

Biomassa, elektriciteit of transportbrandstof



scrip t i e

G-J Wiechers

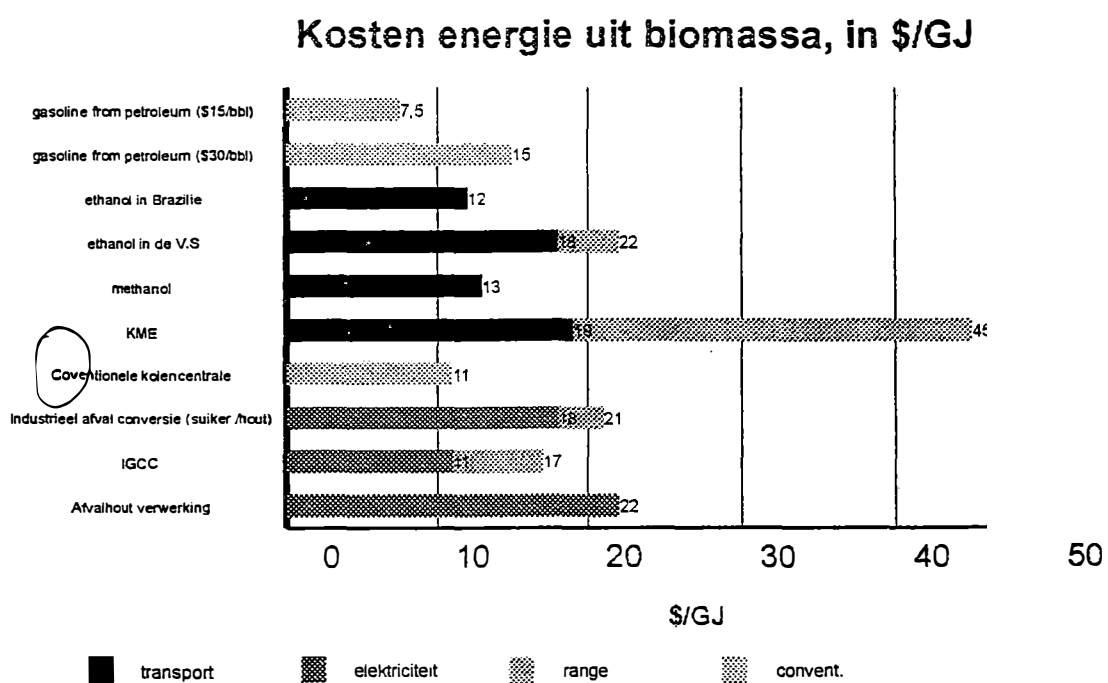
Inhoudsopgave

SAMENVATTING

1.	INLEIDING.....	1
2.	ELEKTRICITEIT UIT BIOMASSA.....	4
2.1	Huidige ervaringen.....	6
2.1.1	Conversie van afvalhout bij houtverwerking.....	6
2.1.2	Conversie van afvalprodukten bij suikerproductie.....	7
2.1.3	Afvalverbranding.....	7
2.2	Nieuwe ontwikkelingen.....	9
2.2.1	De IGCC demonstratie centrale in Varnamo.....	9
2.2.2	BIG-STIG.....	10
2.3	Omzetten van afvalhout in elektriciteit in Nederland.....	11
3.	TRANSPORTBRANDSTOF UIT BIOMASSA.....	13
3.1	Huidige ervaringen.....	14
3.1.1	Ethanolproductie in Brazilië.....	15
3.1.2	Ethanolproductie in de V.S.....	16
3.2	Nieuwe ontwikkelingen.....	16
3.2.1	Nieuwe technieken voor ethanolproductie.....	17
3.2.2	Productie van methanol uit biomassa.....	17
3.3	Productie van KME in Nederland.....	19
4.	PRODUKTPRIJS VERGELIJKING.....	20
4.1	Productprijs vergelijking voor elektriciteit.....	21
4.2	Productprijs vergelijking voor transportbrandstof.....	23
4.3	Onderlinge kostprijs vergelijking.....	24
5.	CONCLUSIE.....	25

LITERATUUR

Figuur 0.1: De kosten van energieproductie uit biomassa



Samenvatting

Agrarische produkten zijn niet meer alleen maar om op te eten. Gewassen kunnen ook geteeld worden met als doel energieproductie. Een voordeel van op dergelijke wijze geproduceerde energie is, dat er netto geen CO₂ productie plaatsvindt. Ook is biomassa een duurzame bron, dat wil zeggen een bron die niet uitgeput zal raken. Als de olie-voorraden niet meer toereikend zijn, of als de uitstoot van CO₂ aan banden gelegd wordt, is energieproductie uit biomassa één van de mogelijke alternatieven.

In dit rapport wordt energie uit biomassa onder-verdeeld naar het geproduceerde eindproduct, te weten elektriciteit of transportbrandstof. Verschillende installaties voor de verwerking van biomassa tot één van deze produkten zijn bekeken en vergeleken. Oorspronkelijk was gepland een vergelijking toe te passen op basis van energetisch rendement. Dit bleek echter niet mogelijk. Van processen voor productie van transportbrandstof worden in de literatuur geen waarden van rendementen gegeven. Processen voor de opwekking van elektriciteit kunnen onderling wel vergeleken worden, op basis van het elektrische rendement, een gegeven wat in veel artikelen te vinden is. Echter bij een proces waar ook geproduceerde warmte als produkt verkocht wordt, geeft dit rendement geen goede indruk van het proces. De verkoop van warmte heeft een negatief effect op het elektrische rendement, omdat deze warmte niet meer voor de productie van elektriciteit gebruikt kan worden. Het totale rendement van het proces kan echter wel degelijk stijgen door koppeling van warmte - en elektriciteitlevering.

Als maatstaf voor het vergelijken van de verschillende processen is gekozen voor de kosten per gigajoule eindproduct. Dit gegeven is voor de meeste processen bekend, of berekenbaar. Vergelijking van de produktiekosten heeft echter wel enige nadelen te opzichte van vergelijking van de energetisch rendementen. Voor de berekening zijn velen aannamen noodzakelijk, bijvoorbeeld voor de vaststelling van de kapitaalkosten, de voedingskosten, de arbeidskosten, en dergelijke. Deze aannamen zijn niet gestandaardiseerd en kunnen daardoor behoorlijke afwijkingen veroorzaken in berekende kosten. Bovendien vertonen deze kosten per land

grote verschillen. De berekende waarden moeten daarom meer als een kosten indicatie gezien worden, met een ruime marge in beide richtingen.

De berekende kosten voor verschillende processen om energie uit biomassa te benutten staan gegeven in figuur 0.1. In dit histogram is te zien wat de prijs per gigajoule eindprodukt bedraagt. Voor enkele processen is een range van kosten gegeven, afhankelijk van de gegevens die in de literatuur vermeld staan.

Te zien is dat de kosten, per GJ, van elektriciteit en van transportbrandstof ongeveer op het zelfde niveau liggen. Voor de transportbrandstof methanol zijn de kosten 13 \$/GJ, tegen 11-17 \$/GJ voor elektriciteit opgewekt in een Integrated Gasification Combined Cycle centrale. Deze kostprijzen zijn beide berekende prijzen voor processen die nog in hun ontwikkelingsfase verkeren.

Indien op grond van deze kosten een keuze gemaakt wordt is elektriciteit uit biomassa economische gezien het meest aantrekkelijke alternatief. De marktprijs van elektriciteit is immers hoger, omdat de verkregen gigajoules, joules van een hogere kwaliteit zijn. De kosten van in IGCC-centrales opgewekte elektriciteit uit biomassa zijn zelfs vergelijkbaar met de kosten van conventionele elektriciteit. Een IGCC-centrale voor biomassa voedingen is echter nog niet commercieel verkrijgbaar. De gegeven kosten zijn voorspelde waarden, die momenteel beproefd worden in proefinstallaties. §

Frankrijk

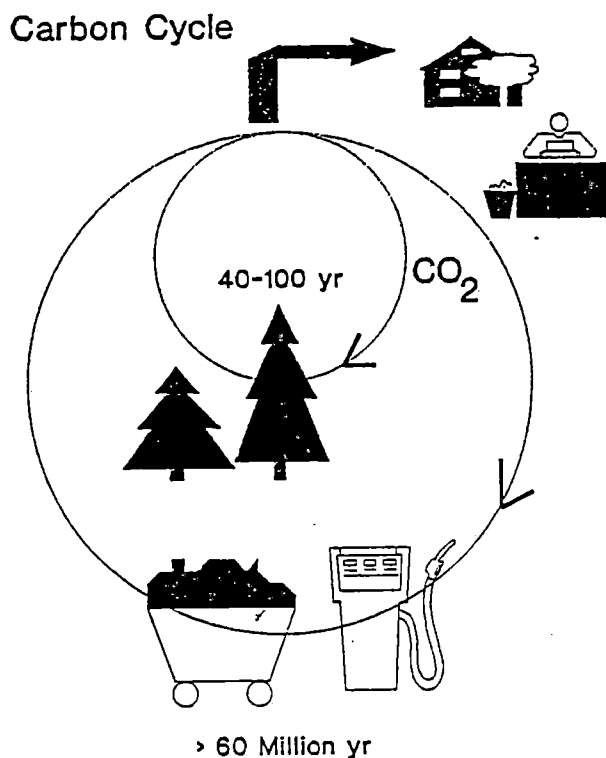
De produktkosten van de andere processen waar elektriciteit opgewekt wordt uit biomassa, liggen wel duidelijk hoger dan de kosten van elektriciteit uit fossiele bronnen. Bij de huidige olieprijsen blijft ook het produkt transportbrandstof uit biomassa te duur. Een mogelijkheid waardoor beide processen economisch rendabel kunnen worden is het invoeren van belastingen op CO₂-uitstoot. Dit wordt ook overwogen door de Nederlandse regering, maar of energie uit biomassa dan ook rendabel is hangt natuurlijk af van de hoogte van de belasting.

Tot nu toe is ervan uitgegaan dat produkten als elektriciteit en transportbrandstoffen eenheidsartikelen zijn, waarvan de consument het voordeligste produkt zal kopen. Door de vele aandacht voor het milieu en de milieuveront-

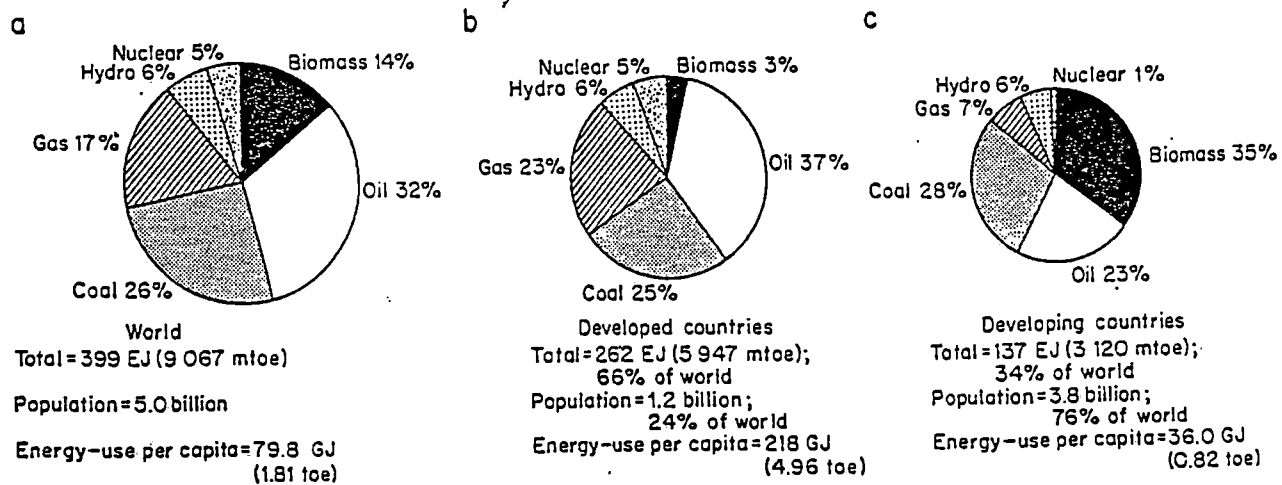
reiniging is er echter de laatste jaren een markt ontstaan voor duurzame artikelen. In deze categorie valt natuurlijk ook het produkt energie uit biomassa. Door juiste marketing moet het mogelijk zijn deze weliswaar duurdere energie te verkopen aan consumenten die wat extra's over hebben voor een duurzaam en milieu vriendelijk produkt. Met dit scenario kunnen in principe alle biomassa-produkten verkocht worden.

Kortom er is nu al een markt voor energieprodukten uit biomassa, deze produkten moeten als speciale produkten aangeboden worden. De prijs is wat hoger dan vergelijkbare produkten van fossiele aard, maar dit prijsverschil zal alleen maar dalen. De Nederlandse consument zal naar alle waarschijnlijkheid best wat extra overhebben voor biomassa-energie.

