

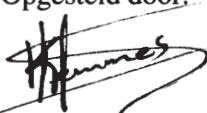

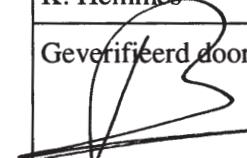
# VERGASSING VAN NATTE BIOMASSA/RESTSTROMEN IN SUPERKRITIEK WATER (SCWG), VOOR DE PRODUCTIE VAN “GROEN GAS” (SNG), SNG/H<sub>2</sub> MENGSELS, BASIS CHEMICALIËN EN PUUR H<sub>2</sub>

BSE-2003 Ondersteuning Transitie-Coalities  
Projectnummer: 5005-03-20-01-040

K. Hemmes

L. van de Beld (BTG, Biomass Technology Group BV)

S.R.A. Kersten (Universiteit Twente)

Revisies		
A	Concept versie 15-12-04	
B	Eindversie	
Opgesteld door:  K. Hemmes	Goedgekeurd/vrijgegeven door: 	ECN Biomassa
Geverifieerd door:  R. van Ree	H.J. Veringa	



## Verantwoording

Het project waarvan de resultaten in dit rapport worden weergegeven is uitgevoerd door de Business Unit Biomassa van het Energieonderzoek Centrum Nederland (ECN) in samenwerking met BTG Biomass technology Group bv en Universiteit Twente. Het project is uitgevoerd in het kader van Subsidieregeling BSE-2003 Ondersteuning Transitie-Coalities met contractnummer 5005-03-20-01-040 en het bestelnummer 4800003029 getiteld: Vergassing van natte biomassa / reststromen in superkritiek water (SCWG), voor de productie van “groen gas”(SNG), SNG/H<sub>2</sub> mengsels, basis chemicaliën en puur H<sub>2</sub>. Projectnummer ECN: 7.5271.

## Abstract

The Dutch government has set the policy target that in 2020 10% of the total energy consumption has to be provided by means of renewable energy sources. Biomass is expected to play a major role in this future renewable energy based supply system.

This study is a feasibility study that has been carried out, in order to evaluate the potential of supercritical water gasification (SCWG) of relatively wet biomass / waste streams (70-95 gew % water) for the production of “Green Gas” (SNG: Synthetic Natural Gas), SNG/H<sub>2</sub> mixtures, chemicals, or hydrogen. At temperatures and pressures above the critical point of water ( $T_c = 373.95^\circ\text{C}$ ,  $P_c = 220.64 \text{ bar}$ ) there is no distinction between gas phase and liquid phase. Also the behaviour of water will change considerably at these supercritical conditions, and water will even be consumed as a reactant. At relatively low temperatures, just below the critical temperature, catalysts are required and gases rich in methane can be produced. At higher temperatures and supercritical conditions, hydrogen rich gases are formed, especially from low concentration feedstock. When the biomass concentration in water increases, the product will gradually contain more hydrocarbons and full conversion becomes difficult. Other aspects that also need to be solved are: the feeding system, pollution / corrosion of the heat exchanger, gas cleanup and the cleaning of a large volume of wastewater. According to a first rough estimation, the production costs of the product gas, SNG/H<sub>2</sub> mixtures, by the SCWG process are relatively high, even when the feedstock would be available for free. This is due to relatively high investment costs of this process, compared to other biomass/waste-related SNG production technologies. An important potential to reduce the production costs in the SCWG process is the application of wet organic waste streams as feedstock, with a negative market value. Therefore, organic waste treatment is a promising application for the SCWG process.

## Trefwoorden

(Natte) Biomassa, Reststromen, Superkritiek Vergassen, SNG, CH<sub>4</sub>/H<sub>2</sub> mengsel, Waterstof.



# INHOUD

LIJST VAN TABELLEN	6
LIJST VAN FIGUREN	6
SAMENVATTING	7
1. INLEIDING	9
1.1 Achtergrond	9
1.2 Doelstelling	9
1.3 Indeling rapport	9
2. HET SCWG-PROCES	11
2.1 Algemeen	11
2.2 Procesbeschrijving	12
2.3 Producten	12
2.4 Voeding	14
3. STATE OF THE ART	17
4. TECHNISCH ECONOMISCHE EVALUATIE	19
TRANSITIE EXPERIMENT / COALITIE	22
5. O&O TRAJECT	25
6. ANALYSE KRITISCHE SUCCESFACTOREN	27
7. CONCLUSIES EN AANBEVELINGEN	29
7.1 Conclusies	29
7.2 Aanbevelingen	30
LITERATUUR	31

## LIJST VAN TABELLEN

Tabel 2.1	<i>Typische gassamenstelling gemeten in de installaties van BTG-UT. Vergassing van glycerol en glucose ; 10% droge stof</i>	13
Tabel 2.2	<i>Gewenste eigenschappen van de brandstof t.b.v. conversie</i>	15
Tabel 4.1	<i>Schattingen van 'total fixed capital cost', 'operating cost' en de 'productiekosten' van het productgas (een waterstofrijk (CH<sub>4</sub>/H<sub>2</sub> mengsel)</i>	19

## LIJST VAN FIGUREN

Figuur 2.1	<i>Schematische weergave van het SCWG proces</i>	12
Figuur 2.2	<i>Evenwichtsconcentraties H<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, CO en CO<sub>2</sub> als functie van de temperatuur. Druk: 300 bar; voeding: 80% water, 20% organisch</i>	13
Figuur 2.3	<i>Transitiepad van methaan naar waterstof middels superkritieke vergassing</i>	14
Figuur 0.1	<i>Opzet transitie-experiment</i>	22

## SAMENVATTING

### Achtergrond

In de Biomassa Visie, zoals opgesteld in het kader van het Transitietraject Biomassa Internationaal (EZ), dient in 2040 a) 30% van het fossiele brandstofgebruik in de transport- en elektriciteitsproductiesector én b) 20-45% van het fossiele grondstoffengebruik in de (chemische) industriële sector te zijn gesubstitueerd door biomassagerelateerde alternatieven.

Vergassing van natte biomassa/reststromen in superkritiek water (SCWG) is een relatief nieuw proces, voor de productie van “groen gas”(SNG), SNG/H<sub>2</sub>-mengsels, basis chemicaliën en puur H<sub>2</sub>. Vergassing in sub- en superkritiek water zou mogelijk ook een oplossing kunnen bieden voor natte biomassastromen (> 70 gew % vocht) die niet op traditionele wijze economisch rendabel verbrand, vergast of gepyroliseerd kunnen worden

### Doelstelling

Het doel van het project is:

- Uitwerking van het Transitiepad ‘Duurzaam Waterstof uit Natte Biomassa’ ter voorbereiding van korte termijn Transitie-experimenten.
- Uitwerking van een 1 MW demonstratieplant (techno-economische risico’s mogelijke voedingen, locaties product, etc).
- Nadere specificering van middellange termijn O&O-activiteiten (EOS) ter realisatie van de implementatie van superkritiek vergassing van natte biomassa in de Nederlandse economie op de lange termijn.

