging van twee opeenvolgende zuigers verschilt steeds weer met  $90^\circ$ . De heen- en- weer- beweging van de zuigers wordt omgezet in de roterende beweging van een “swash plate drive”.



*Figuur 17 Lineaire opstelling van de dubbelwerkende stirlingmotor*

#### ***ad. b De cirkelvormige opstelling***

De cilinders zijn volgens een cirkel rond een roterende as opgesteld. De roterende as is in het centrum van een hellend liggende “swash plate” geassembleerd. Bij rotatie van deze plaat, die ook als een vliegwiel fungeert, blijkt het oppervlak ervan te stijgen en te dalen bij de passering onder de cilinders (zie figuur 18). Deze harmonische beweging is via de drijfstang gekoppeld aan de heen- en- weer- bewegende zuigers.



Figuur 18 Schets van de cirkelvormige opstelling van dubbelwerkende stirlingmotoren

Legenda behorend bij figuur 18:

1. 'H' (staat voor "heater"). Dit is de warmtewisselaar die verantwoordelijk is voor de verwarming en expansie van het werkmedium.
2. 'R' (staat voor "regenerator"). Deze warmtewisselaar zorgt voor 'opslag' van de warmte.
3. 'C' (staat voor "cooler"). Afkoeling van het medium en de hiermee gepaarde compressie zijn een gevolg van deze verkoeler.
4. 'PP' (staat voor "power piston"). Dit stelt de arbeidszuiger voor.

Bronnen: [http://www.mpoweruk.Com/Stirling\\_engine.htm](http://www.mpoweruk.Com/Stirling_engine.htm) en Spotlight on renewable energy by Dr. Irvan Younas, Zayed University, Verenigde Arabische Emiraten.

#### 4.4 De SD4-E DK stirlingmotor

De SD4-E DK stirlingmotor is een reële uitvoering van een bepaald type stirlingmotor die deel zal uitmaken van de bioverbrandingsinstallatie van dit verslag. In subparagraaf 4.4.1 wordt deze motorkeuze op basis van enkele aannames verklaard en in subparagraaf 4.4.2 worden de technische gegevens van deze motor gespecificeerd.

##### 4.4.1 Gehanteerde keuzecriteria voor de SD4-E

Zoals aangegeven in paragraaf 3.2, zal er ter droging van hout gekozen worden voor de ontvochtiger. Bij Ramzons N.V. wordt de PM600 gebruikt, die bestaat uit:

- 1 warmtepomp van 5 kW.



- 5 ventilatoren (“blowers”), elk van 0,75 kW.
- 2 warmtewisselaars (heaters), elk van 4,5 kW.

De ontvochtiger heeft dus in totaal een vermogen van:

$$5 \text{ kW} + (5 \times 0,75 \text{ kW}) + (2 \times 4,5 \text{ kW}) = 17,75 \text{ kW}$$

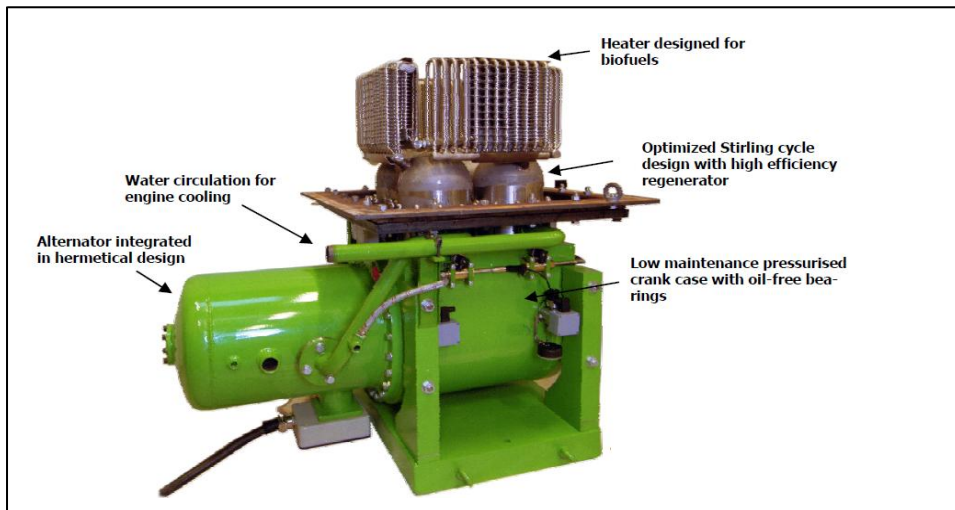
Om uiteindelijk elektrische energie te halen uit de stirlingmotor, moet deze ten eerste gekoppeld zijn aan een vliegwiel of een draaiende schijf. Dit roterende onderdeel moet vervolgens een generator aandrijven, die als functie heeft om de roterende energie om te zetten in elektrische energie. Aangenomen wordt dat:

