

Energie uit hout en houtafval; technologieën en perspectieven

Energy from wood and wood waste; technologies and perspectives

H. E. M. Stassen
Afdeling Chemische Technologie Technische Hogeschool Twente,
Enschede

Inleiding

Energieproductie uit hout kan vanuit een tweetal benaderingswijzen gezien worden, die elk verschillende technologie vereisen, andere economische perspectieven bieden en een verschillend energie productie potentieel hebben.

In de eerste plaats ontstaan, als gevolg van commerciële bosbouw- en houtverwerkende activiteiten residuen, omdat meestal slechts een gering gedeelte van het hout effectief wordt benut. Er blijven dus grote hoeveelheden goedkoop afval, zowel in het bos als bij houtverwerkende bedrijven, achter. Gebruik van dit afval wordt echter vaak gelimiteerd door verzamel- en vervoerskosten.

In de tweede plaats doet momenteel het z.g. "energy farm" concept opgeld, waarbij het de bedoeling is om specifiek energie uit hout te produceren. Hout van "energy farms" (voor de gematigde klimaatzones wordt vooral aan snelgroeiende populiererasen gedacht) is in het algemeen duurder dan bovengenoemd afval, maar de verzamel-, transport- en verwerkingskosten kunnen lager zijn. Daarnaast bestaat wellicht de mogelijkheid om bij de teelt gebruik te maken van land met geringe agrarische waarde, waardoor een potentieel conflict tussen voedsel- en energieproductie wordt vermeden.

Afgezien van de milieuaspecten van houtconversie, waarop later nader wordt ingegaan, heeft gebruik van hout als energiebron principieel een aantal positieve en negatieve effecten op het milieu. Aan de positieve kant staat dat hout een hernieuwbare energiebron is, dat bos atmosferisch kooldioxide bindt, bijdraagt aan bodemstabilisatie, de wateropnamecapaciteit van de bodem verbetert en woestijnvorming voorkomt. Hout is een brandstof met een laag zwavelgehalte en het is – speciaal in dunbevolkte ontwikkelingslanden – een goedkope energiebron. Hiertegenover staat dat slecht bosbeheer en overkap snel kunnen leiden tot erosie, woestijnvorming en daarmee samenhangende nadelige gevolgen voor het milieu.

Hout en houtafval kunnen via diverse technieken in bruikbare energie worden omgezet. Deze technologieën verkeren in verschillende stadia van ontwikke-