Het product zal een CH<sub>4</sub>/H<sub>2</sub> gas mengsel zijn op hoge druk, wat ook primair geproduceerd wordt met SCWG. Door dicht bij een specifieke eindgebruiker te gaan zitten (substitutie in het distributie netwerk), is het wellicht mogelijk wat waterstof toe te staan.

Naarmate het productgas wordt gemethaniseerd lijkt het meer op aardgas, qua kwaliteit zoals calorische waarde en Wobbe index, en zal injectie in het gasnet ook dicht bij de bron kunnen komen te liggen. Op langere termijn is ook puur waterstof mogelijk.

Het oorspronkelijke transitiepad gaat uit van SNG → CH<sub>4</sub>/H<sub>2</sub> → H<sub>2</sub>. Het eerste product is dan SNG.

### Conclusies

De volgende conclusies kunnen, met betrekking tot de economische aspecten, internationale status en de technische aspecten, getrokken worden omtrent de SCWG technologie:

#### *Economische aspecten*

Voor een stand-alone SCWG plant voor productie van een ruw productgas (een waterstofrijk CH<sub>4</sub>/H<sub>2</sub> mengsel), zal de installatie een grote capaciteit moeten hebben. Afhankelijk van de investeringsaannamen, zal voor een 100 MW systeem de verkoopprijs (met een IRR van 15% na belasting) van het ruwe onbehandelde productgas liggen tussen de 9,35 – 16,92 €/GJ<sub>productgas</sub>. Dit is een factor 2,5 – 4,8 hoger in vergelijking met de verkoopprijs van 3,5 €/GJ<sub>NG</sub> voor aardgas (grootverbruik). Tenzij de biomassa verkrijgbaar is met een negatieve waarde dan kan de prijs zakken. De prijzen voor H<sub>2</sub> productie liggen nog veel hoger. De productiekosten voor waterstof met een nageschakeld membraan, hydrogen chiller en een hydrogen chiller pomp komen uit op 61 €/GJ<sub>waterstof</sub>. Conventionele grootschalige waterstof productie uit aardgas kost 6 €/GJ en kleinschalig 11 €/GJ. Dit betekent dat men SCWG technologie alleen zou moeten inzetten voor grootschalige productie van CH<sub>4</sub>/H<sub>2</sub> mengsels of SNG uit natte biomassastromen (> 70 gew % vocht) met een negatieve markt waarde.

In deze economische evaluatie zijn de kosten voor o.a.: katalysator, verwerking van een grote hoeveelheid water met verontreinigingen, de voorbereiding/reiniging van de voeding en opwerking van het ruwe productgas nog niet meegenomen.

#### *Internationale status*

Antal uit Hawaï heeft zijn activiteiten op het gebied van het SCWG proces voor waterstofproductie moeten stoppen als gevolg van een techno-economische analyse, die NREL in opdracht van DOE heeft uitgevoerd. Recentelijk is er door het DOE wel weer een project op dit gebied goedgekeurd (uitvoerder Pacific North-West laboratory).

Matsumura (universiteit Hiroshima in Japan) heeft na een economische analyse, in het kader van een NEDO project, de resultaten van NREL bevestigd voor kleinschalige (1 ton/dag) warmtekracht toepassingen. Het is kleinschalig omdat er volgens Matsumura in Japan maar maximaal 1 ton/dag (per locatie) geschikte voeding kan worden verzameld. Japan richt zich nu meer op de productie van chemicaliën en bio-methanol. Naast bovengenoemde partijen werken ook het Forschungszentrum in Karlsruhe en het Paul Scherrer Institute (PSI) in Zwitserland aan de SCWG technologie. PSI onderzoekt of de SCWG technologie geschikt is voor SNG productie, uit o.a. hout.

#### *Technische aspecten*

In Twente staat een laboratoriumopstelling van 30 kg/hr en in het Forschungszentrum in Karlsruhe staat een opstelling van 100 kg/hr. Beide opstellingen draaien nog niet op biomassa, maar alleen op ideale voedingen zoals b.v. glycerol. Bij meer complexe voedingen zijn de knelpunten o.a.: het op druk brengen van de voeding en de vervuiling/corrosie aspecten van de warmtewisselaar/reactor. Intensieve warmteuitwisseling is essentieel en kritisch bij SCWG omdat de voeding al tijdens het opwarmen decompositie producten, zoals teer en koolstof, vormt. Een ander aspect is het reinigen van het productgas en grote hoeveelheden afvalwater. Ook de katalysator is een knelpunt. Om voedingen met een hoog droge stof gehalte ( 5 - 20%), bij een temperatuur van < 600°C, volledig om te zetten in een productgas met een hoog methaan gehalte, dient de vergassing te worden uitgevoerd met een katalysator. Deze katalysator is op dit moment nog niet beschikbaar. Concluderende kan gezegd worden dat de SCWG zich nog in een vroeg stadium van ontwikkeling bevindt en nog verre van commercialisatie is.

Op basis van de stand van zaken en technische onzekerheden in het proces kan niet anders geconcludeerd worden dat het nog te vroeg is voor het opzetten van een eerste demo-installatie. Naast een aanzienlijke investering en bijbehorend financieel risico bestaan er ook zeker nog de nodige technische risico's. De demo-installatie wordt dan al snel een onderzoeks- & ontwikkelingsinstallatie met beperkte flexibiliteit en elke wijziging zal zeer kostbaar en tijdrovend zijn. Op dit moment wordt de realisatie hiervan dan ook onverantwoord gevonden. Alle bovengenoemde aspecten/onzekerheden vereisen additioneel onderzoek en ontwikkeling op lab-/pilot schaal voor de komende jaren. Dit geldt ook voor de productie van chemicaliën.

#### **Aanbevelingen**

Vanwege de (relatief) hoge investeringskosten van het SCWG proces, is het aan te bevelen om een technische economische vergelijking te maken van het SCWG proces met de traditionele routes voor de conversie van natte biomassa / reststromen, zoals vergisting en met thermo-chemische processen, geschikt voor relatief droge biomassa. Voor deze laatst genoemde processen dient wel een groot gedeelte van het water van de natte biomassa/reststromen verwijderd te worden door mechanisch drogen, door verschillende filtratie technieken, eventueel gevolgd door thermisch drogen, om tot het vereiste vochtgehalte voor verbranding (50 gew.%), of vergassing (10-15 gew.%) te komen.



# 1. INLEIDING

## 1.1 Achtergrond

In de Biomassa Visie, zoals opgesteld in het kader van het Transitietraject Biomassa Internationaal (EZ), dient in 2040 a) 30% van het fossiele brandstofgebruik in de transport- en elektriciteitsproductiesector én b) 20-45% van het fossiele grondstoffengebruik in de (chemische) industriële sector te zijn gesubstitueerd door biomassagerelateerde alternatieven.