Figuur 1: De koolstof cyclus ^(a)



Figuur 2: De bijdrage van biomassa aan de wereld energiehuishouding ^(b)



1 Inleiding

De toename van het energiegebruik in de wereld, de afname van de voorraden aan fossiele brandstoffen, het broeikaseffect, zijn onderwerpen waar menig milieuactivist van wakker ligt. Ook bedrijven en overheden besteden steeds meer aandacht aan deze problemen en mogelijke oplossingen. Het huidige kabinet heeft bijvoorbeeld plannen om het energieverbruik bij de wortels aan te pakken, door de uitstoot van CO₂ te belasten. Zodoende zullen niet CO₂ producerende technieken relatief goedkoper en daarmee economisch interessanter worden.

Het gebruik van biomassa als energiebron is een methode om de toename van het CO₂ gehalte in de atmosfeer te stoppen. Dit wordt geïllustreerd in figuur 1.1 waar de zogenaamde CO₂ cyclus is afgebeeld. Bij de produktie van energie uit biomassa is de hoeveelheid CO₂ die vrijkomt gelijk aan de hoeveelheid CO₂ die opgenomen is tijdens de groei van het gebruikte organisme. Door constant evenveel biomassa te verbouwen en te verbruiken voor energie produktie, is de netto produktie van CO₂ nul. Bij het gebruik van fossiele brandstoffen worden daarentegen alleen oude reserves verbruikt. De bij verbranding vrijkomende hoeveelheid CO₂ wordt niet in gelijke mate weer opgenomen.

^(a) J.I. Zer

'Carbon sinks and the control of the greenhouse effect'

Energy from Biomass and Wastes XIV blz. 85

^(b) NOVEM

'De haalbaarheid van de produktie van biomassa voor de Nederlandse energiehuishouding' april 1992

Er zijn verschillende processen in gebruik die biomassa omzetten in energie. Het totale percentage aan energie opgewekt uit biomassa is echter nog zeer gering, zie figuur 1.2. Bovendien wordt een groot gedeelte van de nu gebruikte biomassa zeer inefficiënt verbruikt, b.v. in open haarden. Moderne installaties zijn meestal nuche toepassingen, ze zijn bedoeld voor gaten in de markt, waar door zeer speciale omstandigheden toepassingen van biomassa-energie verkozen worden gebieden. Deze toepassingen zijn (nog) niet geschikt voor energie produktie voor algemeen gebruik.

Het enige land waar wel op grote schaal energieproduktie uit biomassa plaats vindt is Brazilië. Dit gaat wel gepaard met grote overheidssubsidies. Voor Brazilië had en heeft produktie van bio-alcohol naast CO₂ reductie ook andere voordelen. De biomassa industrie in Brazilië geeft werk aan velen en zorgt, door een verminderde afhankelijkheid van olieïmport, voor een stabielere economie. Deze factoren waren voor Brazilië zelfs van veel groter belang dan reductie van de

CO₂ uitstoot.

Een belangrijk punt is hoe groot de overheidssteun moet zijn, om energie uit biomassa rendabel te maken. Anders gezegd hoe groot de verschillen in kosten zijn tussen produktie van energie uit biomassa en produktie van energie uit fossiele brandstoffen. Bovendien lijkt het verstandig om te kijken op welke wijze energie het best uit biomassa kan worden geproduceerd, zodat mogelijke subsidies zo efficiënt mogelijk besteed zullen worden. Om deze vragen te beantwoorden is nadere bestudering van de verschillende mogelijkheden om energie uit biomassa te produceren noodzakelijk.

^(e) SER advies
'Agrarische transport-
brandstoffen'
juni 1993

De nederlandse overheid stimuleert in haar beleid op het gebied van beperking van de CO₂ uitstoot o.a de ontwikkeling van processen voor produktie van transportbrandstoffen uit biomassa^(e). Transportbrandstof uit biomassa is inderdaad een methode om de uitstoot van CO₂ te verminderen. In Brazilië is bewezen dat produktie op grote schaal mogelijk is, de daar geproduceerde ethanol kan bovendien als mengsel met benzine zonder problemen in bestaande motoren verbrand worden. Transport op pure ethanol is ook mogelijk, dit vergt alleen een aangepaste motor. Dit zijn allemaal positieve kanten, maar er zijn ook alternatieven denkbaar.

Een alternatief zou bijvoorbeeld de produktie van elektriciteit uit biomassa kunnen zijn. In Lit(e) wordt deze optie niet bekeken. De CO₂ reductie die bereikt kan worden door elektriciteitsproduktie uit biomassa is potentieel toch zeker zo groot. Mocht de produktie van elektriciteit efficiënter plaatsvinden dan is het logischer om eerst de produktie van elektriciteit uit biomassa te stimuleren. De CO₂ uitstoot van de transportsector kan wellicht ook bereikt worden door omschakeling van verbrandings- op elektromotoren. Technische problemen met de elektriciteitsopslag staan deze omschakeling nu nog in de weg, maar er wordt veel onderzoek op dit terrein verricht. Het is natuurlijk ook mogelijk dat produktie van transportbrandstof uit biomassa efficiënter blijkt. Voordat een keuze gemaakt wordt is het daarom verstandig eerst na te gaan welke produktiemethode het voordeligst is.

In dit rapport wordt het gebruik van biomassa als energiebron kan in twee vormen gescheiden:

- biomassa voor transportbrandstofproduktie.
- biomassa voor elektriciteitsproduktie.

De volgende processen zijn nader bestudeerd om een vergelijk tussen transportbrandstof productie en elektriciteits productie uit biomassa mogelijk te maken.

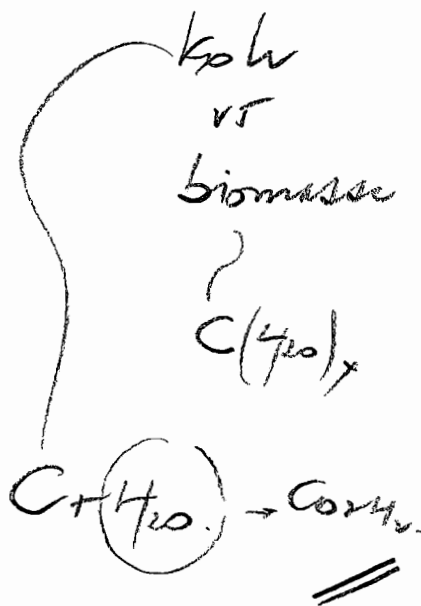
Biomassa voor elektriciteitsproductie:

- * Conversie van afval bij houtverwerking en suiker productie.
- * Afval verbranding naar aanleiding van de installatie te Moerdijk.
- * the Integrated Gasification Combined Cycle demonstration plant Varnamo, Finland
- * Nederlandse toepasbaarheid:
Omzetten van afvalhout (bouw) in elektriciteit.

Biomassa voor transportbrandstofproductie:

- * Ethanolproductie in Brazilië
- * Ethanolproductie in de V.S
- * Productie van methanol via synthesesgas
- * Nederlandse toepasbaarheid:
Productie van Koolzaad Methyl Ester

Deze processen zullen in de volgende hoofdstukken nader toegelicht worden.



2 Biomassa voor elektriciteitsopwekking.

Een proces voor opwekking van elektriciteit uit biomassa is opgebouwd uit een warmteopwekkingstrap en een trap waar deze warmte wordt omgezet in elektriciteit. De verbrandingstrap kan op de volgende principes berusten ^(d):

- direct verbranding van de biomassa (meest)
- verbranding van een voorbereekte vorm van biomassa, biodiesel of biogas.

Directe verbranding kan bijvoorbeeld gebruikt voor verbranding van bomen. De bomen worden versnipperd, gedroogd en vervolgens verbrand. Voor de verbranding kunnen verschillende soorten reactoren gebruikt worden. Roosterovenverbranding wordt het meest toegepast, vooral vanwege de eenvoudige techniek. Een alternatieve techniek is wervelbed verbranding, waarmee hogere rendementen haalbaar moeten zijn. Deze techniek is echter minder beproefd en duurder.

^(d) R.L.Bain
'Electricity from biomass
in the United States'
Bioresource Technology
46(1993)86-93

Directe verbranding is het enige proces wat al veelvuldig beproefd is voor het opwekken van elektriciteit uit biomassa.

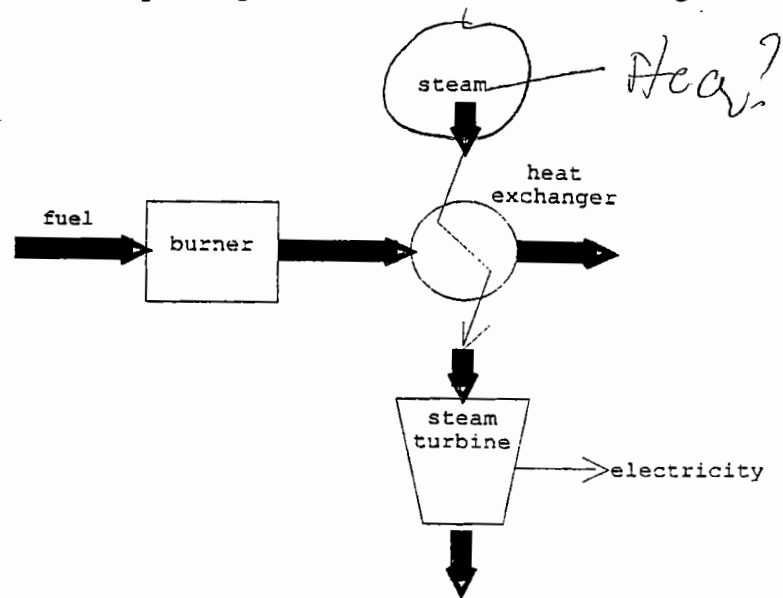
Processen waar verbranding van voorbereekte biomassa plaatsvindt hebben als voordelen een hoger rendement en een schonere verbranding dan processen met onbehandelde biomassa voedingen. Bovendien kunnen vrijwel alle soorten biomassa probleemloos verwerkt worden. Nadeel is dat de biomassa eerst vloeibaar of gasvormig gemaakt moet worden. Dit gebeurt door pyrolyse, in een voorafgaande processtap. Deze extra stap brengt echter ook extra kapitaalkosten met zich mee.

Gasvormige biomassa wordt verkregen in processen die vrijwel gelijk zijn aan het kolenvergassingsproces. Deze processen worden nog niet commercieel toegepast, maar er zijn wel enige proefinstallaties. Theoretisch kunnen met deze manier van verbranding de hoogste rendementen behaald worden. De toe te passen technologie is echter nieuw en de kapitaalkosten zijn hoog.

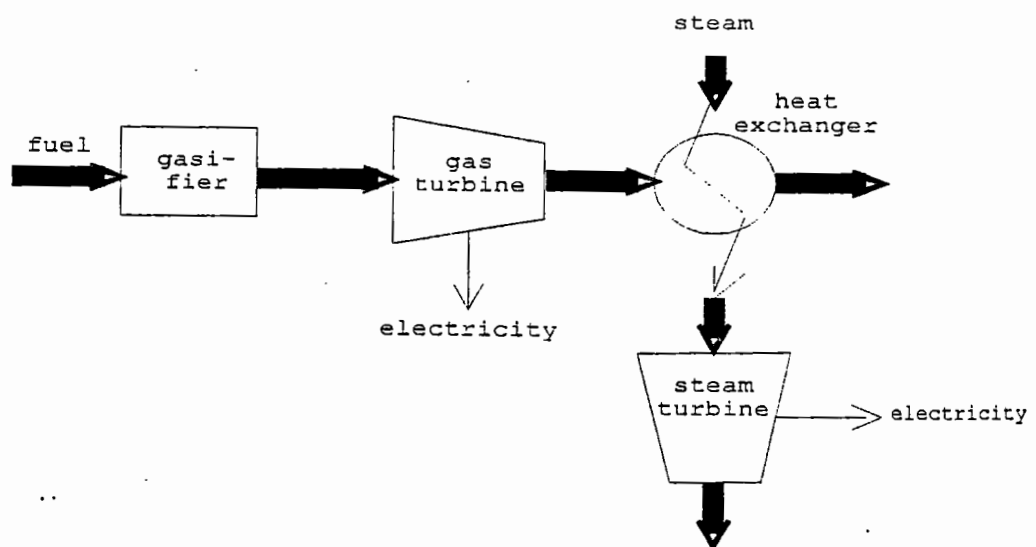
De tweede trap in het elektriciteit-opwekkingsproces is zo mogelijk van nog grotere invloed op het uiteindelijke rendement dan de verbrandingstrap.