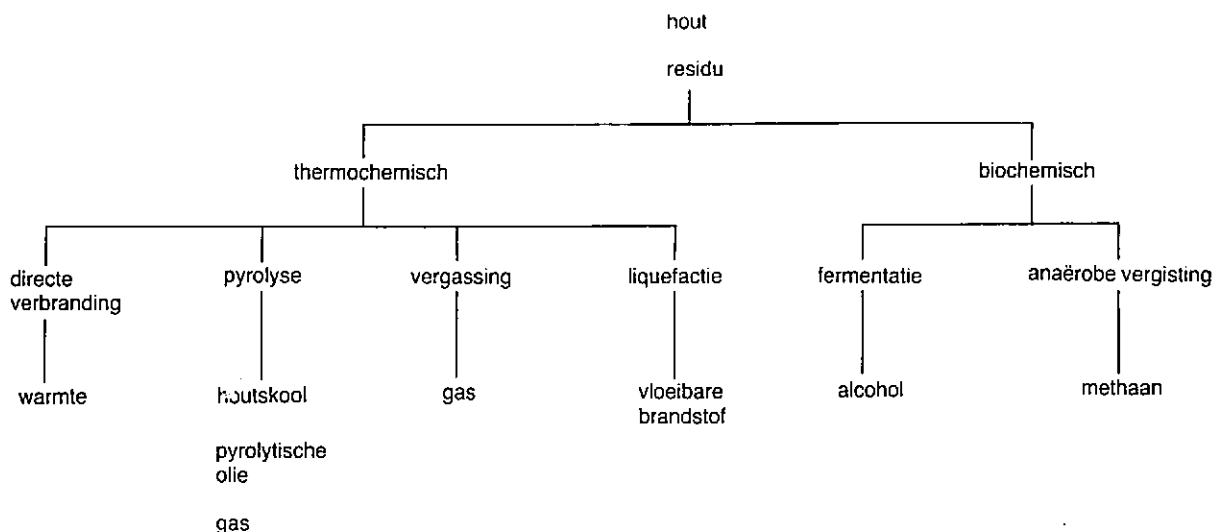
Summary

Wood or wood waste can be converted into useful energy by various methods. At present the thermochemical conversion methods (i.e. direct combustion, pyrolysis, gasification) are the most developed. Commercial installations for a large number of applications and fuels are available. The remunerativeness of the apparatus is largely dependent on the nature of the application and the price of the fuel. An interesting application is the combination of gasifiers and internal combustion engines, i.e. for generating electricity. The cost of the electricity is fixed by the price of the wood or wood waste and the number of factory hours per year. Without legislative control, the widespread use of small-scale conversion units could lead to noticeable air pollution. The technology to reduce pollution to acceptable levels does exist. Techniques for producing liquid fuels (i.e. methanol) from wood and wood waste by a process of thermal gasification are known. This process does not seem to be competitive with the synthesis of methanol from coal. The bio-chemical conversion of wood and wood waste to methanol is also technically possible, but because of the low returns from this process its economic application is unlikely in the near future.

ling. Een overzicht van de belangrijkste methoden wordt gegeven in onderstaand schema. Momenteel worden directe verbranding, pyrolyse en vergassing het meest toegepast. (Zie pag. 173.)

Thermochemische conversiemethoden

De details van wat zich afspeelt bij biomassa-pyrolyse zijn niet bekend. Zeer in het algemeen kan het volgen- de gezegd worden. Tijdens het opwarmen van het materiaal vallen grote moleculen (cellulose, hemicellulose en lignine), uiteen in middelgrote moleculen en koolstof. Blijft het materiaal lang genoeg in de hete zone, dan vallen de middelgrote moleculen verder uiteen in kleine moleculen zoals bijvoorbeeld waterstof, methaan, koolmonoxide, ethaan, ethyleen etc. Is de ver-



Overzicht van de belangrijkste methoden van omzetting van hout en houtafval.

blijftijd in de hete zone te kort dan ontsnappen de middelgrote moleculen echter en condenseren later als teer en olie.

Langzame opwarming van de voeding blijkt de teervorming te bevorderen. Bij snelle opwarming en hoge temperaturen ontstaan daarentegen vrijwel uitsluitend gas en as. In de gasfase kunnen dampvormige teer, olie en gassen verder reageren, waarbij nieuwe producten ontstaan. Ook over deze gasfase-reacties is weinig bekend. Afhankelijk van het vergassingsmedium, het vochtgehalte van de voeding, de opwarmingsnelheid, de reactietemperatuur en de reactiedruk kan het resulterende gas variëren van vrijwel zuiver kooldioxide en water (volledige verbranding) tot gasmengsels met relatief hoge koolmonoxide-, waterstof-, methaan- en ethyleengehaltes (vergassing) of gas met aanzienlijke hoeveelheden teer en olie (pyrolyse).

Reactor type

Reactoren voor biomassa-conversie bestaan in vele verschillende vormen. De volgende hoofdclassificatie kan worden aangehouden:

- (roterend) rooster
- glijdend bed reactor
- wervelbed reactor
- poedervlam reactor

Bij een roterend rooster wordt de biomassa langzaam naar de hete zone getransporteerd, waar ze wordt opgewarmd, pyrolyseert en tenslotte met lucht reageert. Dit type reactor is het meest gebruikelijk bij directe verbranding van hout en houtafval.

In glijdend bed reactoren beweegt de biomassa zich

door de zwaartekracht verticaal door de reactor en wordt daarbij successievelijk opgewarmd, gepyrolyseerd en reageert tenslotte met lucht en andere gasen. Naast elkaar zijn het tegenstroom- en het meestroom-principe te onderscheiden.