Vergassing van natte biomassa / reststromen in superkritiek water (SCWG) is een relatief nieuw proces voor de productie van “groen gas”(SNG), SNG/H<sub>2</sub>-mengsels, basis chemicaliën en puur H<sub>2</sub>. Vergassing in sub- en superkritiek water zou mogelijk ook een oplossing kunnen bieden voor de verwerking van natte biomassastromen (> 70 gew % vocht) die niet op traditionele wijze economisch rendabel verbrand, vergast of gepyroliseerd kunnen worden

In de nieuwe energieonderzoekstrategie (EOS), zijn vijf aandachtsgebieden gedefinieerd. Een tweetal zijn relevant voor vergassing van biomassa / reststromen in superkritiek water nl. ‘biomassa’ en ‘schoon fossiel / nieuw gas’. Hydrothermaal vergassen wordt genoemd als één van de onderwerpen binnen ‘biomassa primaire conversie’. Vergassing van biomassa is onderdeel van het speerpunt *gasreiniging*. Een nieuw onderzoeksitem dat naar voren wordt gebracht is onder meer ‘bijmenging in het aardgasnet’. De belangrijkste producten van het SCWG proces zijn waterstof en/of methaan en als zodanig bestaan er duidelijke raakvlakken met het thema ‘Nieuw gas’ voor zowel de kortere als langere termijn.

In het programma “*Transitie naar een duurzame energiehuishouding*” wordt het SCWG proces in verschillende transitiepaden genoemd. Met name in het transitiepad “*Waterstof uit natte biomassa*” komt het SCWG proces nadrukkelijk aan de orde. Ook heeft het duidelijke raakvlakken met het transitiepad ‘*Nieuw gas: Rijden op aardgas en groen-/biogas*’.

## 1.2 Doelstelling

Het doel van het project is:

- Uitwerking van het Transitiepad ‘Duurzaam Waterstof uit Natte Biomassa’ ter voorbereiding van korte termijn Transitie-experimenten.
- Uitwerking van een 1 MW demonstratieplant (techno-economische risico’s, mogelijke voedingen, locaties product, etc).
- Nadere specificering van middellange termijn O&O-activiteiten (EOS) ter realisatie van de implementatie van superkritiek vergassing van natte biomassa in de Nederlandse economie op de lange termijn.

## 1.3 Indeling rapport

Hoofdstuk 2 behandelt de verschillende aspecten van het SCWG-proces. In hoofdstuk 3 wordt een kort overzicht gegeven van de “state of the art” van vergassing van natte biomassa/reststromen in superkritiek water (SCWG). Hoofdstuk 4 richt zich op de economische analyse voor de productie van CH<sub>4</sub>/H<sub>2</sub> mengsels. De mogelijkheden voor de verschillende transitie experimenten worden gegeven in hoofdstuk 5. Hoofdstuk 6 gaat specifiek in op de technische O&O-aspecten van het superkritiek water vergassingsproces. In hoofdstuk 7 wordt een analyse gegeven van de kritische succesfactoren voor de daadwerkelijke implementatie van vergassing van natte biomassa/reststromen in superkritiek water (SCWG). Tenslotte worden in hoofdstuk 8 conclusies getrokken en aanbevelingen gegeven.



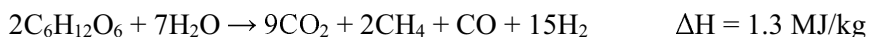
## 2. HET SCWG-PROCES

### 2.1 Algemeen

Vergassing van natte biomassa/reststromen in superkritiek water (SCWG) is een relatief nieuw proces, voor de productie van “groen gas”(SNG), SNG/H<sub>2</sub>-mengsels, basis chemicaliën en puur H<sub>2</sub>. De belangstelling voor vergassing in sub- en superkritiek water neemt toe omdat de technologie een oplossing biedt voor de conversie van natte biomassastromen (> 70 gew %) die niet op traditionele wijze economisch rendabel verbrand, vergast of geïmpoliseerd zou kunnen worden.

Water wordt superkritisch bij een druk > 221 bar en een temperatuur > 374 °C. Als zowel de kritische druk als de kritische temperatuur overschreden worden is het water “superkritisch”: er bestaat dan geen onderscheid meer tussen gas- en vloeistoffase. Ook de eigenschappen van water veranderen aanzienlijk bij deze condities, en water zal zelf ook als reactant verbruikt worden.

Superkritiek water is een zeer reactief medium dat goed in staat is organische verbindingen (C-C, C-H en C-O) te verbreken, met een selectiviteit in afhankelijkheid van druk, temperatuur en aanwezigheid van katalysatoren. Onder extreme condities vallen organische verbindingen tot de kleinst mogelijke moleculen uiteen (CO<sub>2</sub> en H<sub>2</sub>), doch onder minder extreme condities (sub- tot superkritieke omstandigheden) valt het materiaal uiteen tot meer complexe verbindingen (CH<sub>4</sub> en andere koolwaterstoffen en “waxen”). Een typische reactievergelijking voor de omzetting van glucose in superkritiek water kan als volgt worden weergegeven:



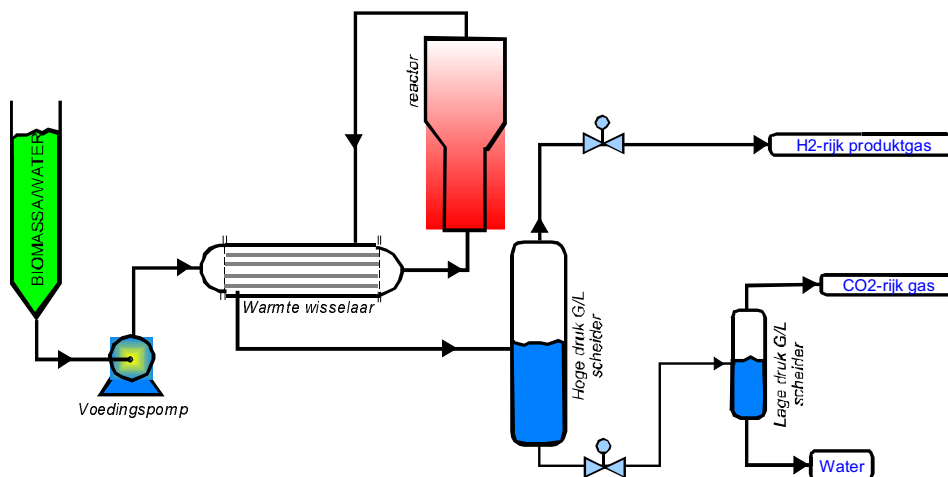
Bij vergassing van natte biomassa/reststromen in superkritiek water wordt het water niet verdampt en is een goede warmte integratie mogelijk door directe warmte-uitwisseling tussen product, water en de voedingstroom (tegenstroom warmtewisseling is mogelijk, vanwege het ontbreken van een faseovergang). Daardoor kan een hoog energetisch rendement bereikt worden ondanks de lage vaste stof concentratie in de voeding.