1. bij de omzetting naar rotatie-energie de optredende energieverliezen verwaarloosd zullen worden. Vliegwielen hebben een maximaal rendement van 98%.
2. bij de omzetting van rotatie-energie naar elektrische energie de generator een rendement heeft van tussen de 80% en de 96%.
3. het te leveren vermogen aan de houtdrogerinstallatie afgerond 20 kW is.
4. de te leveren warmte aan de stirlingmotor afkomstig is van de vrijkomende warmte bij de verbranding van houtafval.
5. uitgaande van het minimale rendement van 80% van de generator, het vermogen van de stirlingmotor gelijk is aan het vermogen van de generator:

$$P_{generator} = \frac{100}{80} \times 20 \text{ kW} = 25 \text{ kW}$$

6. aan de hand van aanname 5 de toe te passen stirlingmotor een minimaal vermogen heeft van 25 kW<sub>el</sub>.

Bij het opzoeken van een dergelijke stirlingmotor met de genoemde specificaties, bleek dat er tot nu toe slechts één reële uitvoering hiervan bestaat: de stirling DK “engine model” SD4-E (zie figuur 19) (<http://stirling.dk>).

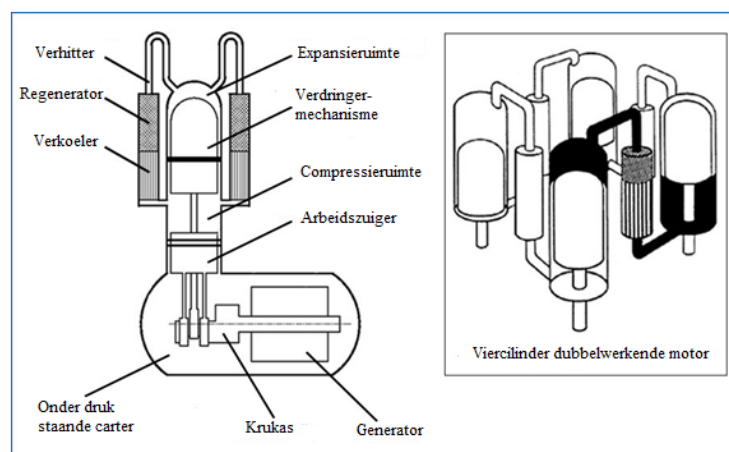


*Figuur 19 De SD4-E DK stirlingmotor*

Uit figuur 19 is duidelijk te merken dat deze motor onder het type dubbelwerkende stirlingmotor valt. Hij bestaat uit vier cilinders en levert elektrische energie met een vermogen van 35 kW. De volgende subparagraaf gaat gedetailleerder in op de technische specificaties van de SD4-E. Op aanvraag kan deze motor aangepast worden om slechts een vermogen van 20 kW te leveren.

#### 4.4.2 Technische specificaties van de SD4-E

De technische specificaties die betrekking hebben op de probleem- en de doelstelling van dit verslag zullen aangehaald worden. De overige specificaties staan in bijlage 2 vermeld. In figuur 20 is de doorsnede van de SD4-E weergegeven.