In tegenstroom glijdend bed reactoren beweegt een gasstroom zich opwaarts door het brandstofbed. Na deel van dit type reactor is de relatief grote hoeveelheid teer in het afgas, die moeilijkheden oplevert bij verbranding (roetvorming) en bij toepassing in verbrandingsmotoren. In meestroom glijdend bed reactoren beweegt de gasstroom zich neerwaarts in dezelfde richting als het biomassabed. Teer wordt gevormd in de pyrolysezone en beweegt zich vervolgens door een relatief lange hete zone waar verdere ontleding optreedt. Uiteindelijk wordt een teervrij gas geproduceerd, dat eenvoudig is te reinigen en zonder problemen in ketels en motoren verbrand kan worden.

Een derde type is de wervelbed-reactor. In dit geval wordt een gasstroom met zulke grote snelheid door een zandbed geblazen, dat een constante werveling van zand ontstaat die zich als een vloeistof gaat gedragen. De brandstof kan op verschillende manieren in het hete bed worden ingevoerd. Als gevolg van de goede menging in het bed kan op iedere hoogte brandstof in verschillende stadia van ontleding worden aangehouden. Afhankelijk van de deeltjesgrootte van de brandstof en van de bedtemperatuur leidt dit onder bepaalde omstandigheden tot teervorming.

Het laatste type is de poedervlam reactor. In dit apparaat worden kleine brandstofdeeltjes in een gasstroom gesuspenderd en snel in en door de ontledingszone gevoerd.

Een schematische voorstelling van de vier laatstbeschreven reactortypes vindt men in figuur 1. De temperatuurverdeling in de reactor geeft een aanwijzing omtrent de opwarmingsnelheid van de brandstof en de daaruit resulterende teervorming in de pyrolysezone. De temperatuur van het afgas te zamen met de brandstofconversie (en de warmteverliezen van de reactor) bepalen het uiteindelijk rendement van het proces.

Directe verbranding

Directe roosterverbranding van hout of houtafval voor de productie van elektriciteit of stoom of van beide, is een bewezen technologie. In veel toepassingen kan brandstof met een vochtgehalte van 40-50% worden gebruikt, resulterend in een ketelrendement van ca. 65%. Poedervlamverbranders zijn commercieel beschikbaar, maar vereisen een voeding met laag vochtgehalte (< 15%) en geringe deeltjesgrootte. Wervelbed verbranders verkeren in een gevorderd stadium van ontwikkeling.

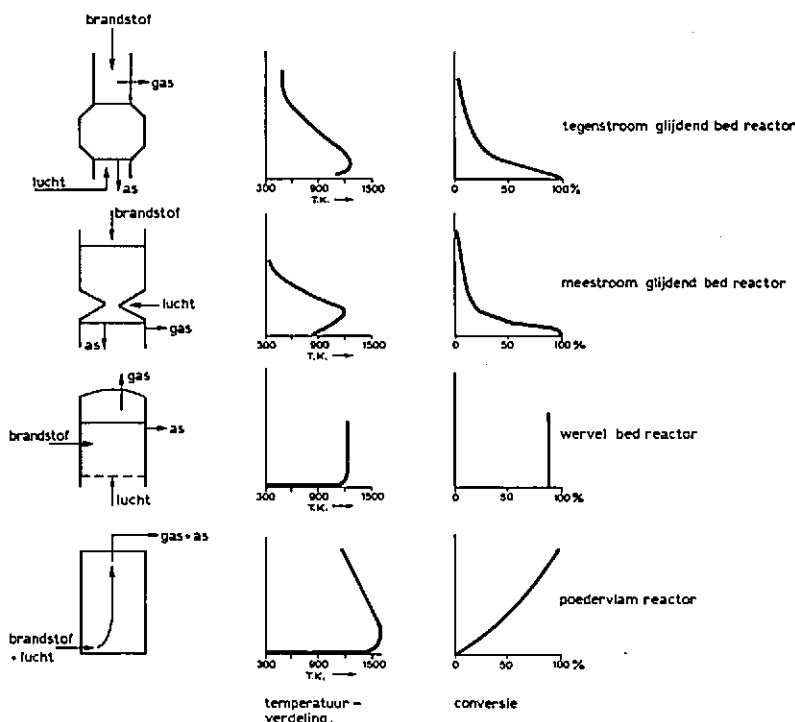
De kosten van de productie van elektriciteit en stoom via directe verbranding worden gegeven in fig. 2 en 3. Uit deze grafieken blijkt, dat de rentabiliteit van biomassaverbranding in sterke mate afhankelijk is van de prijs van de brandstof. De investeringskosten van hout-gestookte ketels zijn ongeveer gelijk aan de kosten van kolen-gestookte apparatuur. Maar beide zijn