Andere specifieke kenmerken van het SCWG proces zijn:

- voor dit soort voedingen (70 – 90 wt% water) zijn slechts een beperkt aantal alternatieven voorhanden (die de voeding ook volledig benutten);
- het organisch materiaal kan volledig worden omgezet; er zijn geen reststromen;
- het is een eenvoudig proces met directe sturing op de producten;
- korte verblijftijd (0.5-2 min) en dus een compacte installatie;
- product gas komt beschikbaar op hoge druk (250-300 bar). Bij toepassing van het gas kan in veel gevallen (dure) gascompressie uitgespaard worden;
- het productgas is niet verdund met stikstof;
- het product gas is relatief schoon. Verontreinigingen blijven achter in de waterfase. Dit geldt in grote mate voor CO<sub>2</sub>, maar verontreinigingen als H<sub>2</sub>S of NH<sub>3</sub> hebben zelfs een hogere oplosbaarheid (in feite conventionele in-situ gasreiniging);
- een additioneel voordeel kan zijn dat water vrijkomt bij hoge druk en dat CO<sub>2</sub> bij de heersende condities voor een groot deel zal oplossen in het proces water. Separaat kan CO<sub>2</sub> geflasht worden tot zuivere CO<sub>2</sub> bij drukken die aantrekkelijk zijn voor CO<sub>2</sub> opslag.

## 2.2 Procesbeschrijving

Een vereenvoudigd processtroomschema van een superkritiek water vergassingsproces is weergegeven in Figuur 2.1. De voeding is een slurrie of waterige vloeiding die met een pomp op een druk van 300 bar wordt gebracht. In een tegenstroomwarmtewisselaar wordt de voeding voorverwarmd tot een temperatuur van 400 –550 °C. Het superkritieke punt van water wordt dus in de warmtewisselaar gepasseerd. De reactor wordt bedreven op een temperatuur van 600-650 °C en een verblijftijd van typisch 0.5-2 min. Het uitgangspunt van de reactor wisselt, in een tegenstroom warmtewisselaar, warmte uit aan de voeding.



Figuur 2.1 Schematische weergave van het SCWG proces

De stroom uit de warmtewisselaar kan verder gekoeld worden of gevoed worden aan de hoge druk gas-vloeistof scheider. In de scheider worden het gasvormige product en de waterfase gescheiden. Vanwege de hoge druk zal echter ook een deel van het gas oplossen in de waterige fase. Het betreft dan vooral  $\text{CO}_2$  en indien aanwezig  $\text{HCl}$ ,  $\text{H}_2\text{S}$ ,  $\text{NH}_3$ . Mineralen zullen logischerwijs ook in de waterfase achterblijven. Het topproduct van de scheider is het hoofdproduct. De waterstroom wordt in een tweede lagedruk scheider gebracht, waarbij een tweede gasstroom vrijkomt. Dit gas zal rijk zijn in  $\text{CO}_2$ . Afvangen van  $\text{CO}_2$  in geconcentreerde vorm biedt wellicht de mogelijkheid dit effectief op te slaan. Het proces is dan niet  $\text{CO}_2$  neutraal, maar  $\text{CO}_2$  negatief.

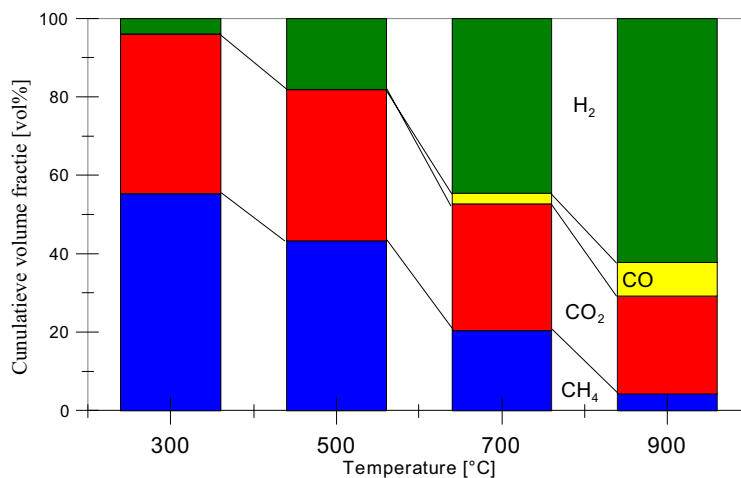
Het schema zoals weergegeven in Figuur 2.1 kan beschouwd worden als een basisconcept. Hierop zijn tal van variaties mogelijk afhankelijk van o.a. de voeding, schaalgrootte en beoogde toepassing. De reactor wordt meestal voorgesteld als een doorstroomde buis, maar reactorontwikkeling zou tot nieuwe concepten kunnen leiden.

## 2.3 Producten

De samenstelling van het ruwe gas geproduceerd in het SCWG proces is duidelijk anders dan voor “conventionele” vergassingsprocessen. De oorzaak hiervoor is de hoge druk, relatief lage temperatuur, en de grote overmaat water in het proces. Het gevolg is dat het gas voornamelijk  $\text{H}_2$ ,  $\text{CH}_4$  en  $\text{CO}_2$  bevat (zie ook Tabel 2.1), en bovendien beschikbaar komt bij hoge druk.

Tabel 2.1 *Typische gassenstelling gemeten in de installaties van BTG-UT. Vergassing van glycerol en glucose ; 10% droge stof*

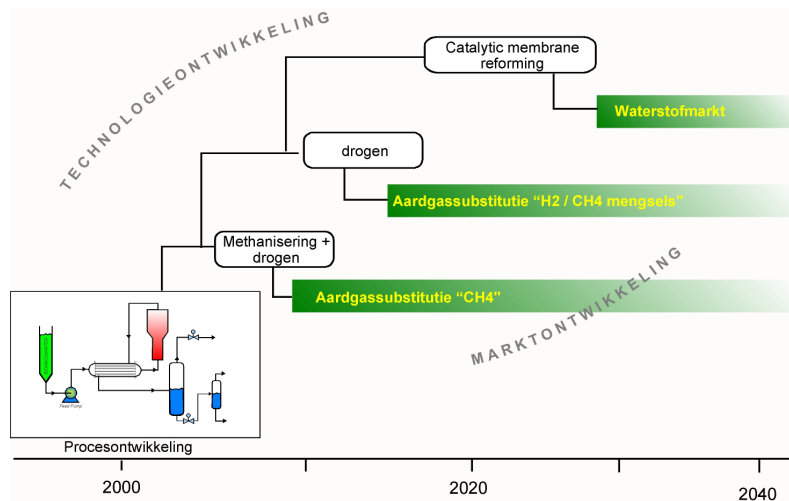
Component	Concentratie (vol%)	Concentratie (vol%)
	Superkritisch glycerol, laboratoriumopstelling P=270 bar; T=580 °C	Subkritisch glucose, quartz capillairen P=210ar; T=350 °C
Waterstof (H <sub>2</sub> )	60	7.5
Koolmonoxide (CO)	0.5	< 1
Kooldioxide (CO <sub>2</sub> )	21	45
Methaan (CH <sub>4</sub> )	12	45
Etheen/ethaan	5	Na
Propeen/propaan	1	Na
LHV [MJ/Nm <sup>3</sup> ]	15	21



Figuur 2.2 *Evenwichtsconcentraties H<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, CO en CO<sub>2</sub> als functie van de temperatuur. Druk: 300 bar; voeding: 80% water, 20% organisch*

### **Relevantie transitiepad**

Aardgas speelt een zeer belangrijke rol in de Nederlandse energievoorziening, en vervanging van aardgas door “groen gas” kan een aanzienlijke bijdrage leveren aan de verduurzaming. De ontwikkeling van het proces moet zich dan richten op maximalisatie van het methaangehalte. Op langere termijn –wanneer er een markt voor duurzaam waterstof bestaat- kan een omslag worden gemaakt naar waterstofproductie. In de transitie van aardgas naar waterstof (zie Figuur 2.3) kan de markt worden voorzien van H<sub>2</sub>/CH<sub>4</sub> mengsels. Ontwikkeling van het SCWG proces kan parallel verlopen met deze transitie. De tijdstippen van deze omschakelingen worden o.a. bepaald door de markt en de technische aspecten (zie hoofdstuk 8 ‘Conclusies en Aanbevelingen’).