Figuur 2.1.1 Schematische opstelling conventionele turbine (stoom), gas turbine en STEG

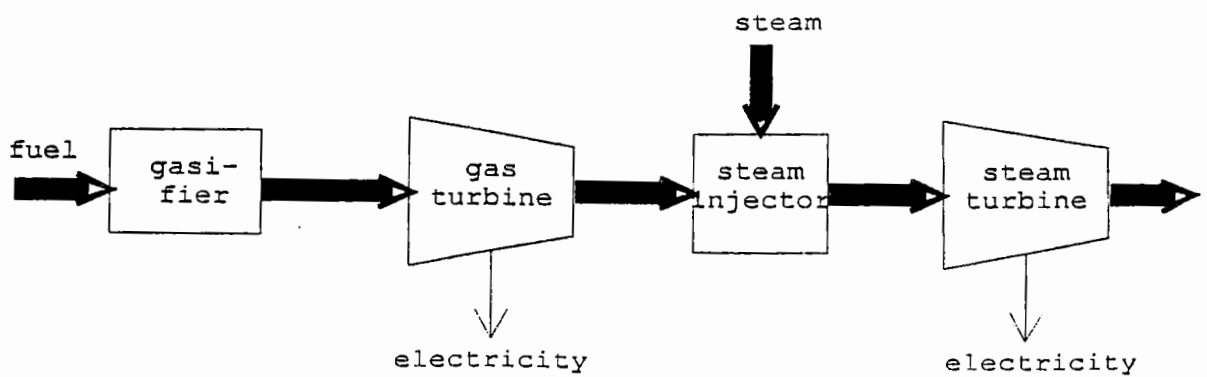
a) Conventioneel



b) STEG



c) STIG



Het conventionele proces om warmte om te zetten in stroom is afgebeeld in figuur 2.1. Warmte wordt overgedragen aan stoom waardoor superkritische stoom ontstaat. Deze stoom wordt door een stoomturbine geleid en aldaar wordt elektriciteit opgewekt. De omzetting van warmte in elektriciteit vindt plaats in een stoomturbine. Het rendement wordt beperkt door de maximale temperatuur van stoom, dat bij temperaturen boven 1000 K ontleed.

Een manier om deze beperking te omzeilen is toepassen van gasturbines. Voor dergelijke turbines moet de voeding gasvormig zijn, voor biomassa toepassingen is daarom alleen toepassing in combinatie met een vergasser mogelijk. In de turbine worden de gassen ontbrand, door de optredende expansie wordt de turbine aangedreven. Aangezien deze gassen een veel hogere ontledingstemperatuur hebben dan stoom kan elektriciteit opwekking in gasturbines plaatsvinden bij temperaturen van rond de 2000 K. De temperatuur wordt beperkt door de materiaal eigenschappen van de turbine. Een nadeel van gasturbines is dat de gassen die uit de turbine stromen nog erg heet zijn. Als deze warme gassen niet meer gebruikt worden betekend dit een grote verliespost.

^(e) o.a in:
L.J.van der Toorn
'Energie uit biomassa een
overzicht'
Energie Spectrum 3, maart
1992

^(f) G.Trebbi
'Power production options
from biomass: the vision
of a southern european
country'
Bioresource Technology
46(1993)23-29

De meest efficiënte opwekking van elektriciteit van nu vindt plaats in een combinatie van stoom -en gasturbines, een zogenaamde Integrated Gasification Combined Cycle. Hier wordt een gasvormige brandstof eerst langs een gasturbine gevoerd, zodat van de hogere temperatuur (hoger rendement) geprofiteerd wordt. Vervolgens wordt de uitstroom van de gasturbine gebruikt om oververhitte stoom op te wekken. Deze stoom wordt door een stoom turbine gevoerd. De energieinhoud van de uitstroom van de gasturbine wordt zodoende benut, er treden geen onnodige verliezen op. De stoom kan op twee verschillende manieren opgewekt worden (zie ook figuur 2.1):

STEG (SToom En Gasturbine), stoom wordt opgewekt door middel van warmtewisseling.

STIG (STeam Injected Gasturbine), stoom wordt in de uitstroom van de gasturbine gespoten.

2.1 ***Huidige ervaringen***

In Nederland draaien geen elektriciteitscentrales, die biomassa als energiebron gebruiken (afvalverbranders buiten beschouwing gelaten). Er zijn wel enige projecten in de ontwikkelingsfase, waarop later ingegaan zal worden. Voor ervaringen met elektriciteitsproductie uit biomassa moet daarom uitgegaan worden van buitenlandse literatuur.

Huidige ervaringen met het opwekken van elektriciteit uit biomassa berusten vrijwel uitsluitend op processen waar directe verbranding gekoppeld wordt met elektriciteitsopwekking door stoomturbines. Deze processen worden voornamelijk toegepast in industrieën die een afvalprodukt van biologische aard produceren. Deze afvalprodukten dienen dan als energiebron voor de productie van elektriciteit. De opgewekte elektriciteit wordt vervolgens voor het eigenlijke productieproces gebruikt. Overproducties van of tekorten aan elektriciteit kunnen met het openbare elektriciteitsnet vereffend worden. Voorbeelden van deze processen zijn de conversie van afvalhout of de conversie van amas.

(d) R.L.Bain
'Electricity from biomass
in the United States'
Bioresource Technology
46(1993)86-93

(e) 'Elektriciteit in Neder-
land'
publikatie van Energied
en SEP

2.1.1 Conversie van afvalhout bij houtverwerking.

In Amerika werd in 1990 6 gigawatt opgewekt door biomassa-centrales voor verwerking van afvalhout. Dit is overigens minder dan 1% van de totale elektriciteitsproductie^(d). Deze 6 gigawatt werd opgewekt in ongeveer duizend centrales met een gemiddelde grootte van 20 megawatt en een typisch rendement van 15-20%. De kosten van de opgewekte elektriciteit lagen tussen de 15 en 20 \$cent per kilowatt. Relatief kostbaar in vergelijking met een koolcentrale, rendement van circa 40% en elektriciteitskosten van om de 5 \$cent per kilowatt^(e,g). Deze hogere kosten werden aanvaard omdat:

-) Door het gebruiken van afval ook kosten bespaard worden.
-) De houtverwerking geschied vaak in afgelegen gebieden waar elektriciteit niet altijd voorhanden is en relatief kostbaar.

Tabel 2.1.2.1 Kosten en efficiencies van centrales voor verwerking van afval in de suikerindustrie

	Fuel Used ^a (tc/hr)	Capacity (MW _e)	Peak Efficiency (%)	Unit cost ^b (1985 \$/kW)
LARGE				
Steam Turbine System	173	27	20.3	1670
Gas Turbine System ^c	180	53	32.5	1050
MEDIUM				
Steam Turbine System	71	10	17.8	2222
Gas Turbine System ^d	70	20	30.8	1290
SMALL				
Steam Turbine System	24	3.0	15.7	3150
Gas Turbine ^e	19	5.4	30.1	1710

^a Equivalent cane throughput required during the milling season to provide bagasse fuel for the cogeneration plant. Other fuel, such as cane tops and leaves, will be needed for operation outside the milling season.

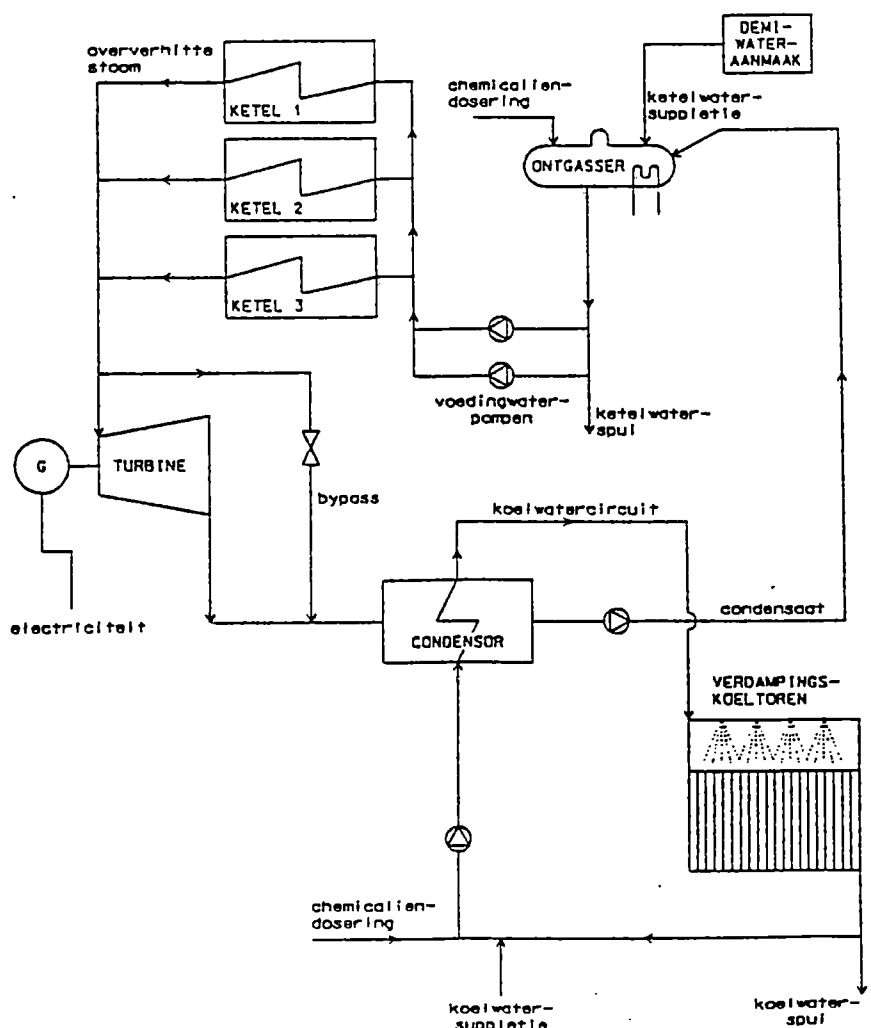
^b Installed capital cost for the cogeneration plant plus the cost of steam conservation retrofits at an average factory (based on Monymusk Factory in Jamaica).

^c Based on a General Electric LM-5000 steam-injected gas turbine.

^d Based on a General Electric LM-1600 gas turbine with steam injection.

* Based on the General Electric GE-38 steam-injected gas turbine.

Figuur 2.1.3.1 **Processchema Afvalverbrandings Installatie**



2.1.2 *Conversie van afvalprodukten bij suiker- productie*^(h,i,j)

^(h) J.Kadyszewski

'Conversion of suger cane
residues to power'

Energy from Biomass
and Wastes XIV
blz.569-601

⁽ⁱ⁾ C.M Kinoshita

'Cogeneration in the
Hawaiian sugar industry'
1989

^(j) C.M Kinoshita

'Energy efficiency of the
hawaiian sugar industry'
Energy from Biomass
and Wastes VII
blz.548-568

Suikerriet is qua volume het meest verbouwde gewas ter wereld. Amas is een afvalprodukt, dat ontstaat bij de verwerking van suikerriet of suikerbieten tot suiker. Dit bijprodukt kan en wordt vaak gebruikt voor de produktie van elektriciteit, die nodig is voor het eigenlijke suikerproduktieproces. Er is ook nog een grote hoeveelheid energie aanwezig in de biomassa die niet geoogst wordt. Dit gedeelte van de plant wordt meestal op de akker verbrand.

In de suikerindustrie wordt elektriciteit hoofdzakelijk opgewekt in processen met directe verbranding, gevolgd door en door een stoomturbine. De elektrische rendementen zijn daardoor vaak laag, rond de 19%. Deze rendementen kunnen verbeterd worden, bijvoorbeeld door toepassing van gas- in plaats van stoomturbines. De rendementen van de verschillende systemen staan in tabel 2.1.2.1 (deze tabel is gemaakt in 1985, de rendementen zullen met toepassing van huidige technieken waarschijnlijk iets hoger liggen)

2.1.3 *Afval verbranding*^(k,l)