drie tot vier maal zo duur als olie- of gas-gestookte installaties.

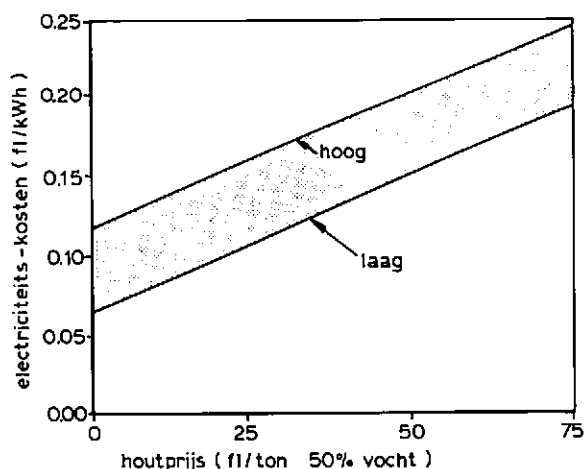
Vergassing

Biomassavergassing kan worden uitgevoerd in reactoren van het tegenstroom-, meestroom-, wervelbed- en poedervlamtype. Poedervlamvergassers kunnen in een gegeven reactorvolume de grootste hoeveelheid brandstof verwerken en hebben dus relatief geringe afmetingen. Als gevolg van de hoge gastemperatuur is hun rendement (zonder externe warmtewisseling) echter laag, ze vereisen een zeer fijne voeding, het gas bevat relatief grote hoeveelheden as en tengevolge van de geringe hoeveelheid brandstof die zich op een bepaald moment in de reactor bevindt is de procesregeling een probleem. Als gevolg van deze nadelen is hun toepasbaarheid beperkt tot zeer grote installaties. Wervelbedvergassers kunnen brandstofdeeltjes variërend van 0-4 cm verwerken. Hun specifieke doorzet is aanmerkelijk hoger dan die van glijdend bed vergassers. Nadelen zijn echter de gelimiteerde brandstofconversie (ca. 85-90%), het relatief lage rendement als gevolg van de hoge afgastemperatuur, teerproductie (onder bepaalde omstandigheden) en de procesregeling die moeilijker is dan bij glijdend bed vergassers.

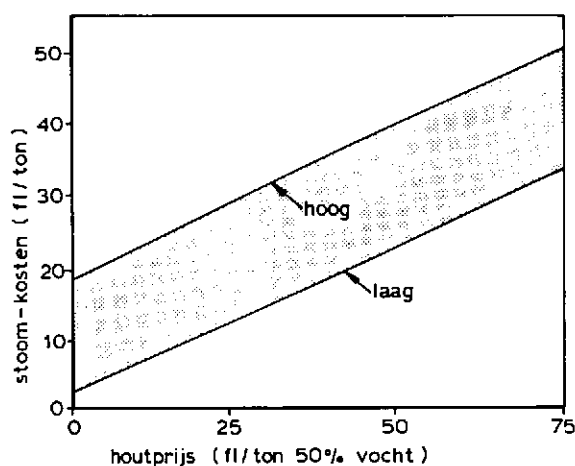
Mee- en tegenstroomvergassers hebben de kleinste brandstofdoorzet, maar zijn ook het eenvoudigst te fa-



Figuur 1 Reactor types.