Figuur 2.3 Transitiepad van methaan naar waterstof middels superkritieke vergassing

## 2.4 Voeding

Het SCWG proces is vooral bedoeld voor de conversie van zeer natte voedingsstromen (> 70 gew.% water). Het betreft dan bijvoorbeeld waterige reststromen of slurries van vaste biomassa. Biomassa en reststromen kunnen op tal van manieren geclassificeerd worden. We onderscheiden droge en natte biomassa, waarbij arbitrair de grens gelegd wordt bij 70 gew.% vocht. In het algemeen bevat biomassa relatief weinig H-moleculen en is daarmee niet direct de ideale bron voor de productie van waterstof. Bij droge biomassa zal in een van de processtappen alsnog water / stoom worden toegevoegd; bij natte biomassa is dit reeds aanwezig. Typische conversieketens voor droge biomassa resulteren in een CO/H<sub>2</sub> mengsel, terwijl de conversieprocessen voor natte biomassa veelal een CH<sub>4</sub>/H<sub>2</sub> mengsel opleveren. Dit gegeven zal dan ook bepalend zijn voor een transitie naar waterstof.

De gewenste eigenschappen van de brandstof voor drie conversieroutes (vergasen, verbranden, vergisten, superkritiek vergassen) zijn geïdentificeerd door Essent, ECN en Techno Invent (Reith, J.H., et al, feb. 2004). Daarbij is zowel gelet op technische eisen vanwege de procesvoering als op de eisen waaraan moet worden voldaan om de geproduceerde secundaire energiedragers te kunnen afzetten als “groene energie” volgens de criteria van Essent. Tabel 2.2 vat die criteria samen.

Voor vergassing van natte biomassastromen in superkritiek water kan aan verschillende bronnen worden gedacht:

- Afvalstromen (GFT, ONF, reststromen van agro- en voedingsmiddelenindustrie, mest etc.): anno 2040 zijn dit nuttige bijproducten geworden (aansluiting transitiepad 2). In Nederland is momenteel jaarlijks 5,3 tot 12 miljoen ton droge stof (potentieel) beschikbaar. Bij een omzettingsefficiëntie van 65% kan daarmee 70 tot 160 PJ energie worden opgewekt, hetgeen overeenkomt met 2 tot 5% van het huidige jaarlijkse energiegebruik in Nederland. Dit getal zal toenemen met de ontwikkeling van de “Biobased Economy”. De verwachting is dat het natte aandeel dat voor de hier gepropageerde conversie methoden beschikbaar is in 2040 ook rond een hoeveelheid van 12 miljoen ton droge stof zal liggen, maar dan als vaste component in een overigens natte stroom. Let op: in deze getallen zijn nieuwe bronnen van biomassa (of evt. import van biomassa) nog niet meegenomen!
- Aanvullende energieproductie door gebruik van natte energiegewassen die interessant zijn vanwege de hoge specifieke opbrengst, die passen bij verhoogde prioriteit voor groene en blauwe functies in ons landelijke gebied en niet concurreren met voedselproductie (hout 10 ton/ha.jaar) en aquatische biomassa (transitiepad 12). Het potentiële aanbod in Nederland bedraagt aan microalgen 36 PJ<sub>th</sub> per jaar, waterplanten (zeewieren) in zoutwater 333 PJ<sub>th</sub> per jaar en in zoetwater 14 PJ<sub>th</sub> per jaar. Totaal is dit 383 PJ<sub>th</sub> per jaar (excl. hout).

- Verontreinigde (natte) afvalstromen (zoals rioolslib en havenslib). Er komt in Nederland per jaar 1,8 miljoen ton rioolslib vrij (afvoer naar slibverwerkers). Hiervan is 0,4 miljoen ton droge stof. Er wordt in Nederland 40 miljoen ton baggerspecie geproduceerd per jaar, waarvan 50% uit zout water (vooral havens). Hierin zit 10 - 20% organische stof.
- Huishoudelijk en industrieel afvalwater. In Nederland is jaarlijks 2 miljoen ton droge organische stof beschikbaar als een natte afvalstroom die door genoemde technologie in waardevolle energiedragers kan worden omgezet.

Deze producten (en juist ook combinaties) vormen waardevolle grondstofstromen. Anderzijds wordt het voor de betreffende bedrijven ook steeds belangrijker om meer duurzame afzet/verwerking van die bijproducten te zoeken/ontwikkelen.

Tabel 2.2 *Gewenste eigenschappen van de brandstof t.b.v. conversie*

	Vergassing	Verbranding	Vergisting	Vergassing in superkritiek water
Vochtgehalte in gew% natte basis	< 20	<50 <sup>(a)</sup>	> 40	70 - 90
Asgehalte	laag <sup>(b)</sup>	laag <sup>(b)</sup>	laag, minder belangrijk	laag <sup>(b)</sup>
Ultimate analyse (C, H, N, O, S, Cl)	minimaal N <sup>(c)</sup> minimaal S <sup>(d)</sup>	minimaal N, Cl <sup>(c)</sup> minimaal S <sup>(d)</sup>	C/N = 15 minimaal Cl, S	minimaal N, Cl <sup>(c)</sup> minimaal S <sup>(d)</sup>
Calorische waarde [MJ/kg daf]	ca. 20 <sup>(e)</sup>	ca. 20 <sup>(e)</sup>	niet van belang	ca. 20 <sup>(e)</sup>
Assamenstelling i.v.m. asagglomeratie (K, Na, P, Ca, Cl)	belangrijk	niet van belang	niet van belang	niet van belang
Aanwezigheid van biologisch actieve reagentia <sup>(f)</sup>	niet van belang	niet van belang	belangrijk	niet van belang
Aanwezigheid van biologisch actieve reagentia <sup>(g)</sup>	belangrijk	belangrijk	belangrijk	belangrijk