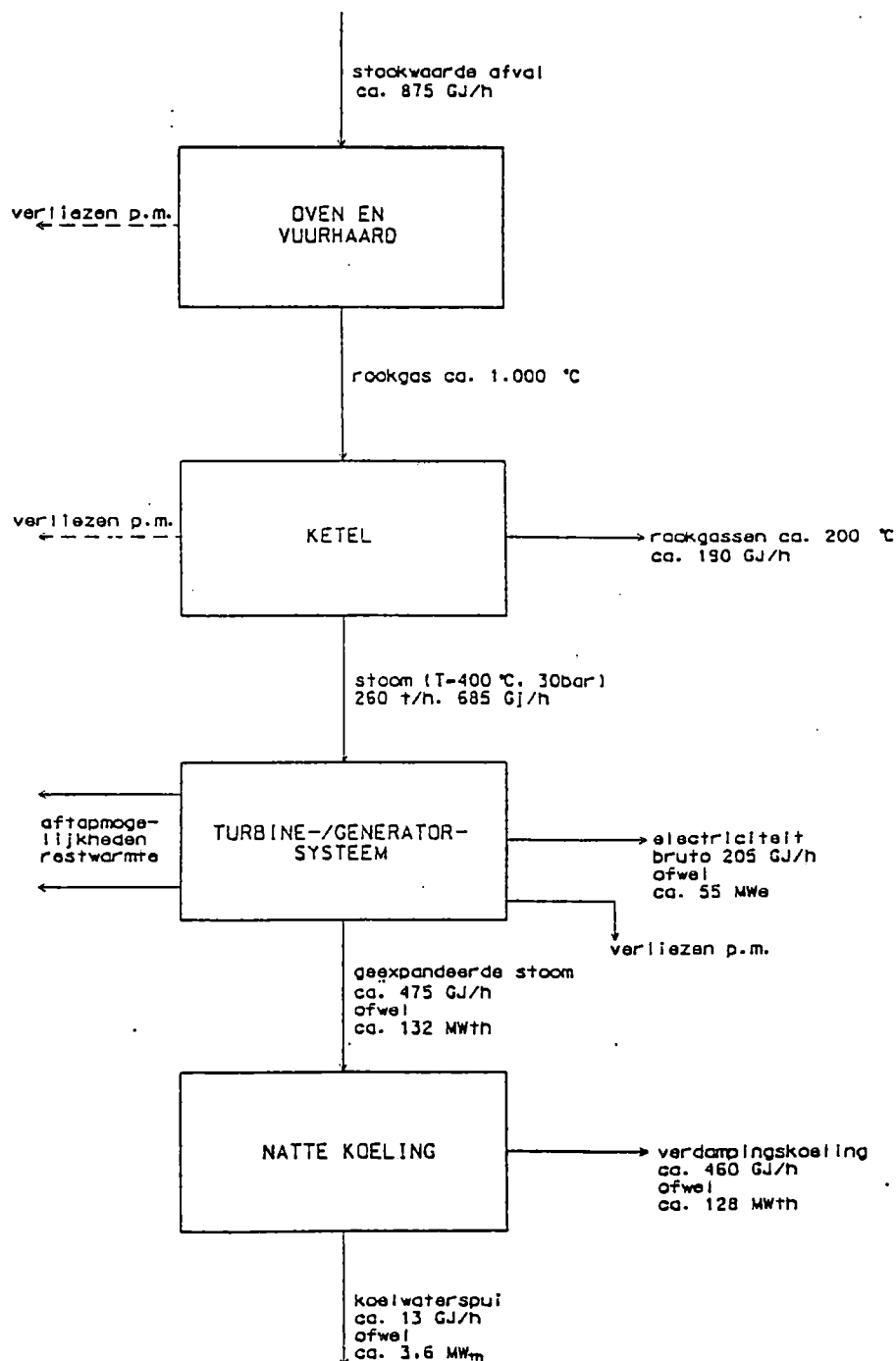
Om de groeiende afvalbergen te bestrijden wordt zijn in Nederland een aantal afvalverbrandingsinstallaties in gebruik. In deze installaties wordt het afval verbrandt wat niet hergebruikt kan worden. Dit betekent dat er een enorme verscheidenheid aan produkten ontstaat bij verbranding, waarvan vele schadelijk voor het milieu. Bij een afvalverbrandingsinstallatie in Nederland horen daarom een keur aan zuiveringssprocessen.

Deze installaties waarin in principe alles verbrand kan worden zouden ook een wat eenvoudiger, eenduidiger voeding kunnen krijgen. Bijvoorbeeld voor energieproduktie geteelde biomassa. Een AVI is echter ontworpen om zeer verontreinigde stromen te verwerken, hiervoor zijn aan het rendement veel concessies gedaan. Op zich is een AVI daarom geen optimale verwerkingsinstallatie voor biomassa, het rendement zou hoger kunnen zijn als bij de ontwerpen gerekend was op een biomassa voeding. Wel is het zo dat rendementen die met een AVI haalt op afval, minimaal ook op biomassa voeding gehaald moeten kunnen worden. Een voordeel van de AVI's is dat er aardig wat

^(k) N.V Afalval-verbranding
Zuid-Nederland I.O.
Haskoning, ingenieurs en
architecten bureau

Figuur 2.1.3.2

Energiestromen van een Afvalverbrandings Installatie



⁽¹⁾ H. Miller

'Operation of the worlds
largest RDF-to-energy
plant'

Energy from Biomass and
Wastes XIV blz. 653-663

ervaring mee opgebouwd is. Deze AVI rendementen kunnen gezien worden als een minimaal haalbaar bewezen rendement voor produktie van elektriciteit uit biomassa.

Het processchema van een afvalverbrander is hiernaast te zien (figuur 2.1.3.1). De verbranding in de vuurhaard vindt plaats op een rooster, bij een temperatuur tussen de 850 °C en 1100 °C. Het afval wordt met een verblijftijd van circa drie kwartier verbrandt. Deze methode werd gekozen omdat het een bewezen techniek is. Eventuele alternatieven als wervelbed verbranding worden voor afvalverbranding getest in demonstratieprojekten. Deze technieken zijn nog niet commercieel inzetbaar voor de afvalverwerking.

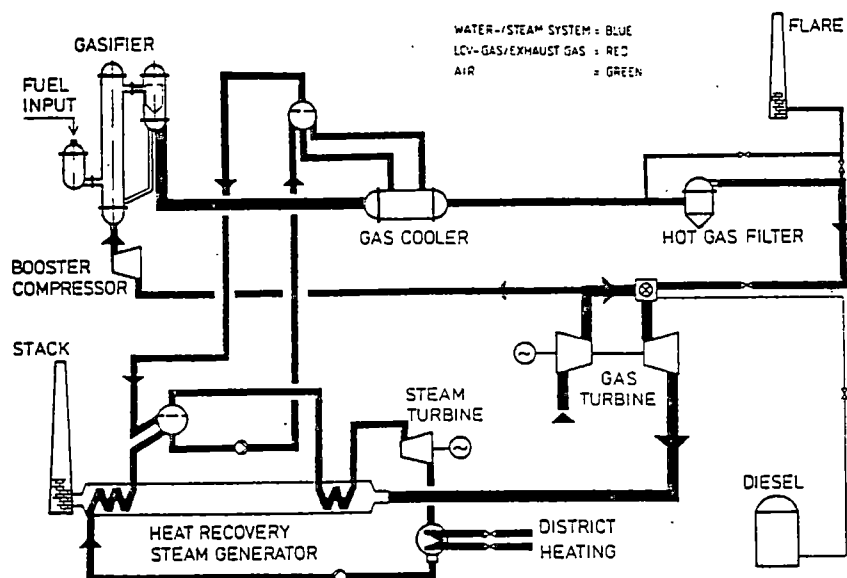
Na de vuurhaard passeren de rookgassen de ketel, waarin deze gassen worden afgekoeld tot een temperatuur van ongeveer 200 °C. Verdere afkoeling zou een hoger rendement kunnen geven maar brengt ook corrosierisico's. Er wordt zodoende stoom opgewekt met een temperatuur van maximaal 450 °C. Door gebruik van biomassa zou een veel hogere stoomtemperatuur mogelijk zijn, met een hoger bijbehorend elektrisch rendement. Een voordeel van de lage temperatuur is wel dat de toegepaste materialen goedkoper zijn, dit houdt ook in dat indien biomassa in een bestaande AVI verwerkt zou worden dit niet bij een hogere temperatuur gedaan zou kunnen worden.

De in een AVI geproduceerde stoom wordt meestal niet direct naar een turbine gevoerd. Door de lage temperatuur zou dit als gesteld een er laag rendement opleveren. Deze hete stoom wordt door de turbine geleid. In figuur 2.1.3.2 zijn de verschillende energiestromen voor een typische afvalverbrander afgebeeld. Het elektrisch rendement van deze AVI is: $205/875=0.23$

Het totaalrendement van de AVI zou verhoogd kunnen worden door de stoom extra te verhitten in bijvoorbeeld een gasoven. Een andere mogelijkheid extra verhitting door warmtewisseling met de gasturbine uitstroom van een STEG. Dit principe wordt toegepast bij de bouw van een AVI te Moerdijk ^(k) alwaar men een totaal elektrisch rendement van 50% denkt te halen. Dit hoge rendement is eigenlijk te danken aan de gas-STEG, waarvoor op zich rendementen van 55% haalbaar zijn. Een andere mogelijkheid tot verbetering van het rendement is toepassing van de warmte-kracht-koppeling.

Figuur 2.2.1.1

Processchema IGCC proefproject te Varnamo



2.2 ****nieuwe ontwikkelingen****

^(m) P.Elliot R.Booth
'Sustainable biomass
energy'
SHELL selected papers

Met behulp van moderne technieken wordt verwacht dat de elektrische rendementen van elektriciteitscentrales die gestookt worden op biomassa zullen stijgen tot 40% binnen enkele jaren en uiteindelijk zelfs tot 50% en meer^(m). Dit wordt bereikt door toepassing van zogenaamde IGCC systemen. De hoogste rendementen worden verkregen met STEG (Stoom en Gasturbine) systemen. STIG (steam injected gas-turbine) hebben een iets lager rendement maar zijn wel geschikter voor toepassing op kleine schaal. Door deze technieken zou elektriciteit uit biomassa een stuk goedkoper worden, mogelijk zelfs economisch rendabel. Deze technieken kunnen echter ook toegepast worden bij elektriciteitsopwekking uit fossiele brandstoffen, waardoor de rendementen van deze processen ook zal stijgen. Zoals reeds is aangegeven, is voor gascentrales een STEG rendement van 55% mogelijk.

Deze nieuwe technieken voor elektriciteitsopwekking uit biomassa (STIG, STEG) worden momenteel beproefd. Naar aanleiding van de resultaten van deze proefprojecten zal bekeken worden of de voorspelde verbeteringen inderdaad haalbaar zijn.

2.2.1 *De IGCC demonstratie centrale in Varnamo*^(h)

^(h) R.G.Lungdqvist
'The IGCC demon-stration
plant Varnamo'
Bioresource Technology
46(1993)49-53

IGCC staat voor Integrated-Gasification-Combined-Cycle. Het processchema van een IGCC staat op de pagina hiernaast afgebeeld, figuur 2.3.1.1 De proeffabriek wekt 6MW aan elektriciteit op en 9 MW aan warmte, te leveren aan woningen of industrie.

Een IGCC centrale werkt volgens hetzelfde principe als een kolenvergassing-centrale. De voeding van een IGCC centrale (Gasification) wordt vergast in een hoge druk reactor. Vervolgens worden de gassen gezuiverd van verontreinigingen als deeltjes of sulfaten. Het gezuiverde gas wordt naar een gasturbine geleid, alwaar het verbrandt en expandeert. De rookgassen van de gasturbine worden door een waste-heat-steam generator gevoerd, alwaar superheated-steam opgewekt wordt. Deze stoom drijft een tweede turbine aan.

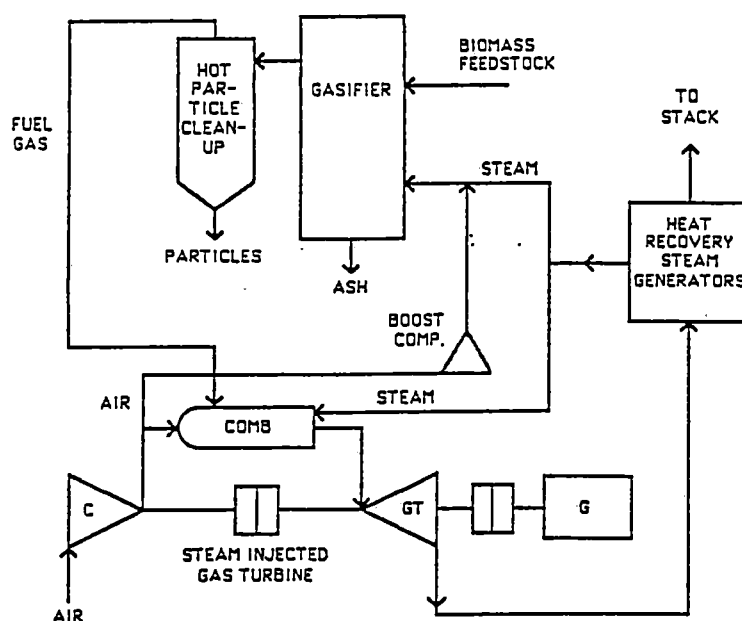
Tabel 2.2.1.1

Kosten van het IGCC proefproject te Varnamo

Plant size	18 MW fuel input
Fuel	Wood waste, wood chips
Dry solids in fuel	45-55%
Gasification pressure	approx. 24 bar
Gasification temperature	950-1000°C
Product-gas heat value	approx. 5 MJ/m ³ n
Total efficiency	82-83%
Power production	6 MW
District heating	9 MW
Steam temperature	470°C
Steam pressure	40 bar
Plant owner	Sydkraft Ab
Gasifier	Ahlstrom Pyroflow
Ceramic filter	Schumacher
Gas turbine	European Gas Turbine, Ruston
Steam turbine	Nadrowski
Waste-heat boiler	Ahlstrom Termoflow
Booster compressor	Ingersoll-Rand

Figuur 2.2.2.1

STIG processchema



Voordelen van dit proces zijn:

- * hoge elektrisch rendementen, >45%
- * voedingen met lage energiewaarden worden met een hoog rendement omgezet.
- * de uitstoten van deze centrale zijn laag, in de biomassa voeding zit al vrij weinig sulfaat, zodat de uitstoot gering zal zijn. Door de hoge temperatuur in de turbine zal verder weinig CO ontstaan.

De bouw van dit proefproject is begonnen in 1991. Volgens planning zal de centrale vanaf 1995 commercieel operationeel zijn. De data van het proces zijn te zien in tabel 2.2.1.1.

Het bovenstaande proces is nog niet in gebruik. Aangezien de centrale veel gelijkenissen vertoont met de kolenvergassingcentrale te Buggenum ⁽ⁿ²⁾, is het nuttig de resultaten van een moderne kolenvergasser te vermelden. Deze centrale heeft een capaciteit van 250 MWe en een elektrisch rendement van 43%. Het voorspelde elektrisch rendement in Varnamo, 33% (6 MW/18 MW) ligt lager. In Varnamo wordt echter ook warmte geproduceerd, zie tabel 2.2.1.1. Vergelijking van het elektrisch rendement alleen is daarom niet voldoende om een beeld van de totale efficiency te krijgen.