Figuur 2 Elektriciteitskosten bij directe verbranding van hout.



Figuur 3 Stoomkosten bij directe verbranding van hout.

briceren en te bedienen. Tegenstroomvergassers produceren aanzienlijke hoeveelheden teer, maar hebben van alle vergassers het hoogste rendement en zijn zeer eenvoudig van uitvoering. In toepassingen waarbij het gas direct wordt verbrand hebben zij hun waarde bewezen.

Problemen bij glijdend bed vergassers zijn meestal terug te voeren tot storingen in de brandstof- of gasstroom als gevolg van slakvorming en verstoppingen. Kanaalvorming in het bed kan aanleiding geven tot zuurstof-doorslag en potentieel gevaarlijke situaties. Vandaar dat met name bij meestroomvergassers hoge eisen aan het asgehalte van de voeding moeten worden gesteld.

De ideale vergasser produceert een teer- en stofvrij gas van relatief hoge calorische waarde, heeft een hoog rendement en kan voedingen verwerken van zeer verschillend vochtgehalte, asgehalte en deeltjesgrootte. Deze ideale vergasser bestaat echter niet. Meestroom- en wervelbed-reactoren lijken dit ideaal nog het meest te benaderen, hoewel het ook zeer wel mogelijk is dat uiteindelijk alle bovengenoemde reactoren zich een plaats op de markt zullen weten te verwerven, afhankelijk van het type brandstof en de toepassing.

Investeringskosten in vergasserapparatuur zijn in sterke mate afhankelijk van schaalgrootte en uitvoeringsvorm. Voor keteltoepassingen variëren de kosten van 150-500 fl/kW. De prijs van het gas wordt daarnaast bepaald door de kosten van de voeding. In het geval dat houtafval wordt gebruikt kan de gasprijs lager dan 2,50 fl/GJ zijn. Bij brandstofprijzen van 50-150 fl/(droge) ton varieert de geschatte gasprijs voor vergassers van grotere capaciteit (1-10 GJ/hr) van 5-15 fl/GJ.

Vergassers met verbrandingsmotoren

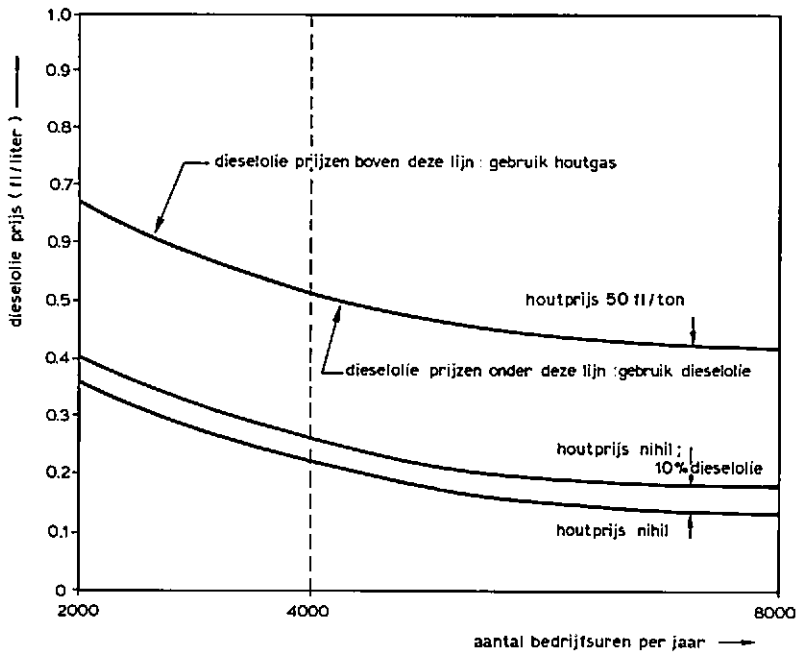
Vergassers voor gebruik in combinatie met interne verbrandingsmotoren dienen in verband met motorslijtage een teer- en stofvrij gas te leveren. Meestroomreactoren voor hout, houtafval, houtskool en een beperkt aantal soorten landbouwfal (bijvoorbeeld maiskolven, kokosnootschalen) kunnen aan de specificaties voldoen. Otto (benzine)motoren kunnen met geringe wijzigingen geschikt worden gemaakt voor houtgas. Als gevolg van de relatief lage calorische waarde van het gas neemt het motorvermogen met 30-50% af, afhankelijk van het motortype. Dieselmotoren loopen zonder wijziging op gas, maar hebben een hoeveelheid dieselolie nodig (tot 20%) als ontstekingsbrandstof. In normale gevallen neemt het motorvermogen af met 15-20%.