- (a) Een drogere brandstof leidt tot: een geringe toename van het rendement, een forse toename van de capaciteit van een installatie (dus afname specifieke investering), maar de noodzaak van extra koeling in de vuurhaard voor het in de hand houden van de temperatuur.
- (b) Een laag asgehalte is gewenst vanwege de geringere reststroom (en de eventueel daarmee gepaard gaande kosten van afvoer). Het effect van het asgehalte op het thermische rendement is gering.
- (c) N resulteert uiteindelijk (deels) in NO<sub>x</sub> en is daarom ongewenst. In het algemeen zullen (de residuen van) algen echter relatief hoge N-concentraties hebben in vergelijking met alternatieve biobrandstoffen zoals hout (tenzij de eiwitten selectief zijn geëxtraheerd). Dit maakt extra NO<sub>x</sub>-reducerende maatregelen noodzakelijk. Bij vergassing zal dit echter grotendeels kunnen plaatsvinden door de verwijdering van NH<sub>3</sub> uit het productgas middels waterscrubbing. De kosten van dit systeem zijn echter meer afhankelijk van de grootte van de gasstroom dan de concentratie NH<sub>3</sub>, waardoor bij vergassing als conversie de N-concentratie in de brandstof geen belangrijk criterium is.
- (d) De aanwezige S leidt bij vergassing tot H<sub>2</sub>S/COS (verwijdering overeenkomstig NH<sub>3</sub>) en bij verbranding tot SO<sub>x</sub>. Het komt bij biomassa echter vaak voor dat de concentratie S dermate gering is dat er geen maatregelen hoeven te worden genomen om aan de SO<sub>x</sub>-emissie limieten te voldoen.
- (e) De calorische waarde van biomassa op droge en asvrije basis (daf) ligt altijd rond de 20 MJ/kg. De stookwaarde (onderste verbrandingswaarde) is dus vooral een functie van as- en vochtgehalte waarvoor reeds limieten/gewenste waarden in de tabel zijn vermeld.
- (f) Gezien vanuit technisch oogpunt.
- (g) Gezien vanuit duurzaamheidsoogpunt ('groene' energie).





### 3. STATE OF THE ART

#### ***Historie***

SCWG vergassing vindt zijn oorsprong in onderzoek dat in jaren 70 op MIT werd uitgevoerd door Professor Michael Modell; deze verkreeg octrooi op het omzetten van glucose in olie en het extraheren van steenkool met water rond het kritisch punt. Door toevoeging van lucht trad volledige oxidatie op van het organische materiaal. Hiermee was de superkritieke water oxidatie technologie geboren en eveneens met octrooien beschermd. Dit onderzoek werd gesteund door de Amerikaanse overheid omdat er behoefte was aan technologie om menselijke reststoffen op te ruimen en water te zuiveren in de ruimtestations die toen voorzien werden. Belangrijk was dat deze oxidatie “six nines purity” kon halen. Meer aardse interesse bestond uit het vernietigen van toxische waterige afvalstromen, bijv. van de farmaceutische industrie. General Atomic in Californie heeft een proces ontwikkeld om strijdgassen en raketbrandstoffen te vernietigen.

Een van de technische uitdagingen van de SK oxidatie was de afvoer van reactiewarmte op het nivo van 600 tot 650°C bij 300 bar. Deze reactie enthalpie was substantieel en werd als stoom afgevoerd. Hiermee kon zonodig kracht worden opgewekt. Het oxidant was bij voorkeur zuurstof die bij een druk van 300 bar diende te worden toegevoerd.

Exergetisch gezien was het gebruik van zuurstof en de productie van stoom niet optimaal. Het omzetten van de organica in afwezigheid van zuurstof naar gassen leek een betere route in dat opzicht en zo verschoof de focus naar energieopwekking, naast waterreiniging. Penninger, van SPARQLE International te Hengelo, heeft eind jaren 70, voortbouwend op de bevindingen van Modell, steenkool extractie met SK water uitgevoerd bij Occidental Research in Californie als middel om steenkool ondergronds in olie om te zetten. Dit heeft impuls gegeven tot onderzoek naar de chemie van organische modelsubstraten dat hij in de jaren 80 uitvoerde als hoogleraar aan de TU/e. Gelijkijdig ontstond de activiteit van Professor Michael Antal aan de universiteit van Hawaii.

#### ***Ontwikkeling in Nederland***

De SK water vergassing werd in Nederland een kernthema toen SPARQLE werd opgericht. Spoedig kwam het contact met BTG Enschede tot stand en beide bedrijven hebben sinds 1995 een samenwerking op dit gebied. Intussen heeft dit een aantal octrooiaanvragen opgeleverd. Eind jaren 90 sloot TNO-MEP zich aan en tezamen met de firma Promikron te Delft werd met steun van Novem een pilot unit in bedrijf genomen. In een Japans samenwerkingsproject werd kort daarop door BTG en de Universiteit een nieuwe pilot-plant gerealiseerd. Deze laatste pilot plant staat centraal in een groot Europees project, waarin o.a. BTG, Universiteit Twente, Sparqle en TNO-MEP participeren. Ook zijn er onlangs een aantal nieuwe projecten gestart om het proces verder te ontwikkelen alsmede een aantal haalbaarheidsstudies.

#### ***Ontwikkelingen wereldwijd***

Het aantal bedrijven/instituten die wereldwijd serieus actief zijn met de ontwikkeling van het SCWG proces is vooralsnog beperkt. Een aanzienlijk deel van de inspanningen hebben betrekking op kleinschalige batchexperimenten, zoals ondermeer uitgevoerd in Japan (Hiroshima University, AISTE Osaka Gas), Zwitserland (PSI), en Duitsland (Universiteit Karlsruhe). Met betrekking tot procesontwikkeling zijn er minder activiteiten, vermoedelijk omdat hiervoor zeer kostbare installaties nodig zijn. Naast de continue installatie (tot 30 L/hr) in Nederland heeft Forschungszentrum Karlsruhe een grote pilot-plant (100 L/hr doorzet), en in de USA heeft Pacific Northwest Laboratory de beschikking over een continue installatie. In Denemarken is men recentelijk begonnen met dit proces met als doel de verwerking van teerhoudend afvalwater.

### ***Status***

In opdracht van DOE heeft NREL - zelf niet actief op het gebied van vergassing in superkritiek water - een techno-economische analyse van het proces uitgevoerd. Als gevolg daarvan is het Antal onmogelijk gemaakt nog nieuwe fondsen te werven voor vervolgonderzoek en gedwongen zijn activiteiten op dit gebied te stoppen. In hoofdstuk 4 zijn de resultaten van NREL nader uitgewerkt. De NREL studie (Amos 1999b) geeft aan dat ca 80% van de investeringen benodigd zijn voor 1 warmtewisselaar, hetgeen met name veroorzaakt lijkt te worden door de keuze van exotische materialen.

Daarentegen, Chematur uit Zweden heeft dit probleem voor superkritiek water oxidatie opgelost door andere materialen te kiezen die bewezen hebben te voldoen onder de geldende condities (aanwezigheid van zuurstof maakt het probleem nog groter).

In een Europees programma is door een engineering/contracting company (Sparkle International B.V. and Callaghan Engineering Ltd., Ireland: EU-JO-ST-3042) een vergelijkbare analyse uitgevoerd met significant betere resultaten.

Ook bij het HTU proces is een evaluatie gemaakt door een engineer/contractor, waarbij de resultaten vergelijkbaar zijn met de Europese studie. Globaal gezien (voor wat betreft apparaten en complexiteit) vertoont superkritiek water vergassing grote overeenkomsten met het HTU proces.