Een verschil tussen biomassa en kool is dat biomassa een veel hoger percentage vluchtige componenten bezit. Hierdoor is biomassa gemakkelijker te vergassen, biomassa wordt in een vergasser geheel vergast terwijl er bij kolenvergassing altijd een hoeveelheid as achterblijft. Zodoende zou het totaal rendement van een biomassa centrale hoger uit kunnen vallen.

⁽ⁿ²⁾ De bouw van 's werelds grootste kolenvergasser te Buggenum, 1992

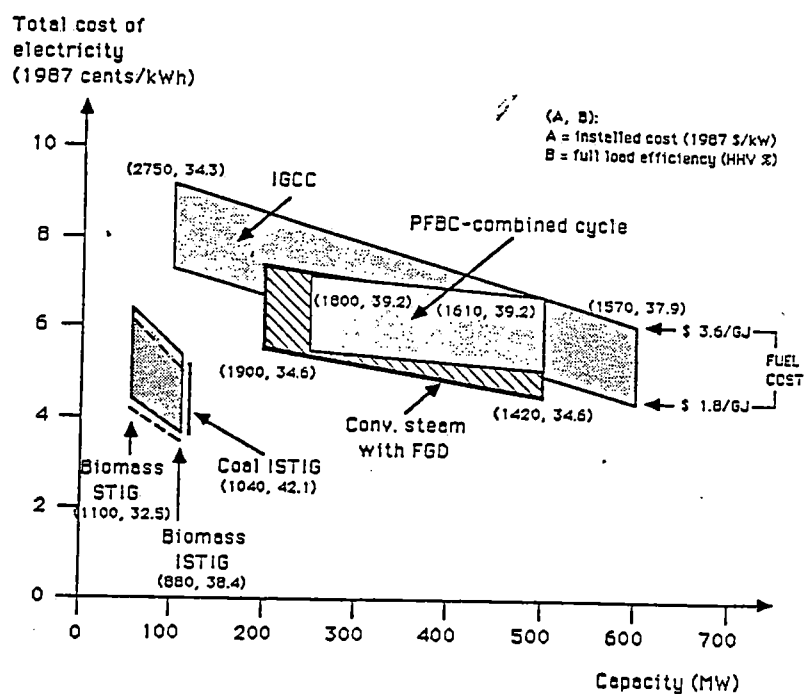
2.2.2 Biomass Integrated Gasification Steam Injected Gasturbine (BIG-STIG)

Een andere techniek waarvan de verwachtingen hoog gespannen zijn is vergassing van biomassa, gevolgd door een STIG-centrale^(o,p), wat staat voor STeam Injected Gas-turbine. Het processchema van een STIG centrale is afgebeeld in figuur 2.2.2.1.

Het verschil met STEG zit in de stoomopwarming, bij STIG wordt de stoom in de afgasstroom geïnjecteerd, terwijl bij

Figuur 2.2.2.1

Verwachte kosten van elektriciteit opgewekt met STIG en ISTIG centrales



Deze kosten zijn berekend met:

- kapitaalafschrijving in 30 jaar
- een rentevoet van 6%
- 70% capaciteitsbenutting
- voedingskosten van \$1.8/GJ tot \$3.6/GJ
- efficiënties van 32.5-38.4% (STIG)
35.6-42.1% (ISTIG)

⁽⁹⁾ E.D.Larson

'Development of biomass gasification systems for gas turbine power generation.'

Energy from Biomass and Wastes XIV
blz 797-813

⁽⁹⁾ E.D.Larson

'Biomass Gasifier Steam Injected Gas Turbine cogeneration for the sugar cane industry'

Energy from Biomass and Wastes XIV
blz 781-797

STEG warmtewisseling plaats vindt. Hierdoor wordt een warmtewisselaar uitgespaard, wat leidt tot lagere kapitaalkosten, maar ook tot een lager rendement. Het grote voordeel van STIG voor biomassa toepassingen is dat STIG ook toegepast worden voor kleine schaal productie (+/- 25 MW). Dit is voor Combined Cycle centrale minder goed mogelijk..

ISTIG (Intercooled STIG) is een techniek die nog in de ontwikkelingsfase verkeerd voor toepassing in aardgas-centrales. Met deze techniek worden nog iets beter efficiencies verwacht, zoals ook te zien is in figuur 2.2.2.2.

In figuur 2.2.2.2 is verder te zien dat de kosten van elektriciteit opgewekt in een STIG vergelijkbaar zijn met de huidige elektriciteitsprijzen en zouden dus economisch gezien rendabel zijn. Wel moet gezegd worden dat het hier om schattingen gaat wat betreft de biomassa toepassingen. Er zijn nog geen proefprojecten die deze waarden bevestigen.

2.3 *Omzetten van afvalhout in elektriciteit in Nederland⁽⁹⁾.*

Het omzetten van afvalhout in elektriciteit is een proces waarnaar recentelijk onderzoek is gedaan voor toepassing in Nederland. Het voordeel van het gebruik van afvalhout als voeding is dat afvalhout een negatieve waarde heeft, er wordt betaald om het te verwerken. Hier tegenover staat dat er in het afvalhout allerlei verontreinigingen aanwezig zijn die bij verwerking vrijkomen. Rookgassen zullen daardoor een aantal zuiveringsprocessen moeten doorlopen.

Voor het proces wordt gekeken naar de prijs die voor het te verwerken hout gevraagd moet worden om het proces rendabel te maken. De volgende opties worden behandeld:

Vergassing

-) Hoge druk vergassing met nageschakelde gasturbine in een STEG configuratie is bij enkele leveranciers in ontwikkeling, maar nog niet toepasbaar. Naar verwachting is deze techniek pas over vijf jaar commercieel verkrijgbaar.
-) Vergassing als voorgeschakelde eenheid voor gaslevering. Nadeel is dat op grote schaal een grote afnemer gezocht moet worden voor het geproduceerde synthesegas..

Tabel 2.3.1 Kosten voor thermische houtverwerking bij verschillende verbrandingsprocessen.

type	investering f milj	hout-tarief f/ton	elektrisch rendement	netto E- produktie MW
VERGASSING				
met gasmotor, vastbed	80	109	23 %	12
gaslevering, circ.wervelbed	28 43	30 43	nvt	nvt
VERBRANDING				
rooster ¹	74	107	17,8 %	10,0
	129	164	22,2 %	11,5
	99	154	20,0 %	11,4
meer-traps	98	159	17,9 %	9,0
circ. wervelbed	125	149	25,8 %	13,1
	122	152	27,4 %	14,8

Voordelen van vergassing in het algemeen zijn:

- 1) Vanwege de reducerende omstandigheden ontstaan er vrijwel zeker geen dioxines.
- 2) Bij verbranding van het gas in low-NOx branders is toepassing van DeNOx wellicht niet noodzakelijk.
- 3) De te reinigen hoeveelheid gas is aanzienlijk lager.
- 4) In potentie kan met vergassen een hoger elektrisch rendement bereikt worden door een STEG toe te passen.

Verbranding:

-Wervelbed verbranding heeft de voorkeur boven roosterverbranding vanwege;

- 1) Een hoger rendement (25-27 t.o.v. 18-23).
- 2) Een wervelbed is flexibeler ten aanzien van de samenstelling van de voeding.
- 3) Constantere procescondities, waardoor de verbranding volledig is en de kans op dioxine/NOx vorming kleiner.

De geschatte kosten van de verschillende mogelijkheden zijn te zien in tabel 2.3.1. Aanbevolen wordt vergassing met gaslevering nader te onderzoeken, een afnemer moet nog gevonden worden. Voor elektriciteits opwekking wordt wervelbed verbranding als de meest geschikte optie gezien, aangezien met de vergassings-installaties nog geen of niet voldoende ervaring is opgedaan om deze installaties commercieel toe te passen.

Lit(a) Voorstudie Thermische
Houtverwerking
NV PNEM
NV PGEM
BFI BV

3 *Transportbrandstof uit biomassa.*

De voornaamste transportbrandstoffen, benzine, diesel en kerosine worden geproduceerd uit fossiele bronnen. Evenals bij de produktie van elektriciteit wordt om de volgende twee redenen gezocht naar alternatieve bronnen. Ten eerste vindt bij verbruik van fossiele brandstoffen CO₂ produktie plaats, een stof waarvan de uitstoot wel eens aan banden gelegd zou kunnen worden. Verder blijken de voorraden aan fossiele brandstoffen te slinken, waardoor de prijzen van uit fossiele bronnen afkomstige produkten zullen gaan stijgen.

De in gebruik zijnde motoren, die aangedreven worden door brandstoffen uit fossiele bronnen, zijn gedurende de laatste honderd jaar ontwikkeld en geperfectioneerd. Om deze ervaring te gebruiken wordt vooral gezocht naar een transportbrandstof die qua eigenschappen zo veel mogelijk gelijkenis vertoont met de traditionele transportbrandstoffen en die bovendien duurzaam is. Uit biomassa kunnen verschillende produkten worden geproduceerd die aan beide criteria voldoen.

Een voorbeeld van een transportbrandstof die uit biomassa geproduceerd kan worden is ethanol. Produktie van dit zogenaamde bio-ethanol vindt, in tegenstelling tot de produktie van elektriciteit uit biomassa, al zo'n tien jaar op grote schaal plaats. Bio-ethanol kan gebruikt worden als vervanging voor benzine. De verbrandingsmotor moet dan ligt aangepast worden. Voor verbranding van een mengsel van bio-ethanol met benzine zijn geen aanpassingen aan de motor nodig. Dit is mogelijk tot verhoudingen van 10-90, ethanol-benzine.

De kosten van bio-ethanol produktie liggen nog beduidend hoger dan de marktwaarde van ethanol (uit aardolie). In 1987 was produktie van ethanol uit biomassa voor 12 \$/GJ^(*) mogelijk in Brazilië. In de V.S waren de produktiekosten hoger, ongeveer 22 \$/GJ, met name door hogere grondstofkosten. De prijs van ethanol op de wereldmarkt bedroeg echter slechts 4 \$/GJ. Door een hogere olieprijs en door technische verbeteringen in het ethanol produktie proces zouden deze prijzen in de toekomst dichterbij elkaar moeten komen te liggen.

Naast bio-ethanol is ook produktie van andere transportbrandstoffen mogelijk. Uit koolzaad kan de brandstof

^(*) P.Elliott end R.Booth
'Sustainable biomass
energy'
Shell selected papers
december 1990

koolzaad-methyl-ester geproduceerd worden, wat ter vervanging van diesel kan dienen. Ook uit biomassa geproduceerde methanol zou als transportbrandstof toegepast kunnen worden. Deze processen verkeren nog in een ontwikkelingsfase, waardoor van voorspellingen en ervaringen met proefinstallaties moet worden uitgegaan.

Van de volgende processen wordt een nadere toelichting aan de hand van voorbeeldprocessen gegeven:

- Productie van ethanol
- Productie van synthesesgas (al of niet gevolgd door methanol productie)
- Productie van koolzaad-methyl-ester

3.1 ***huidige ervaringen***

De huidige ervaringen met produktie van transportbrandstoffen uit biomassa bestaan hoofdzakelijk uit produktie van ethanol.

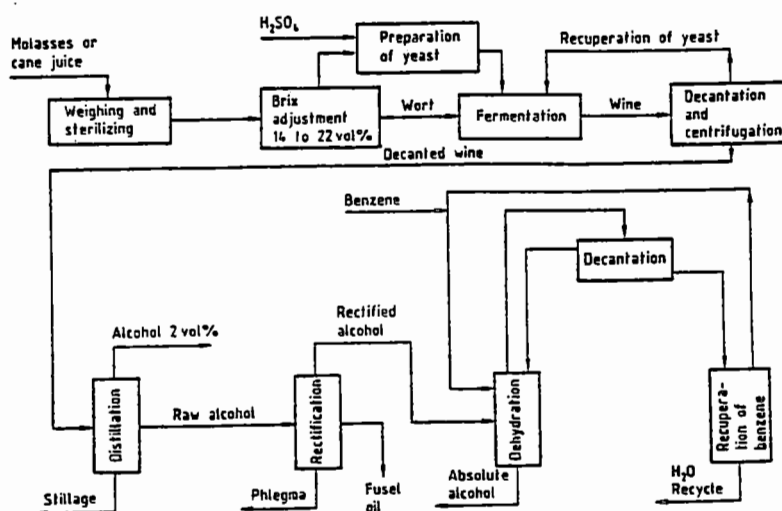
Bio-ethanol wordt geproduceerd door middel van fermentatie. Als grondstof worden verschillende gewassen gebruikt. De volgende indeling kan worden gemaakt ⁽⁵⁾.