De energiekosten van houtgas-motoren zijn in sterke mate afhankelijk van de hout(afval)prijs en het jaarlijks aantal bedrijfsuren. Figuur 4 geeft een kostenvergelijking voor een 50 kW diesel- en houtgasmotor. Indien de brandstofprijs ca. 50 fl/ton bedraagt, wordt boven 2000 bedrijfsuren toepassing van een houtgasmotor rendabel.

Pyrolyse (carbonisering)

Houtskool wordt vervaardigd door middel van gecontroleerde pyrolyse van organisch materiaal. Verkolingsapparatuur vertoont een grote variatie maar kan naar drie basisprincipes worden ingedeeld:

- *ovens*; waarin de warmte die nodig is om de verkoling te starten wordt geleverd door interne verbranding van een deel van de lading.



Figuur 4 Kostenvergelijking 50 kW. motor op dieselolie en houtgas.

– *retorten*; waarin bovengenoemde warmte van buiten wordt geleverd.

– *continue fornuizen*; waarin de lading mechanisch en onder gecontroleerde omstandigheden door een oven wordt gevoerd, waardoor het resultaat minder afhankelijk is van het warmte-effect van de pyrolyse-reacties.

Houtskoolopbrengsten zijn in eerste orde afhankelijk van de gebruikte apparatuur (zie tabel 1). Daarnaast hebben het vochtgehalte en de opwarmnelheid van de lading een duidelijke invloed op het houtskoolrendement. In de praktijk zijn conversierendementen van maximaal ca. 30% (gewichtsbasis) of ca. 50% (energiebasis) haalbaar.

Milieuaspecten van vergassing en verbranding

De belangrijkste milieu-invloed van hout- en afvalverbranding is de luchtverontreiniging. Kleinschalige verbrandingsapparatuur werkt in het algemeen bij lage temperatuur, en heeft daarvoor, in vergelijking met grote industriële installaties, een laag verbrandingsrendement. Gevolg hiervan is een relatief hoge emissie van koolmonoxide (60-130 g/kg hout) en onverbrande koolwaterstoffen (3-12 g/kg hout). Deze organische verbindingen bestaan voor ca. 5% uit polycycliden, waarvan de carcinogene werking bekend is (bijvoorbeeld benzopyreen). Grote hout-gestookte installaties hebben hogere rendementen en daarom minder problemen met koolmonoxide- en koolwaterstofemissie. Daarnaast wordt bij industriële apparatuur aandacht besteed aan afgasreiniging door middel van cyclonen,

natte scrubbers, elektrostatische filters of doekfilters. Door toepassing van deze methoden kan de koolwaterstof-uitstoot binnen de wettelijke normen gebracht worden.

De luchtverontreinigingsproblematiek is bij vergassing minder belangrijk, omdat het geproduceerde gas wordt verbrand of gebruikt in verbrandingsmotoren. In het laatste geval is een vergaande gasreiniging ten behoeve van de toepassing noodzakelijk. Bij directe verbranding van de diverse milieuelementen bestanden van het gas grotendeels geoxideerd. Onderstaande tabel 2 geeft een vergelijking tussen de emissies van een ketel die gestookt werd met houtgas, hout en olie.