In het kader van een NEDO project heeft Matsumura (Matsumura 2002) (universiteit Hiroshima) een economische evaluatie gemaakt van het proces voor toepassing in Japan. De gekozen schaal heeft echter geen enkele relevantie (feitelijk een laboratoriuminstallatie). Matsumura heeft deze schaal gekozen omdat naar zijn mening in Japan maximaal 1 ton/dag geschikte voeding kan worden verzameld.

Opmerkelijk is voorts dat Antal, vanwege het NREL rapport (Amos 1999b) gedwongen werd zijn activiteiten te stoppen, er recentelijk door DOE wel weer een project op dit gebied is goedgekeurd. (uitvoerder Pacific North-West laboratory).

De grote spreiding van investeringsschattingen wordt veroorzaakt doordat procesuitvoeringsvorm en ontwerp van apparaten niet vastliggen en een gebrek aan experimentele validatie. Onderzoek en ontwikkeling zou zich juist hier op moeten richten.

## 4. TECHNISCH ECONOMISCHE EVALUATIE

Verschillende onderzoeksgroepen hebben voor vergassing van natte biomassa / reststromen in superkritiek water (SCWG) kostenschattingen gepubliceerd. Voor deze technisch-economische analyse zijn drie verschillende studies beschouwd. De eerste is gebaseerd op een rapportage van Sparqle International B.V. en Callaghan Engineering Ltd. (EU JO-ST-3042), de tweede op een rapportage van NREL (Amos 1999b) gebaseerd op het Antal/Divilio ontwerp en de derde studie is van de Hiroshima Universiteit in Japan (Matsumura 2002). De uitgangspunten varieerden o.a. in schaal van 0,15 tot 100 MW en in het geproduceerde eindproduct, gezuiverde waterstof (<95%) of een waterstofrijk gas (CH<sub>4</sub>/H<sub>2</sub> mengsel).

De samenvatting van de verschillende studies en de resultaten van het opschalen naar 558 tpd dry (100 MW<sub>th</sub> input) van NREL en Japan, staan in Tabel 4.1 weergegeven. In deze economische evaluatie is ter vergelijking uitgegaan van het ruwe productgas (een waterstof rijk (CH<sub>4</sub>/H<sub>2</sub> mengsel) als eindproduct. Eventuele nageschakelde membranen voor waterstof productie of brandstofcellen voor WKK toepassingen zijn niet meegenomen. De uitgangspunten van deze studies staan weergegeven in onderstaande tekst.

Tabel 4.1 *Schattingen van 'total fixed capital cost', 'operating cost' en de 'productiekosten' van het productgas (een waterstofrijk (CH<sub>4</sub>/H<sub>2</sub> mengsel)*

	EU	NREL (*)	Japan (*)	NREL	Japan
tpd dry input	558	558	558	30	1
feedstock storage	315.000	0	536.852	0	10.640
separator vessel	250.000	189.051	289.730	30.866	5.742
feed pump	500.000	654.848	25.564	106.916	507
HX1	825.000	19.158.356	1.798.029	3.127.953	35.636
HX2	63.000	1.448.242	0	236.452	0
HX3	34.000	892.586	0	145.731	0
reactor + furnace	6.000.000	2.234.138	5.342.959	364.764	105.893
Total Equipment Cost (E)	7.987.000	24.577.221	7.993.134	4.012.682	158.418
Installationcost 3,5 * E (I)	27.954.500		27.975.971	14.044.387	554.462
Subtotal E+ I	35.941.500		35.969.105		712.880
Engineering & CM 15%	5.391.225		5.395.366		106.932
Contingency 25%	8.985.375		8.992.276		178.220
Total Fixed Capital Cost	50.318.100	101.503.921	50.356.747	16.572.377	998.032
Feed cost / credit	0	0	0	0	
Operating supply	377.386	377.386	377.676	134.187	
Operating Labour + clerical	1.650.000	1.650.000	1.650.000	868.883	
Material, Maint. & Exp. (10% of FCI)	4.865.448	4.865.448	4.868.540	1.657.238	
Depreciation (10 jr)	5.031.810	10.150.392	5.035.675	1.657.238	
	11.924.644	17.043.226	11.931.890	4.317.545	
Product gas production rate (GJ/yr)	2.102.688	1.930.327	1.506.600	103.781	2.700
Product gas production price (€/GJ)	5,67	8,83	7,92	41,60	
Product gas selling price (15% after-tax IRR)	9,35	16,92	13,06	66,17	

(\*) Schaalveranderingsfactor = 0,62

De eerste studie is een haalbaarheidstudie van Sparqle Internatioal B.V. en Callaghan Engineering Ltd. (EU JO-ST-3042) voor de productie van een waterstof rijk gas (CH<sub>4</sub>/H<sub>2</sub> mengsel). Een relatief grote schaal van 186 ton ds/jaar (558 tpd dry /100 MW<sub>th</sub> input) stand-alone is beschouwd. Met als voeding een natte slurrie met 20 gew.% droge stof voor 0 €/ton. Een aanname is dat het proces een opbrengst heeft van 80% exporteerbare energie gebaseerd op HHV ds. Bij een totaal gebonden kapitaal van 50,3 M€ zijn de productiekosten voor het ruwe productgas bij een kostprijs van 0 €/ton ds biomassa met 20% droge stof, 5,7 €/GJ<sub>productgas</sub>, met een verkoopprijs (met IRR 15% na belasting) van 9,4 €/GJ<sub>productgas</sub>.

In de tweede studie, een systeemstudie van NREL (Amos 1999b, USA) is uitgegaan van het Antal/Divilio proces voor de productie van pure waterstof met een nageschakeld membraan. In

deze economische vergelijking is uitgegaan van het ruwe productgas, daarom zijn de kosten voor het nageschakelde membraan niet meegenomen. Met een capaciteit van 30 tpd droge stof (200 tpd nat, 5 MW<sub>th</sub> input) is het totaal gebonden kapitaal 16.5 M€. De productiekosten voor het ruwe productgas komen dan, bij een kostprijs van 0 €/ton ds biomassa met 15% droge stof, op 41,6 €/GJ<sub>productgas</sub>. De productiekosten voor waterstof met een nageschakeld membraan, hydrogen chiller en een hydrogen chiller pomp komen uit op 61 €/GJ<sub>waterstof</sub>. Wanneer de plant wordt opgeschaald naar 558 tpd dry (100 MW<sub>th</sub> input) dalen de productiekosten voor het ruwe productgas naar 8,8 €/GJ<sub>productgas</sub>, met een verkoopprijs (met IRR 15% na belasting) van 16,9 €/GJ<sub>productgas</sub>.