-) Ethanol uit suikers (suikerriet, biet, fruit e.a). Deze suikers kunnen direct als substraat ingezet worden in een fermentatieproces, waar door enzymen alcohol wordt geproduceerd. Het grootste gedeelte van deze suikers wordt echter gebruikt voor consumptie van mens en dier. De prijs als grondstof is mede daardoor hoog.
-) Ethanol uit zetmeel (granen, aardappels e.a). Deze gewassen moeten eerst omgezet worden in suikers die ingezet kunnen worden in een fermentatieproces. Deze omzetting vindt plaats in een extra fermentatieproces, waar zetmeel door enzymen wordt omgezet in suikers.
-) Ethanol uit cellulose (hout, energie gewassen). Voor cellulose geldt hetzelfde als voor zetmeel, het moet eerst worden omgezet in een produkt, wat dienst kan doen als substraat voor de fermentatie waar alcohol wordt geproduceerd. Dit kan bijvoorbeeld gebeuren door reactie met een mineraal zuur, gevolgd door een enzymatische omzetting in het gewenste

⁽⁵⁾ N.Kosaric
'Development of short
residence time ethanol
fermentation process'
Energy from Biomass and
Wastes XIV
blz 1127-1142



Figuur 3.1.1 Produktieschema van een fermentatie proces voor de productie van ethanol.



substraat.

Een typisch produktieschema van een fermentatie proces voor de produktie van ethanol is te zien in figuur 3.1.1. Dit proces is geschikt voor suikerriet/bieten voeding. Voor processen waar de voedingen bestaan uit zetmeel of cellulose moet een extra stap aan het proces toegevoegd worden, waar de voor fermentatie noodzakelijke suikers geproduceerd worden.

Een grote kostenpost bij het produktieproces van ethanol is de azeotropische distillatie, die noodzakelijk is om tot een zuiver eindprodukt te komen. Een zuiver eindprodukt is noodzakelijk als de geproduceerde bio-ethanol als mengsel met benzine in bestaande motoren gebruikt gaat worden. Na menging met benzine zal anders het nog in bio-ethanol aanwezige water ontmengen, waardoor verbranding in bestaande motoren niet meer zonder problemen zou verlopen. Als de bio-ethanol voor gebruik in zogenaamde Elsbett-motoren wordt gefabriceerd hoeft het produkt minder zuiver te zijn.

De fermentatie vindt tot nu toe vooral plaats in batch-reactoren. In de toekomst wordt een verbetering van de efficiency verwacht door toepassing van continue processen.

3.1.1 Ethanolproduktie in Brazilië

Veruit het belangrijkste gewas voor de produktie van bio-ethanol in Brazilië is suikerriet. De kostprijs van in Brazilië geproduceerde bio-ethanol ligt rond de 12 \$/GJ.

Brazilië is het enige land ter wereld waar bewust op grote schaal gewassen geteeld worden als energiebron. Er wordt jaarlijks zo'n 12 miljoen liter ethanol ⁽¹⁾ geproduceerd uit biomassa, waarvoor +/- 4000 ha land nodig is waarop biomassa voor energieproduktie wordt geteeld. 20% van het energie verbruik van de transportsector in Brazilië berust op verbruik van bio-ethanol.

Deze uitzonderlijke positie is tot stand gekomen door grote overheidssubsidies op de produktie van bio-ethanol. Deze subsidies waren oorspronkelijk gericht op het stimuleren van de produktie van bio-ethanol, zodat de braziliaanse economie minder afhankelijk zou worden van olie-import. In de tijd dat

⁽¹⁾ H.Rothman, R.Green-shields and F.Calle. 'Energy from alcohol the Brazilian experience' 1983

deze subsidies ingevoerd werden (1980) waren de olieprijsen extreem hoog en werden voor de toekomst nog hogere prijzen verwacht. De prijs van olie is sindsdien echter fors gedaald. Bovendien is de suikerprijs sterk gestegen. Deze factoren zorgen ervoor dat de kosten van bio-ethanol ten opzichte van de kosten van ethanol uit fossiele bronnen veel hoger zijn uitgevallen dan verwacht. Verder is er de laatste jaren olie gevonden op Braziliaans grondgebied, waardoor de oorspronkelijke redenen achter de invoering van bio-ethanol in Brazilië achterhaald zijn. De subsidiëring wordt tegenwoordig daarom niet meer uitgebreid, indien mogelijk zelfs beperkt.

^(u) P.Elliott end R.Booth
'Sustainable biomass energy'
Shell selected papers
december 1990

^(u) S.R.Bull
'Tge U.S. Department of
energy biofuels research
program'
Energy From Biomass and
Wastes XIV pag. 1-5

3.1.2 Ethanol produktie in de Verenigde Staten ^(r,u).

Na Brazilië is de V.S de grootste producent van biomassa als energiebron. Ook in de V.S is bio-ethanol het belangrijkste eindprodukt. Jaarlijks wordt ongeveer 3 miljoen liter bio-ethanol geproduceerd. Het meest gebruikte gewas, voor de voeding van processen voor de produktie van bio-ethanol, is maïs. Maïs wordt gebruikt omdat in de V.S een grote overproduktie van dit gewas plaatsvindt. De verwerking van deze overschotten wordt sterk gesubsidieerd. Omdat onder andere de grondstofkosten en de arbeidskosten in de V.S veel hoger zijn dan in Brazilië is ook het eindprodukt duurder. De kostprijs van in de V.S geproduceerde bio-ethanol ligt rond de 22 \$/GJ.

3.2. ****nieuwe ontwikkelingen****

De tot nu toe behandelde processen voor de produktie van ethanol gebruiken voedingen van suikerriet of graan. Dit zijn vrij dure gewassen mede omdat ze ook een waarde hebben als voedingsmiddel. Om de kostprijs van transportbrandstoffen op basis van biomassa te drukken zijn processen ontwikkeld en in ontwikkeling die uitgaan van andere, goedkopere voedingen, zoals bijvoorbeeld hout.

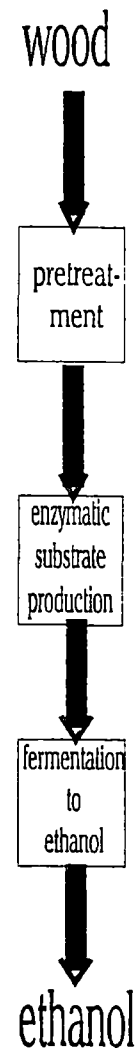
In deze processen wordt niet alleen bio-ethanol geproduceerd. Alternatieve transportbrandstoffen die uit biomassa geproduceerd kunnen worden zijn:

- methanol (via synthesesgas)
- koolzaad-methyl-ester

De processen voor produktie van deze transportbrandstoffen

Figuur 3.2.1.1

Globaal produktieschema voor de productie van ethanol uit hout.



worden hieronder toegelicht.

3.2.1 Nieuwe technieken voor ethanol productie^(w)

^(w) B.E.Foody and

K.J.Foody

'Development of an integrated system for producing ethanol from biomass.'

Energy from Biomass and Wastes XIV

blz 1225-1241

Goedkopere biomassa's als hout zijn minder geschikt als voedingen voor het fermentatie proces waar ethanol geproduceerd wordt. Er is weinig suiker aanwezig in de biomassa en het materiaal dat aanwezig is vaak moeilijk om te zetten in suikers, die als voeding voor het fermentatie proces kunnen dienen.

Het globale processchema voor productie van ethanol uit hout is te zien in figuur 3.2.1.1.

Voor de productie van bio-ethanol uit maïs wordt de voeding met een enzym in contact gebracht zodat substraat voor het fermentatieproces wordt gevormd. Bij gebruik van hout zou ditzelfde proces gigantische hoeveelheden enzym vergen. De omzetting van cellulose in suikers gaat veel moeilijker dan omzetting van zetmeel in suikers. Bij gebruik van hout als voeding wordt daarom nog een voorbehandelingsstap aan het proces toegevoegd.

Deze voorbehandelingsstap heeft als doel het beter toegankelijk maken van het aanwezige cellulose voor de suiker producerende enzymen. Er is nog geen voorbehandelingsproces wat de problemen echt oplost. Na behandeling is nog steeds een ongeveer honderd keer hogere hoeveelheid enzym nodig om de voeding in substraat om te zetten dan bij substraatproductie uit zetmeel..

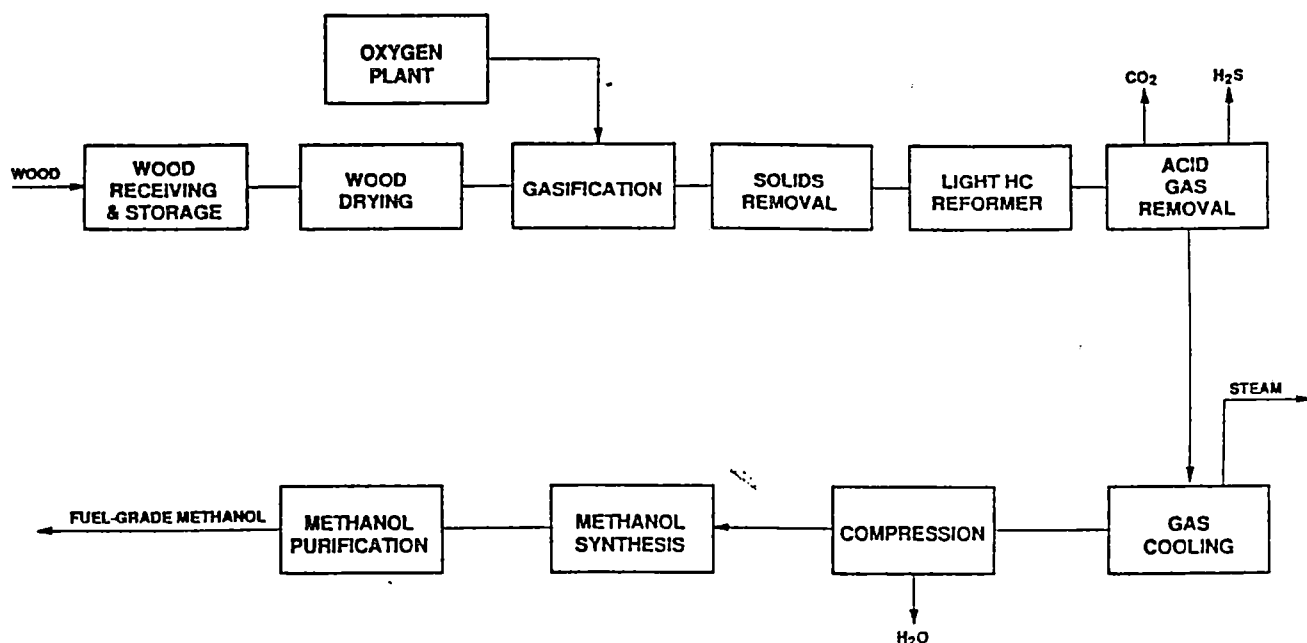
De efficiency van deze processen voor ethanol productie uit goedkopere biomassa voedingen ligt iets hoger dan de efficiency van een proces waar bio-ethanol uit maïs geproduceerd wordt. Met technieken die in proefprojecten bewezen zijn is een prijs van 18 \$/GJ ethanol berekend.

3.2.2 Productie van methanol uit biomassa, Thermal Process Plants ^(v).

Methanol wordt normaal gesproken niet, zoals ethanol, als mengsel met gewone benzine gebruikt. Het wordt

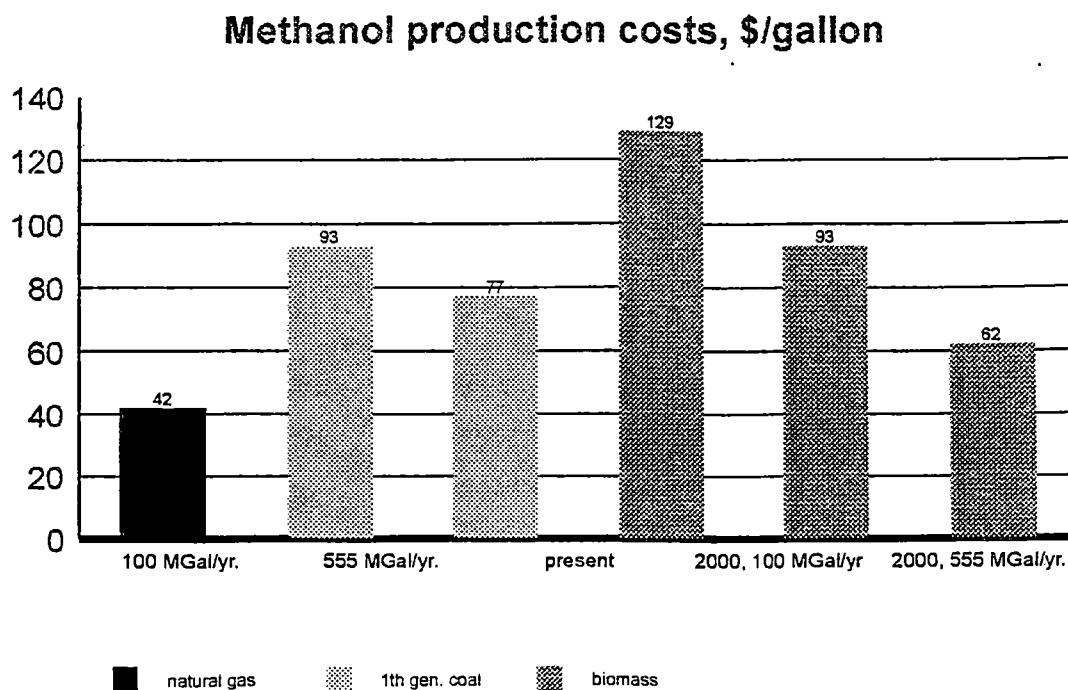
Figuur 3.2.2.1

Produktieschema voor de productie van methanol uit hout.