Vergassing kan aanleiding geven tot waterverontreiniging omdat tijdens het proces condenswater ontstaat, dat verontreinigd is met koolwaterstoffen (met name fenolen). Hoewel deze stoffen biologisch afbreekbaar zijn, is het biologisch zuurstofverbruik aanmerkelijk. Met name vanwege de verwachte decentrale toepassing van kleine houtvergassers, moeten normen aan de kwaliteit van het afvalwater worden gesteld.

Vloeibare brandstoffen via thermo-chemische processen

Door middel van thermische conversie en chemische synthese kunnen een groot aantal vloeibare brandstoffen uit biomassa worden gesynthetiseerd. Hier slechts de productie van methanol en ethanol worden besproken.

Tabel 1 Houtskool technologieën

type	houtskool- productie ton/jaar	calorische waarde houtskool (MJ/kg)	conversie- rendement gewichts- basis (%)	thermisch conversie rendement %
kolenbrandersoven	12	25,5	10-20	13-37
Mark V (FAO) oven	72	27	25	35
Missouri-oven	310	30	25	39
Lambiotte retort	9.000	30	30	48

droog hout: 19 MG/kg

Methanolsynthese Methanol werd oorspronkelijk geproduceerd als een bijproduct van de houtskoolfabricage, maar dit proces is thans niet meer rendabel. Tegenwoordig wordt de meeste methanol uit aardgas bereid. Via een reactie met stoom en kooldioxide wordt een mengsel van koolmonoxide en waterstof geproduceerd. Nadat de juiste verhouding van deze beide componenten is ingesteld, ondergaat het gas onder druk een catalytische reactie tot methanol. Biomassa kan met zuurstof tot een koolmonoxide/waterstofmengsel vergast worden. De rest van de methanolsynthese is dan identiek aan de processen die gebruik maken van aardgas. Hoewel zuurstofvergassers momenteel gebouwd kunnen worden, bestaan er onzekerheden met betrekking tot de gasopbrengsten en de kostprijs van de installatie. Met name de gasreinigingskosten kunnen een aanmerkelijk gedeelte van de totale kosten uitmaken. Methanolopbrengsten zijn afhankelijk van het type biomassa. Voor hout worden opbrengsten van 380-450 liter per droge ton opgegeven. Deze opbrengsten corresponderen met conversierendementen van 40-50%.

Met gebruikmaking van deze gegevens mogen de kosten van methanol op 0,45-0,90 fl/l (25,00-50,00 fl/GJ) worden geschat. Methanol kan met bewezen technologie uit hout worden gesynthetiseerd. De kostschattingen zijn waarschijnlijk binnen 20% accuraat, aangezien de onzekerheden alleen in de kosten van de zuurstofvergasser schuilen. Methanol is hierdoor per energie-equivalent ongeveer even duur als ethanol uit graan. Waarschijnlijk zijn beide processen echter aanmerkelijk duurder dan de productie van methanol uit steenkool. Reden hiervan is het kosteneffect van schaalvergroting dat bij de bouw van zeer grote koleninstallaties bereikt kan worden.

Ethanol In principe kan ethanol thermochemisch uit hout worden geproduceerd via snelle vergassing naar ethyleen. Ethyleen wordt vervolgens van de andere gassen gescheiden en door middel van bestaande technologie omgezet in ethanol. De kritische factor is de ethyleenopbrengst bij snelle vergassing. Opbrengsten van ca. 6 gewichtsprocent zijn experimenteel

Tabel 2 Ketelemisaties bij gebruik van diverse brandstoffen

	houtgas	hout	olie
koolmonoxide (kg/hr)	0	0,8-20	0,15
vaste deeltjes (kg/hr)	0,3	2,2-6,0	0,05
koolwaterstoffen (kg/hr)	0,4	30	0,03

Bron: California Air Resources Board: Source report No. C-8-002-C, "Source Test of Exhaust Gas from a Boiler Fired by Producer Gas Generated From an Experimental Gasifier Using Wood Chips for Fuel". Stationary Source Control Division, March 1978.

aangetoond, maar sommige onderzoekers denken, dat opbrengsten van ca. 30% mogelijk zijn. Indien dit juist is, dan zouden de produktiekosten van thermochemische ethanolbereiding aanzienlijk lager kunnen liggen dan de kosten van biochemische ethanolproductie uit hout (zie hieronder), en mogelijk zelfs per energie-equivalent de kosten van methanol uit steenkool kunnen benaderen. Omdat realiseren van ethyleenopbrengsten nog veel research en ontwikkeling zal vergen, is commerciële toepassing van dit ethanolproces evenwel niet voor 1990 te verwachten.