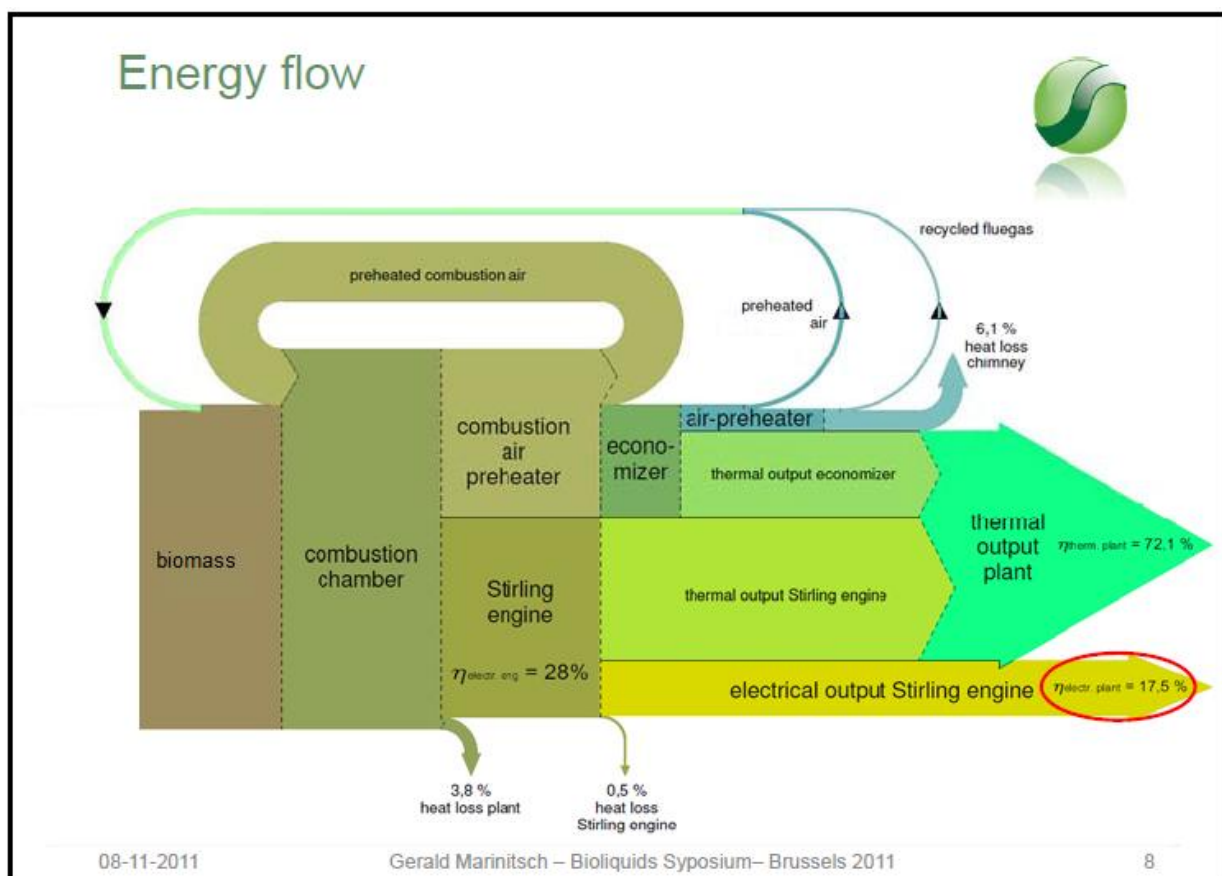
*Figuur 20 Doorsnede van de SD4-E stirlingmotor*

Figuur 20 illustreert dat de werking van deze motor gebaseerd is op de werking van de beta-stirlingmotor. De verhitter staat in direct contact met de warmte die vrijkomt bij de verbranding

van houtafval. De cilinders in de motor zijn gevuld met helium, een inert gas. De SD4-E heeft een levensduur van 100.000 uren, met onderhoudsintervallen van 4.000 uren.

### Rendementen

Het elektrische rendement bedraagt 17,5%. En het thermische rendement bedraagt ongeveer 70%. In figuur 21 worden deze rendementen opgegeven. Figuur 21 geeft verder aan dat de vrijgekomen warmte bij verbranding van houtafval deels voor de stirlingmotor en deels voor de voorverwarming van rookgassen wordt gebruikt. In de stirlingmotor wordt er zowel elektrische energie als thermische energie gegenereerd. De “economizer” is een soort warmtewisselaar die lucht voorverwarmt en een thermisch rendement levert aan de plant (Marinitsch G., 2011).



Figuur 21 Energiestroom en opgave van de verschillende rendementen van de WKK-plant

Tabel 10 geeft een overzichtelijke weergave van de optredende warmteverliezen en de rendementen in de WKK-plant.