Figuur 3.2.2.2

Kosten van methanol-productie uit verschillende bronnen.



(v) D.J. Stevens

'Methanol from biomass:
A technoeconomic analysis'Energy From Biomass and
Wastes XIV pag.1245-
1263

jaar?

daarentegen als pure brandstof toegepast, in motoren die voor methanolgebruik aangepast zijn. De noodzakelijke aanpassingen zijn gering. De prestaties van motoren op methanol zijn erg goed, waardoor voor sommige racewagen motoren methanol al als voeding wordt toegepast.

Een grootverbruiker van methanol zijn MTBE fabrieken, waar methanol als voeding dient. MTBE wordt veel aan huidige brandstof toegevoegd, om het octaangetal verhogen. De methanol die gebruikt wordt voor produktie van MTBE doet via een omweg eigenlijk dienst als transportbrandstof. Uit biomassa geproduceerde methanol zou ook op deze manier verwerkt kunnen worden.

Het proces om methanol vanuit biomassa energie te produceren berust op de volgende reacties:



Een processchema van een proces waar methanol geproduceerd wordt uit hout is gegeven in figuur 3.2.2.1. De voeding, hout, wordt versnipperd en vervolgens gedroogd. De droge houtsnippers reageren in de vergasser met zuurstof. Het hete synthese gas dat ontstaat wordt gekoeld. De hoeveelheid methaan in het synthese gas wordt gereduceerd in een reformer en de gassen CO_2 H_2S worden verwijderd. Vervolgens vindt methanol synthese plaats.

De kosten van methanol uit biomassa staan gedrukt in figuur 3.2.2.2, in verhouding tot de kosten van methanol, geproduceerd uit andere grondstoffen. Hier is te zien produktie van methanol uit aardgas behoorlijk goedkoper is dan produktie van methanol uit biomassa. Aangezien Nederland een grote producent van aardgas is lijkt methanolproduktie voor de nederlandse markt niet erg voor de hand liggend. Voordat produktie van methanol uit biomassa rendabel is zal eerst de prijs van aardgas omhoog moeten.

Een groot voordeel van het methanol produktie proces is dat in principe vele soorten biomassa als voeding kunnen worden toegepast. Zodat per locatie de goedkoopste voeding gekozen kan worden. Een gebouwde installatie zal echter wel dusdanig specifiek zijn dat slechts een type voeding toegepast kan worden.

3.3 *Productie van koolzaad-methyl-ester in Nederland* ^(b)

De productie van koolzaad-methyl-ester is vooral ontwikkeld in Europa, voor de Europese markt. In Oostenrijk en Frankrijk draaien een aantal proefinstallaties met kleine capaciteit en wordt gebouwd aan grotere productie-eenheden.

Koolzaad-methyl-ester (KME) wordt verkregen door reactie van methanol met koolzaad-olie. Koolzaad-olie is een produkt dat ontstaat bij het persen van koolzaad. In een aangepaste motor kan deze brandstof direct gebruikt worden. In een conventionele diesel motor veroorzaakt koolzaadolie een te grote vervuiling, waardoor de motor na enige tijd zal verstopen.

De verestering die noodzakelijk is om koolzaadolie geschikt te maken voor toepassing in dieselmotoren vindt plaats in processen die al langere tijd bekend zijn in de industrie (b.v. bij fabricage van detergentia).

De kosten van KME hangen sterk af van de voedingskosten. Het telen van koolzaad in Nederland kost ongeveer 1000 gulden/ton. De marktprijs ligt, o.a. door subsidies, echter rond de 400 gulden per ton. Met deze huidige marktprijs van koolzaad komen de kosten van KME uit biomassa uit op rond de 25 \$/GJ. Op basis van de kostprijs van koolzaad in Nederland wordt dit getal veel hoger, 51 \$/GJ. Beide kosten vallen iets lager uit, als de opbrengsten van bijprodukten (voornamelijk glycerol en veevoer) meegerekend worden. Deze opbrengsten komen neer op een reductie in de KME-kosten van 6 \$/GJ. Bij grootschalige KME productie is het echter waarschijnlijk dat de marktwaarde van glycerol aanzienlijk zal dalen.

Bij de huidige marktprijzen van koolzaad is KME uit biomassa een produkt dat voor ongeveer dezelfde kosten als bio-ethanol kan worden geproduceerd. Ook dit produkt is nog niet rendabel in vergelijking met de alternatieven die geproduceerd kunnen worden uit fossiele bronnen.

^(b) NOVEM

'De haalbaarheid van de productie van biomassa voor de Nederlandse Energiehuishouding.'
april 1992

^(a) NRLO

'Het gebruik van agrarische produkten voor transportbrandstoffen'
juli 1990

4 *Produktprijs vergelijking.*

Nu de belangrijkste processen om energie uit biomassa te produceren beschreven zijn kunnen deze processen onderling vergeleken worden. Oorspronkelijk was gepland om als de verschillende processen exergetisch te vergelijken. Op deze manier komt het proces dat het zuinigst met energie omspringt als het beste proces uit de bus. Om te bepalen welk proces het meest geschikt is voor produktie van duurzame energie lijkt dit een goede maatstaf.

Deze maatstaf is echter niet gebruikt, omdat de exergie verliezen die binnen de processen optreden in geen van de artikelen gegeven worden. Gegevens als entropiën en enthalpiën van processtromen, die nodig zijn om een exergieanalyse toe te passen worden ook niet genoemd. Voordat processen voor produktie van energie uit biomassa op basis van hun exergiegebruik kunnen worden geëvalueerd is nader onderzoek nodig.

Een gegeven wat voor beide processen in vrij veel artikelen beschreven is zijn de gerealiseerde of verwachte kosten per gigajoule eindprodukt. Op grond van deze kosten zijn de processen voor produktie van energie uit biomassa onderling vergeleken. Deze maatstaf kan echter wel een vertekend beeld geven. Voor de berekening van de kosten moeten allerlei aannamen gedaan worden. Details over deze aannamen staan meestal niet vermeld, zodat niet gecheckt kan worden of ze vergelijkbaar zijn. De toegepaste vergelijking op basis van prijs per gigajoule eindprodukt moet daarom als een kwalitatieve vergelijking gezien worden, voor een kwantitatieve vergelijking zijn onvoldoende gegevens beschikbaar.

Van grote invloed op de berekende prijs per GJ eindprodukt zijn onder andere:

- De aannamen die gedaan zijn voor de bepaling kapitaal- en grondstofkosten. Bijvoorbeeld met betrekking tot de snelheid waarmee geïnvesteerd kapitaal moet worden terug gewonnen (capital recovery rate).
- De capaciteit van het proces.
- Of de kosten berekend zijn voor een bestaande processen of voor toekomst verwachtingen.
- De locatie van het proces.

Tabel 4.1.1 De kosten van elektriciteitsproductie uit biomassa

proces	elektrische efficiënie	kosten
Conventionele kolencentrale	~30	4 \$cent/kWh 11 \$/GJ
Conversie van afvalproducten bij suiker/houtproductie	15-20	6.5-8 \$cent/Kwh 18-22 \$/GJ
Avfval Verbranding I.	23	gelijk aan conventionele kosten door negatieve waarde voeding
IGCC demonstration plant	45	4-6 \$cent/kWh 11-17 \$/GJ
Thermische houtverwerking	25-27	(#) 22 \$/GJ

(#) gelijk aan conventionele kosten met voedingskosten van -9\$/GJ, de afgedrukte kosten gelden bij een voedingsprijs van 4\$/GJ

Voor Methanol is de invloed van enkele van deze factoren te zien in tabel 4.1.

tabel 4.1 kosten van methanol uit biomassa in \$/GJ

capital recovery	Present, capacity 2000 ton/day	new (2000), 2000 ton/day	new (2000), 10000 ton/day
0 %	8.0	6.5	4.6
20 %	18	13	8.2
30 %	23	16	10

Bij een vergelijking op basis van de kosten per GJ eindprodukt moet verder rekening gehouden worden met het verschil in benuttingspotentieel tussen energie in de vorm van elektriciteit en energie in de vorm van transportbrandstof. Dit kan geïllustreerd worden aan de hand van een vergelijking tussen benzine -en elektromotoren. Automotoren op fossiele brandstoffen hebben rendementen van om de 40%. Elektromotoren kunnen veel hogere rendementen behalen van rond de 80%. Voor produktie van transportbrandstof zou dus alleen gekozen moeten worden als de kosten van produktie van één GJ transportbrandstof minder dan de helft van de kosten van produktie van één GJ elektriciteit zouden bedragen. Aanpassing van alle vervoermiddelen en distributie systemen zijn bij deze vergelijking buiten beschouwing gelaten. Bovendien is efficiënte opslag van elektriciteit in auto's nog een groot technisch probleem. Het verkregen beeld gaat daarom niet helemaal op, maar energie in de vorm van elektriciteit is wel meer waard dan energie in de vorm van een transportbrandstof.

4.1 Produktprijs vergelijking van elektriciteits- produktie.

De gevonden kosten per GJ eindprodukt voor de opwekking van elektriciteit uit biomassa staan gedrukt in tabel 4.1.1.

Te zien is dat de kosten van elektriciteit uit biomassa met behulp van IGCC technologie dicht in de buurt van de huidige produktiekosten komen te liggen. Echter deze techniek

zou ook op processen met voedingen van fossiele aard toegepast kunnen worden waardoor ook de uit fossiele brandstof opgewekte elektriciteit goedkoper zou worden. Verder moet nogmaals vermeld worden dat de produktkosten sterk afhankelijk zijn van de locatie waar de installatie zich bevindt. Een IGCC-proces zoals beschreven is (in Finland) zou in Nederland waarschijnlijk duurder uitpakken, vanwege een hogere voedingsprijs (hout).

⁹⁾ H.A. Stuurman e.a.
'Energy from lignocel-
lulosic Biomass, Prospects
for the E.U'.
1994

Voor de produktie van elektriciteit uit biomassa in Nederland is een productprijs berekend, uitgaande van het proces voor thermische verwerking van afvalhout in Nederland. Er is echter uitgegaan van een alternatieve voeding, namelijk populieren die voor energie produktie geteeld zijn. Verwacht wordt ⁹⁾ dat de produktiekosten van populier, een van de meest geschikte energie gewassen voor teelt op nederlandse bodem, rond de 4 \$/GJ komen te liggen. Kosten van elektriciteit opgewekt met de installatie voor afvalhoutverwerking komen dan op $4+9+11=22$ \$/GJ. In werkelijkheid zouden deze kosten iets lager uitvallen omdat een populieren voeding minder verontreinigingen bevat dan een voeding die uit afvalhout bestaat. De kosten van het reinigen van de afgassen zullen daarom lager uitvallen. Deze productprijs voor verwerking van afvalhout tot elektriciteit ligt iets hoger dan de productprijs berekend voor de andere biomassa-elektriciteit installaties. De oorzaak daarvoor is:

-t.o.v IGCC is een veel minder efficiënte techniek gekozen, omdat de IGCC techniek nog niet voldoende bewezen werd geacht voor toepassingen met een voeding van verontreinigd afvalhout.

-t.o.v de bedrijfsafvalhout verwerkingsinstallaties moet voor de grondstof, hout een hogere prijs betaald worden.

Een verdere reductie van de kosten van elektriciteit uit biomassa en een hogere totale efficiency kan nog verkregen worden door toepassing van warmtekracht koppeling. Ook hier geldt dat eenzelfde reductie mogelijk is bij opwekking van elektriciteit uit fossiele bronnen.

Tabel 4.2.1 De kosten van transportbrandstofproductie uit biomassa

process	kosten
gasoline from petroleum (\$15/bbl)	7.5 \$/GJ
gasoline from petroleum (\$30/bbl)	15 \$/GJ
Ethanol in Brazilië	12 \$/GJ
Ethanol in de V.S	22 \$/GJ
methanol	13 \$/GJ (*)
Koolzaad Methyl Ester	19 \$/GJ of 45\$/GJ (**)

(*) Voor methanol zijn de verwachte kosten genomen voor het jaar 2000 genomen bij een capital recovery rate van 20%. Deze waarde is genomen omdat deze aannamen ook van toepassing zijn voor de berekende KME prijs. De twee ethanol processen zijn beproefde technieken, geen verwachtingen maar ervaringen. In de literatuur van deze processen stond niet vermeld welke aannamen verder voor de berekening van de kosten gelden.

(**)De kosten van KME hangen sterk af van de voedingsprijs, 45 \$/GJ is de prijs berekend met de kostprijs van in Nederland geteelde koolzaad. 19 \$/GJ is de prijs berekend met de huidige marktprijs van koolzaad.