Biochemische conversiemethoden

Fermentatie van ligno/cellulose-houdende materialen

Alle fermentatieprocessen voor de productie van ethanol bestaan uit de volgende drie stappen:

- de voeding wordt behandeld teneinde een suikeroplossing te verkrijgen;
- via fermentatie door middel van gist of bacteriën worden de suikers in ethanol omgezet;
- de ethanol wordt uit de oplossing afgedestilleerd waardoor een 95,6 procentige ethanol oplossing ontstaat. Het resterende water kan eventueel worden verwijderd indien droge ethanol wordt gewenst.

Het belangrijkste verschil tussen processen met verschillende voedingen is gelegen in de voorbereidingsstap. Suikerhoudende voedingen (suikerriet, suikerbieten) kunnen rechtstreeks gefermenteerd worden. Zet-

meelhoudende voedingen (mais en andere granen) moeten eerst enzymatisch in suikers worden omgezet. Ligno/cellulose-houdende materialen vereisen meer ingewikkelde processen. Eerst wordt het materiaal behandeld met een verdund zuur, teneinde de hemi-cellulose te verwijderen die dan apart tot ethanol wordt gefermenteerd. Het ligno/cellulose-houdend residu wordt dan met sterk zuur bij lage temperatuur of met verdund zuur bij hogere temperatuur behandeld. Hierdoor wordt de cellulose van de lignine gescheiden, waarna de cellulose enzymatisch of via een zuurbehandeling wordt gehydrolyseerd. De lignine kan niet in alcohol worden omgezet, maar kan na droging als brandstof worden gebruikt. Processen die gebruik maken van verdund zuur hebben in het algemeen lage ethanolrendementen omdat de gevormde suikers bij hogere temperaturen in zuur milieu ontleden. Processen die werken met geconcentreerd zuur hebben het economische nadeel dat grote hoeveelheden zuur tijdens het proces verloren gaan. Resumerend kan gesteld worden dat het technisch mogelijk is om ethanol via biochemische technieken uit hout en houtafval te vervaardigen. Momenteel is ethanol uit suiker- en zetmeelhoudende grondstoffen echter nog veel goedkoper. Er zijn een aantal ontwikkelingen die er uiteindelijk toe kunnen leiden dat ethanol uit hout met ethanol uit de andere genoemde grondstoffen kan concurreren.

Biomethanisering

Biomethanisering is een proces dat energie in de vorm van methaan produceert uit natte biomassa. De omzetting van het complexe organische materiaal vindt via een drietal opeenvolgende stappen plaats:

- enzymatische hydrolyse
- bacteriële hydrolyse
- anaërobe bacteriële fermentatie.

In een uitgebalanceerde installatie verlopen deze stappen gelijktijdig. Het geproduceerde gas bestaat voor 55-60% uit methaan, voor 40-45% uit kooldioxide en bevat daarnaast kleine hoeveelheden waterstof, stikstof, organische sulfides en hogere koolwaterstoffen. De vormingssnelheid van het biogas hangt af van de temperatuur en van de voeding. In het algemeen zijn lignine-houdende materialen (bijvoorbeeld hout en houtafval) ongeschikt, omdat de lignine de cellulose beschermt tegen bacteriële aantasting. Mechanische of chemische voorbewerking van de voeding verbetert het processenelement wel enigszins, maar het uiteindelijke energetische rendement blijft laag (ca. 50%). Vandaar dat droog ligno-cellulose-houdend materiaal (tot een vochtgehalte van ca. 50%) bij voorkeur via thermochemische processen (verbranding of vergassing) zal worden omgezet in bruikbare vormen van energie.



De ideale brandhoutproductie?