Tabel 10 Energiebalans van de warmtestroom in de WKK-plant

Warmtestroom	Warmteverlies (%)	Rendement (%)
Warmtetransport van verbrandingskamer naar stirlingmotor	3,8	
In de stirlingmotor	0,5	
De plant		
Thermisch rendement		72,1
Elektrisch rendement		17,5
In de schoorsteen	6,1	
<b>Energiebalans</b>	<b>10,4</b>	<b>89,6</b>

De WKK-plant heeft dus een totaal rendement van 89,6%.

### Brandstofvoevoer

De geleverde brandstof, met een MC van 40%, heeft een massadebiet van 70 kg/h.

### Warmte-overdracht

Bij warmte-overdracht vindt er overgang van energie plaats onder invloed van een temperatuurverschil. Het aanwezige temperatuurverschil doet de warmte stromen van hoge temperatuur naar lage temperatuur. Dit warmtetransport kan op drie verschillende manieren plaatsvinden, die elk beschreven worden in tabel 11.

Tabel 11 Beschrijving van de drie vormen van warmteoverdracht

Vorm van warmte-overdracht	Omschrijving	Belangrijke parameters	Formule
Geleiding	Het warmtetransport komt op gang door een temperatuurverschil in een object of door warmteoverdracht tussen twee vaste media. De moleculen in een stof geven elkaar energie door, zonder zich te verplaatsen in de ruimte.	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Warmtegeleidingscoëfficiënt 'λ'. Stoffen, zoals metalen, hebben een grote λ-waarde en geleiden dus warmte beter.</li> <li>▪ Oppervlakte 'A'</li> <li>▪ Dikte 'd' van het object</li> <li>▪ Temperatuurverschil 'ΔT'</li> </ul>	$\theta = \lambda \cdot A \cdot \frac{\Delta T}{d}$
Straling	Warmtetransport geschiedt door elektromagnetische golven of deeltjes van een warm object naar een kouder object.	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Gaseigenschappen</li> <li>▪ Temperaturen 'T<sub>H</sub> en T<sub>L</sub>'</li> <li>▪ Emissie-coëfficiënt 'ε'</li> <li>▪ Universele constante 'σ' van Steven Boltzman</li> <li>▪ Oppervlakte 'A'</li> </ul>	$\theta = \varepsilon \cdot \sigma \cdot A \cdot (T_H^4 - T_L^4)$
Convectie	Warmteoverdracht vindt plaats door stroming van	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Gaseigenschappen (r, Cp, viscositeit, dichtheid)</li> </ul>	$\theta = H_c \cdot A \cdot \Delta T$

	vloeistof of gas of door contact binnen een stromend medium.	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Afstand en oppervlakte van de spouwruimte</li> <li>▪ Warmteoverdrachtscoëfficiënt 'Hc'</li> <li>▪ <math>\Delta T</math></li> <li>▪ Snelheid van het medium</li> </ul>	
--	--	--	--

De metalen warmtewisselaars in de SD4-E stirlingmotor zijn verantwoordelijk voor het warmte-transport. Volgens tabel 10 vindt dus de warmte-overdracht in deze motor voornamelijk plaats door geleiding.

De SD4-E stirlingmotor zal een belangrijk deel zijn van de bioverbrandingsinstallatie, waarvan belangrijke constructie en procesdetails volgen in hoofdstuk 5.