4.2 *Produktprijs vergelijking van transportbrandstofproductie.*

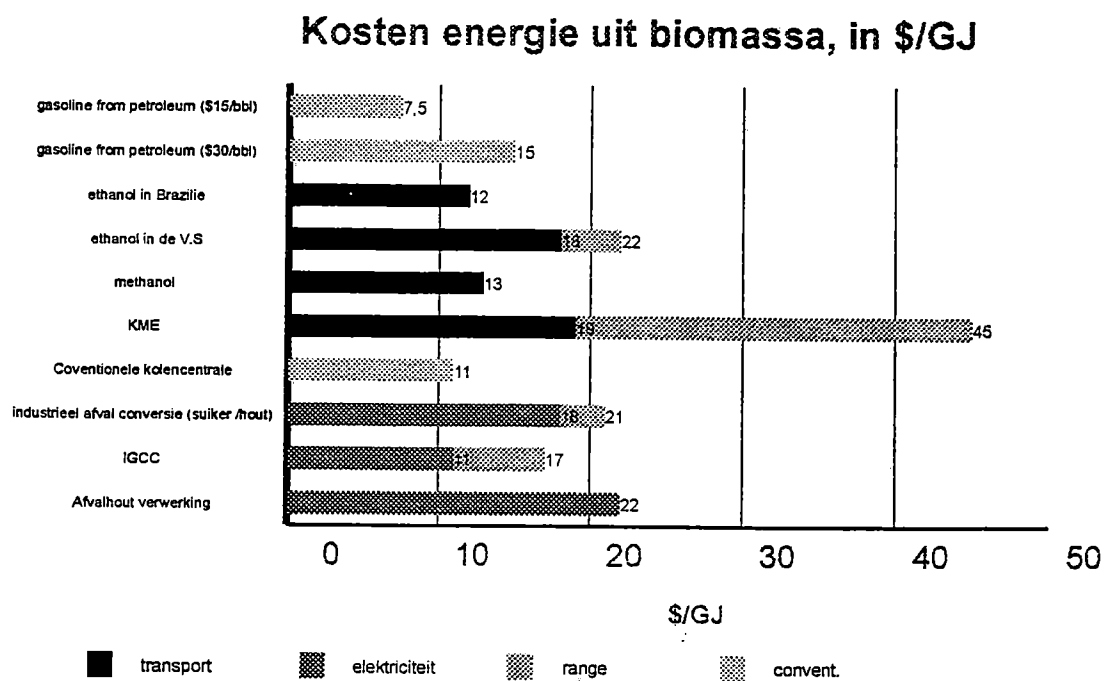
De kosten per gigajoule eindprodukt van transportbrand-stoffen uit biomassa zijn is te zien in tabel 4.2.1.

In vergelijking met de kostprijs van transportbrandstof opgewekt uit aardolie (de huidige aardolieprijs ligt rond de 18 \$/bbl) blijken de kostprijzen van de verschillende processen nog te hoog. Ethanol productie in Brazilië komt als voordeligste optie uit de bus. De kosten, voor een proces waar bio-ethanol geproduceerd wordt, zouden in Nederland echter heel anders uitpakken. Als voeding zou tarwe, graan of suikerbieten, genomen moeten worden. De prijs van deze gewassen ligt hier veel hoger ligt dan de suikerriet prijs in Brazilië. De produktprijs van bio-ethanol geproduceerd in Nederland zou waarschijnlijk zelfs hoger uitpakken dan de produktprijs van bio-ethanol in de V.S. Productie van bio-ethanol zal in Nederland pas rendabel worden bij een 2-3 maal hogere olieprijs.

Een voordeliger keus lijkt dan methanol uit biomassa. De berekende prijzen per GJ eindprodukt gelden echter voor de Amerikaanse markt. Bij productie in Nederland zal ook hier de prijs hoger uit zal vallen dan de gegeven waarde, omdat o.a de hout prijs in Nederland hoger ligt. De verschillen zullen wel minder groot zijn dan bij ethanolproductie.

Voor productie in Nederland is de produktprijs van Koolzaad Methyl Ester berekend. Bij de huidige marktprijs van koolzaad wordt een produktprijs berekend, van 19 \$ per gigajoule. Productie van KME voor deze prijs zou economisch rendabel worden bij een ongeveer 2 maal hogere olieprijs. Dan is nog geen rekening gehouden met de produktiekosten van koolzaad in Nederland, die veel hoger liggen dan de marktprijs. Als wordt uitgegaan van de produktiekosten van koolzaad stijgen de kosten per GJ KME tot 45 \$, verreweg de duurste optie.

Figuur 4.3.1 De kosten van elektriciteitsproductie en transportbrandstofproductie



4.3 *Onderlinge produktprijs vergelijking.*

fu figuur 4.3.1 is te zien dat de kosten per gigajoule eindprodukt van de meest efficiënte processen voor productie van elektriciteit en transportbrandstof aardig bij mekaar in de buurt liggen. Methanol uit biomassa kost 13 \$ per GJ, tegen 11-17 \$ per GJ voor elektriciteit uit biomassa, opgewekt in een IGCC-centrale (productie van bio-ethanol in Brazilië is even buiten beschouwing gelaten, omdat deze prijs alleen voor lokale productie in Brazilië geldt). Doordat de waarde van elektriciteit echter duidelijk hoger is lijkt productie van elektriciteit de beste optie voor de toekomst.

Als de kosten van twee processen voor de Nederlandse markt vergeleken worden, KME productie en productie van elektriciteit uit populieren (op basis van de voorstudie voor afvalhout verwerking), wordt dit bevestigd. De produktprijzen per GJ zijn ongeveer gelijk, respectievelijk 22 en 19 \$/GJ, de hogere waarde van elektriciteit per GJ maakt het proces voor productie van elektriciteit het meest rendabel. Een extra nadeel voor KME is dat de produktprijs veel hoger zal uitvallen, als de eigenlijke produktkosten van de grondstof koolzaad voor de berekening van de kostprijs worden gebruikt.

5 Conclusie

Een vergelijking tussen processen voor productie van transportbrandstoffen en processen voor de opwekking van elektriciteit op basis van het energetisch rendement bleek niet mogelijk. In de literatuur zijn onvoldoende gegevens te vinden over de energiestromen van, of de energieverliezen die optreden in de verschillende installaties. Er kan daarom geen beeld worden verkregen van het energetische rendement van de verschillende processen. Voor toepassing van een dergelijke vergelijking is nader onderzoek noodzakelijk. Als alternatieve maatstaf om de processen onderling te vergelijken zijn de kosten per gigajoule eindprodukt genomen.

Vergelijking van deze kosten voor transportbrandstoffen

(per GJ) met de kosten voor elektriciteit (per GJ), laat zien dat voor de gunstigste technieken deze kosten redelijk overeenstemmen. Methanol uit biomassa kost 13 \$ per GJ, tegen 11-17 \$ per GJ voor elektriciteit uit biomassa, opgewekt in een IGCC-centrale. Deze kosten zijn ruwe schattingen, zodat vooral naar de orde van grote gekeken moet worden. Als de produktiekosten gelijk zijn, dan is elektriciteit productie in de nabije toekomst economisch de meest aantrekkelijke optie. Energie in de vorm van elektriciteit heeft immers een hoger benuttingspotentieel dan energie in de vorm van transportbrandstof, waardoor de elektriciteitsprijs per GJ hoger ligt dan de transportbrandstofprijs per GJ.

In vergelijking met productie van energie uit fossiele bronnen is de productie van energie uit biomassa nog een duur, niet economisch alternatief. Echter als vergassing van biomassa, en daarmee IGCC opwekking van elektriciteit, toegepast kan worden komen de kosten van elektriciteit uit biomassa in de buurt van de kosten van elektriciteit uit fossiele brandstoffen. Volgens verwachtingen zal dit binnen 5-10 jaar het geval zijn. Door de invoering van belastingen op CO₂ uitstoot, of andere milieu heffingen, zou de productie van energie uit biomassa dan een economisch rendabel alternatief kunnen worden voor productie van energie uit fossiele bronnen.

wat nog niet eerder genoemd is maar zeker aandacht verdiend is de mogelijkheid om elektriciteit uit biomassa als speciaal produkt op de markt te brengen. Recentelijk zijn er stappen gezet om elektriciteit die op duurzame wijze is

geproduceerd, als apart produkt te verkopen. Dit naar aanleiding van het succes van produkten als scharreleieren waar bewezen is dat de consument best wat extra over heeft voor milieu bewuste artikelen. Deze stroom zou dan voor de produktieprijs verkocht kunnen worden, ook al ligt deze prijs hoger dan de prijs van 'gewone' stroom. Het verschil tussen fossiele en niet fossiele stroom is natuurlijk niet te zien, maar dit is ook het geval bij scharreleieren. Het gaat om het jasje waarin het produkt verpakt zit. Deze strategie is evengoed toepasbaar op de verkoop van transportbrandstoffen die uit biomassa geproduceerd kunnen worden.

Een ander punt wat extra aandacht verdient is dat produktie van energie uit biomassa meer voordelen kan bieden dan alleen het reduceren van de CO₂ uitstoot. In Brazilië werd biomassa energie produktie vooral toegepast om de handelsbalans te verbeteren. Ook voor de Nederlandse economie zou produktie van energie uit biomassa voordelen op kunnen leveren. De voeding voor een energie produktieproces moet geteeld, geoogst en vervoerd worden. Bij produktie van energie uit biomassa is bij deze stappen veel meer arbeid nodig dan bij produktie van energie uit fossiele bronnen. Arbeid is schaars, en wellicht een factor die meegenomen zou moeten worden in toekomstige berekeningen.

Geconcludeerd kan worden dat energie uit biomassa nog geen economisch gelijkwaardig alternatief is voor energie uit fossiele brandstoffen. Wel is er mogelijk nu al een markt voor energie uit biomassa als milieu verantwoord produkt. Als zodanig kunnen voorhanden zijnde technieken voor zowel produktie van transportbrandstof als produktie van elektriciteit nu al economisch rendabel zijn. Voor de toekomst lijkt opwekking van elektriciteit uit biomassa, in STIG of STEG centrales het meest geschikt. Deze technieken zijn echter nog niet commercieel inzetbaar.

Literatuurlijst

^(a) J.I.Zerbe

'Carbon syncs and the control of the greenhouse effect'
Energy from Biomass and Wastes XIV blz. 85

^(b) NOVEM

'De haalbaarheid van de produktie van biomassa voor de Nederlandse energiehuishouding'
april 1992

^(c) SER advies

'Agrarische transport-brandstoffen'
juni 1993

^(d) R.L.Bain

'Electricity from biomass in the United States'
Bioresource Technology 46(1993)86-93

^(e) o.a in:

L.J.van der Toorn
'Energie uit biomasa een overzicht'
Energie Spectrum 3, maart 1992

^(f) G.Trebbi

'Power production options from biom ass: the vision of a southern european country'
Bioresource Technology 46(1993)23-29

^(g) 'Elektriciteit in Nederland'

publikatie van Energiened en SEP

^(h) J.Kadyszewski

'Conversion of suger cane residues to power'
Energy from Biomass and Wastes XIV blz.569-601

⁽ⁱ⁾ C.M Kinoshita

'Cogeneration in the Hawaiian sugar industry'
1989

^(j) C.M Kinoshita

'Energy efficiency of the hawaiian sugar industry'
Energy from Biomass and WastesVII blz.548-568

^(k) N.V Afalval-verbranding Zuid-Nederland I.O.'

Haskoning, ingenieurs en architecten bureau

^(l) H.Miller

'Operation of the worlds largest RDF-to-energy plant'
Energy from Biomass and Wastes XIV blz. 653-663

^(m) P.Elliot R.Booth

'Sustainable biomass energy'
SHELL selected papers

- (n) R.G.Lungdqvist
'The IGCC demon-stration plant Varnamo'
Bioresource Technology 46(1993)49-53
- (n2) 'De bouw van 's werelds grootste kolenvergasser'
te Buggenum, 1992
- (o) E.D.Larson
'Development of biomass gasification systems for gas turbine power genera-tion.'
Energy from Biomass and Wastes XIV
blz 797-813
- (p) E.D.Larson
'Biomass Gasifier Steam Injected Gas Turbine cogeneration for the sugar cane industry '
Energy from Biomass and Wastes XIV
blz 781-797
- (q)Voorstudie Thermische Houtverwerking
NV PNEM
NV PGEM
BFI BV
- (r) P.Elliott end R.Booth
'Sustainable biomass energy'
Shell selected papers
december 1990
- (s) N.Kosaric
'Development of short residence time ethanol fermentation process'
Energy from Biomass and Wastes XIV
blz 1127-1142
- (t) H.Rothman, R.Green-shields and F.Calle.
'Energy from alcohol the Brazilian experience'
1983
- (u) S.R.Bull
'The U.S. Department of energy biofuels research program'
Energy From Biomass and Wastes XIV pag.1-5
- (v) D.J.Stevens
'Methanol from biomass: A technoeconomic analysis'
Energy From Biomass and Wastes XIV pag.1245-1263
- (w) B.E.Foody and K.J.Foody
'Development of an integrated system for producing ethanol from biomass.'
Energy from Biomass and Wastes XIV blz 1225-1241
- (y) H.A.Stuurman e.a
'Energy from lignocel-lulosic Biomass, Prospects for the E.U`.
1994