## 5 De bioverbrandingsinstallatie

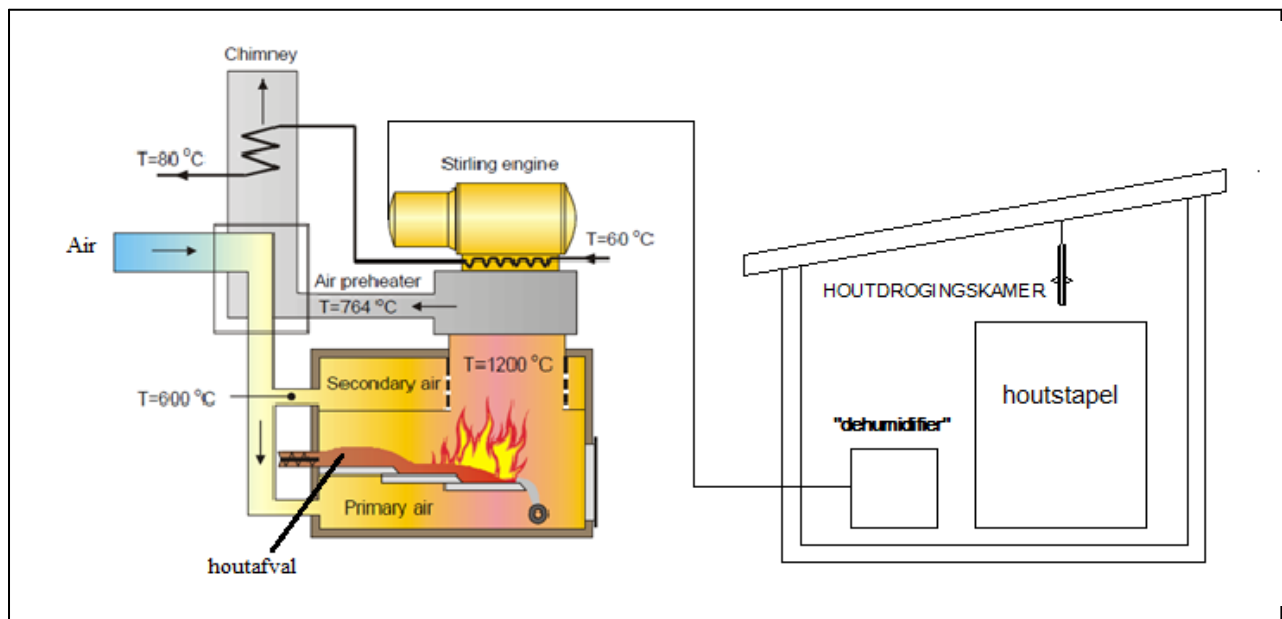
De bioverbrandingsinstallatie bestaat uit verschillende componenten die besproken worden in paragraaf 5.1. Tevens wordt het proces middels een procesdiagram uitgelegd. De nodige hoeveelheid houtafval wordt in paragraaf 5.2 berekend en het kostenplan van de installatie wordt in paragraaf 5.3 opgesteld. Bron: [www.stirling.dk](http://www.stirling.dk).

### 5.1 Componentenopbouw en proces van de bioverbrandingsinstallatie

De installatie zal bestaan uit:

1. een verbrandingsoven voor het verbranden van houtafval met een aangedreven rollenbaan (voor de aanvoer van houtafval in de oven),
2. een SD4-E DK stirlingmotor,
3. een “dehumidifier” voor het drogen van 50 m<sup>3</sup> hout,
4. de houtdrogeroven (kiln).

Het proces zal volgens figuur 21 geschieden.



Figuur 22 Procesdiagram van de WKK-plant, waarvan de SD4-E deel uitmaakt

Het proces geschiedt in het kort als volgt:

Houtafval wordt de verbrandingsoven in gedreven. Ook lucht wordt volgens een overmaat toegevoerd en wel aan de onderkant en aan de bovenkant van de oven. Een eenmalige ontsteking brengt de verbranding van het houtafval op gang. Er wordt warmte ontwikkeld door de vlammen

die een temperatuur hebben van 1200 °C. Door warmtegeleiding vindt de warmteoverdracht in de warmtewisselaars van de SD4-E stirlingmotor plaats, waarin een deel van die warmte omgezet wordt in elektrische energie. Een deel van de restwarmte van dit proces wordt gebruikt voor het voorverwarmen van de toe te voeren lucht. De generator van de SD4-E motor wordt gekoppeld aan een “dehumidifier” die vervolgens het hout droogt. De nodige hoeveelheid houtafval per houtdrogingsproces wordt in de volgende paragraaf berekend.

## 5.2 Berekening van de nodige hoeveelheid houtafval

Om te weten te komen hoeveel houtafval er nodig is per houtdrogingsproces, is het van belang om de tijdsduur van het houtdrogingsproces vast te stellen. Het drogingsproces duurt ongeveer drie weken. Rekening houdende met onvoorziene omstandigheden, zal aangenomen worden dat de drogingstijd 25 dagen zal duren. In tabel 12 volgt een berekening van de hoeveelheid houtafval die nodig zal zijn voor het aandrijven van de SD4-E stirlingmotor.

Tabel 12 De nodige hoeveelheid houtafval ter aandrijving van de SD4-E stirlingmotor

Massadebiet ( $\theta_m$ )	Draaiuren (t)	Massa (m) en volume (V) van het houtafval
70 kg/h	$t = 25 \text{ dgn} \times 24 \text{ h/dg} = 600 \text{ h}$	$m = \theta_m \times t = 70 \text{ kg/h} \times 600 \text{ h} = 42000 \text{ kg}$ $V = \frac{m}{\rho} = \frac{42000 \text{ kg}}{540 \text{ kg/m}^3} \approx 77,8 \text{ m}^3$

Uit tabel 12 blijkt dat voor het aandrijven van de SD4-E stirlingmotor ongeveer 77,8 m<sup>3</sup> houtafval verbrand moet worden. De SD4-E zal hierbij 25 kW aan elektrische energie opleveren voor het drogen van 50 m<sup>3</sup> hout en een extra hoeveelheid aan elektrische energie van 10 kW<sub>el</sub>. Voor het drogen van 50 m<sup>3</sup> hout is er dus circa  $\frac{25}{35} \times 77,8 \text{ m}^3 \approx 55,6 \text{ m}^3$  aan houtafval nodig. Uitgaande van de berekening in paragraaf 2.4.1 van de gemiddelde hoeveelheid aan vrijkomend houtafval op jaarbasis kunnen er meerdere SD4-E stirlingmotoren aangedreven worden. Tabel 13 geeft een berekening weer van het aantal SD4-E stirlingmotoren voor benutting van deze gemiddelde hoeveelheid aan beschikbaar houtafval.

Tabel 13 'Elektrische' benutting van de gemiddelde beschikbare hoeveelheden aan houtafval

Gemiddelde houtafvalproductie per jaar	282.050 m <sup>3</sup>
Vermogen van de SD4-E	35 kW <sub>el</sub>
Nodige hoeveelheid houtafval voor de aandrijving van een SD4-E	77,8 m <sup>3</sup>
Aantal SD4-E DK stirlingmotoren	$\text{aantal} = \frac{282.050 \text{ m}^3}{77,8 \text{ m}^3} \approx 3625 \text{ motoren}$
Totaal aan opgewekte elektrische energie	$E_{\text{totaal}} = \frac{282.050 \text{ m}^3}{77,8 \text{ m}^3} \times 35 \text{ kW}_{\text{el}} = 126.886 \text{ kW}_{\text{el}} \approx 126 \text{ MW}_{\text{el}}$

Volgens tabel 13 kunnen door verbranding van 282.050 m<sup>3</sup> houtafval circa 3.625 SD4-E stirlingmotoren aangedreven worden, die ongeveer 126 MW aan elektrische energie zullen opwekken. In paragraaf 5.3 is een kostenplan voor een enkele installatie gecalculeerd.

### 5.3 Kostenplan voor het opzetten van het model

Om een dergelijke installatie op te zetten is het een noodzaak dat er een kostenplan wordt opgezet. Tabel 13 betreft een schatting van de prijzen van de in te kopen installatie-onderdelen. Vermeldenswaard is dat de SD4-E stirlingmotor met een verbrandingsoven en aangedreven rollenbaan wordt geleverd.

Tabel 14 Prijslijst van de belangrijke onderdelen van de bioverbrandingsinstallatie

Onderdeel	Specificatie	Prijs (US\$)
1. SD4-E DK stirlingmotor	Een 35 kWe motor	350.000
2. Dehumidifier	PM600	52.000
3. Houtdrogeroven (kiln)	Een ovenruimte opgetrokken van steen (lokaal gebouwd)	2.000
<b>Totaal</b>		<b>404.000</b>

Het opzetten van de toe te passen verbrandingsinstallatie ten behoeve van het drogen van hout zal volgens tabel 13 US\$ 404.000,- kosten. Bedrijven die al hout drogen met een DH hoeven slechts US\$ 350.000,- te investeren in de aankoop van de SD4-E stirlingmotor.



## 6 Conclusies en aanbevelingen

De conclusies zijn:

- ❖ Kunstmatige houtdroging geschiedt in Suriname voornamelijk met de “dehumidifier”.
- ❖ Door houtafval thermodynamisch in een verbrandingskamer te verbranden kan door de ontstane warmte een SD4-E stirlingmotor aangedreven worden. Deze motor is een bedrijfsvriendelijke motor en eist relatief minder onderhoud ten opzichte van stoomketels en andere machines.
- ❖ Er is voldoende houtafval beschikbaar om aangewend te worden voor de toe te passen bioverbrandingsinstallatie.
- ❖ Het opzetten van dergelijke installatie zal minstens US\$ 404.000, - kosten.

De aanbevelingen zijn:

- ❖ Houtafval kan in maximale zin benut worden door de bij de verbranding ontstane vaste verbrandingsresten in de cement- of asfaltindustrie te gebruiken.
- ❖ Er kan een pilotproject in Suriname uitgevoerd worden om de haalbaarheid van een plant met deze bioverbrandingsinstallatie te onderzoeken.
- ❖ Er kan verder onderzoek gedaan worden naar grotere typen stirlingmotoren voor een plant.

## Literatuurlijst

De geraadpleegde boeken zijn:

- Browne, F. L., *Theories of the combustion of wood and its control, A Survey of the Literature By Chemist Forest Products Laboratory*, Forest Service U. S. Department of Agriculture
- Evertsen, Knaggs, O’Dea, Ebdon & Gallagher (1997), *Timber Drying and Kiln Operation, Technology skills for the limber industry*, Enterprise Ireland
- Sagoe, John A., & Simpson, William T. (October 1991), *Relative drying times of 650 tropical woods, estimation by green moisture content, specific gravity and green weight density*.
- Spliethoff, H. (2010), *Power generation from solid fuels*, München, Germany, Institute für Energiewirtschaft und Anwendungstechnik

De volledige aflevering van de volgende tijdschriften is geraadpleegd:

- Aertsens, Joris et al. (november 2012), *Vergisting*, Publicaties Vlaanderen
- Bushnell D. J. & Dadkhah-Nikoo A. (October 22, 2009), *Journal of Energy Resources Technology, Analysis of Wood Combustion Based on the First and Second Laws of Thermodynamics*, Department of Mechanical Engineering, Oregon State University, Corvallis
- Lee, Roland Arthur & Lavoie, Jean-Michel (april 2013), “*From first- to third-generation biofuels: Challenges of producing a commodity from a biomass of increasing complexity*”, Animal Frontiers Magazine, Université de Sherbrooke, Quebec, Canada
- Vogel, Michael, *Housing and Residential Energy Specialist, Heating of Wood: Principles of Combustion*, Montana State University, Extension MontGuide

De geraadpleegde rapporten zijn:

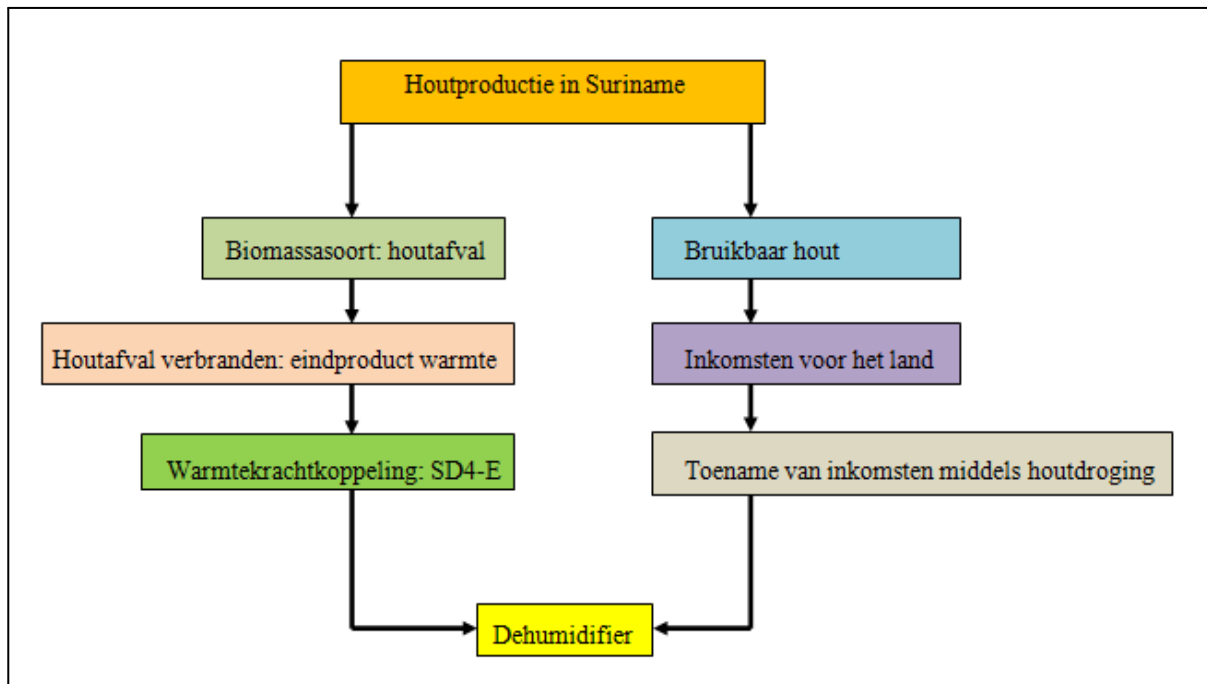
- Broom, Matthew Mc (2006), *Wood Science*, Temple College of Forestry and Agriculture Stephen F. Austin State University, Texas, USA.
- Devriendt, Nathalie & Geurds, Michiel (2006), *ODE en VITO Bio-energie, Omzetten van vaste biomassa in hernieuwbare warmte en elektriciteit*, in opdracht van Vlaams ministerie van Leefmilieu, Natuur en Energie, Vlaams Energieagentschap

- Devriendt, N. & Straeten, P. van der (november 2003), *Studie optimale energetische valorisatie van houtafval*
- Franssens, Nic & Franssens, Michiel (20 januari 2011), *Rapportage i.o.v. Provincie Utrecht*, door Ecolink Solutions Advies & Techniek Energie & Milieu
- Haywood, David, *An Introduction to Stirling-Cycle Machines*, University of Canterbury
- KEMA Consulting (2008), “*Suriname power sector assessment and alternatives for its modernization*” Paramaribo
- Naddaf, N. (2012), *Stirling Engine Efficiency*, HAMK, University of Applied Sciences
- Naeyaert, Bart (2007), *Vergisting op boerderij schaal*
- Stichting voor Bosbeheer en Bostoezicht (september 2011), *Bosbouw Sector Analyse 2010*, Directoraat: Bosbouw Economische Diensten
- Stichting voor Bosbeheer en Bostoezicht (september 2012), *Bosbouw Sector Analyse 2011*, Directoraat: Bosbouw Economische Diensten
- Walsh, John (2012), *Basic principles of operation and applications of the Stirling engine from its invention in 1816 to its modern uses*, Limerick Institute of Technology, Department of Mechanical and Automobile Engineering
- Woudstra, Nico, *Efficiency of combustion*, Delft University of Technology Thermal Power Engineering, The Netherlands

De geraadpleegde internetpagina's zijn:

- Curkeet, R. (March 2011), *Woodcombustion Basics*, EPA Workshop, Retrieved January 17, 2013 from <http://www.epa.gov>
- Marinitsch, G. (november 2011), *Bioliqids Symposium*, Brussel, Retrieved July 10, 2013 from <http://www.bioliqids-chp.eu>

## Bijlage A Blokschema dat het stappenplan voorstelt



## Bijlage B Begrippenlijst

O	zuurstofgas
OH	hydroxylgroep
Grondstof	materiaal dat in een proces verbruikt wordt om iets te maken of te fabriceren.
Natuurlijke grondstof	grondstof die in de natuur gevonden wordt.
Groenhart	tropisch hardhout in Suriname..
Hygroscopisch	de eigenschap van een stof of product om vocht uit de omgeving op te willen nemen.
Werktuig	een eenvoudig handgereedschap of een ingewikkelde machine/ apparatuur.
Kiln	een verwarmde kamer (een droog oven) die wordt gebruikt om middels een droger vocht uit hout te onttrekken, zodat het hout voor andere doeleinden gebruikt kan worden.
Warmtewisselaar	een apparaat dat warmte van het ene medium (vloeistof, gas) overbrengt naar het andere.
Calorische waarde	de hoeveelheid warmte die een hoeveelheid droog materiaal afgeeft bij verbranding.
Stookwaarde	de hoeveelheid warmte die een materiaal ongedroogd oplevert.
Energetische waarde	een maat voor de energie-inhoud in een brandstof.

**Bijlage C Technische specificaties en afbeelding van een plant, aangedreven  
door de SD4-E DK stirlingmotor**