De derde studie is een evaluatie van de Hiroshima Universiteit in Japan (Matsumura 2002). Hier wordt met het geproduceerde waterstofrijke gas (CH<sub>4</sub>/H<sub>2</sub> mengsel) elektriciteit geproduceerd met een nageschakelde brandstofcel. De studie gaat uit van een capaciteit van 1 tpd droge stof, 0.15 MW<sub>th</sub> input met als voeding water hyacinth met 5% droge stof. Wanneer de plant wordt opgeschaald naar 558 tpd dry (100 MW<sub>th</sub> input) komt het totaal gebonden kapitaal, zonder brandstofcel, op 50,3 M€. Hiermee komen de productiekosten voor het ruwe productgas, bij een kostprijs van 0 €/ton ds biomassa, op 7,9 €/GJ<sub>productgas</sub> met een verkoopprijs (met IRR 15% na belasting) van 13,1 €/GJ<sub>productgas</sub>.

Voor de conversie van natte biomassa kan het SCWG proces, in tegenstelling tot het vergistingsproces, de organische fractie in de voeding volledig omzetten. Wel dient opgemerkt te worden dat het volledig omzetten van de voeding, in afwezigheid van een katalysator, alleen mogelijk is bij een erg lage droge stof gehalte (<5%) of bij erg hoge temperaturen (>700°C). Beide situaties geven een productgas met een laag methaan en een hoog waterstofgehalte. Om voedingen met een hoge droge stof gehalte (tot 20%), bij een temperatuur van < 600°C, volledig om te zetten in een productgas met een hoog methaan gehalte, dient de vergassing te worden uitgevoerd met een katalysator. Katalysator kosten zijn in de bovenstaande studies niet meegenomen maar heeft zeker een effect op de kostprijs van het productgas. Naast de kosten van de katalysator zijn ook de kosten voor o.a.: verwerking van een grote hoeveelheid afvalwater met verontreinigingen, de voorbereiding van de voeding en de reiniging en opwerking van het ruwe productgas, niet meegenomen in de economische evaluatie. In alle SCWG studies is uitgegaan van een kostprijs van 0 €/ton ds biomassa. De relatief hoge productiekosten worden veroorzaakt door de hoge investeringskosten en de bedrijfs-/onderhoudskosten van het SCWG proces. De grote spreiding van investeringsschattingen wordt veroorzaakt doordat procesuitvoeringsvorm en ontwerp van apparaten niet vastliggen en een gebrek aan experimentele validatie. Een manier om de productiekosten te kunnen verlagen is door organische afvalstromen in te zetten met een negatieve marktwaarde.

Gezien de bovenstaande productiekosten van het SCWG productgas is het realistischer om dit proces te ontwikkelen voor een methaanrijk gas (CH<sub>4</sub>/H<sub>2</sub> mengsel) of SNG, dan voor waterstof productie. Om methaanrijk gas te produceren is lage temperatuur vergassing thermodynamisch gunstiger. Dit betekent dat er minder warmte nodig is om de voeding op de juiste temperatuur te brengen, wat leidt tot een hoger procesrendement en dus ook lagere productie kosten. Vogel van PSI (Vogel 2004) heeft een studie gedaan naar SNG productie uit mest en hout, met katalysator en een hoog droge stof gehalte (tot 30 gew.%) bij 350 – 415°C en 270 – 320 bar. Het geproduceerde gas bevatte veel methaan en koolstofdioxide en een kleine hoeveelheid waterstof (2 – 3 vol %). PSI berekende de productiekosten voor SNG uit hout op 10 €/GJ voor een 20 MW<sub>th</sub> SNG installatie (op basis van een thermisch procesrendement van 70%) met een kostprijs van 3,5 €/ton ds schoon hout. Als de biomassa gratis is, verwacht PSI dat de SNG productiekosten zullen dalen naar 5 – 6 €/GJ. Hun economische analyse is gebaseerd op de aanname dat er geen extra methaniseringsreactor nodig is. Het is hier niet duidelijk wat als investeringskosten en bedrijfs-/onderhoudskosten zijn aangenomen. Het is ook niet duidelijk de kosten voor o.a.: verwerking van een grote hoeveelheid afvalwater met verontreinigingen, de voorbereiding van de voeding en de reiniging en opwerking van het ruwe productgas, zijn meegenomen in de economische evaluatie.

Voor SNG productie uit hout zijn er twee concurrerende vergassingsroutes; zuurstof geblazen CFB druk vergassing en de atmosferische indirecte stoom geblazen vergassing (Battelle/Güssing). Een economische evaluatie daarvoor is uitgevoerd door ECN (Mozaffarian 2003). De productiekosten voor SNG, uitgaande van 100 MW thermal input en een biomassa kostprijs van 2,3 €/GJ<sub>biomassa</sub>, liggen in de range van 7,8 – 8,5 €/GJ<sub>SNG</sub> (afschrijving in 13 jaar en een interne rente voet van 6 %).

Vanwege de (relatief) hoge investeringskosten van het SCWG proces, is het aan te bevelen om een technische economische vergelijking te maken van het SCWG proces met de traditionele routes voor de conversie van natte biomassa / reststromen, zoals vergisting. En met thermo-chemische processen, geschikt voor relatief droge biomassa. Voor vergassing dient wel een groot gedeelte van het water van de natte biomassa / reststromen verwijderd te worden door mechanisch drogen, door verschillende filtratie technieken, eventueel gevolgd door thermisch drogen, om tot het vereiste vochtgehalte voor verbranding (50 gew.%), of vergassing (10-15 gew.%) te komen.

### ***Samenvatting***

Voor een stand-alone SCWG plant voor productie van ruw productgas (een waterstofrijk CH<sub>4</sub>/H<sub>2</sub> mengsel), zal de installatie een grote capaciteit (> 20MW) moeten hebben. Afhankelijk van de investeringsaannamen, liggen de productiekosten van het ruwe productgas voor een 100 MW systeem op 5,7 – 8,8 €/GJ<sub>productgas</sub>. De verkoopprijs komt dan, met een IRR van 15% na belasting, op 9,35 – 16,92 €/GJ<sub>productgas</sub>. Dit is een factor 2,5 – 4,8 hoger in vergelijking met 3,5 €/GJ<sub>NG</sub> voor aardgas (grootverbruik). Tenzij de biomassa verkrijgbaar is met een negatieve waarde (–25 €/ton ds), dan kunnen de productiekosten dalen tot 3,2 €/GJ<sub>productgas</sub>.

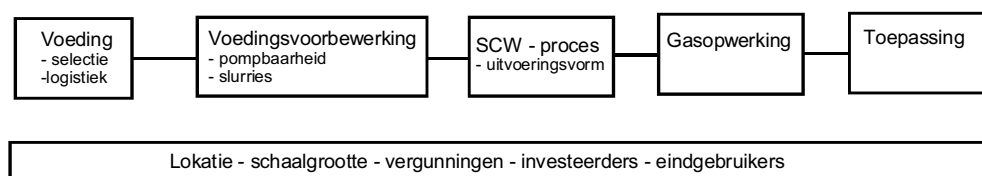
De prijzen voor H<sub>2</sub> productie liggen nog veel hoger. De productiekosten voor waterstof met een nageschakeld membraan, hydrogen chiller en een hydrogen chiller pomp komen uit op 61 €/GJ<sub>waterstof</sub>. Conventionele grootschalige waterstof productie uit aardgas kost 6 €/GJ en kleinschalig 11 €/GJ. Dit betekent dat men SCWG technologie alleen zou moeten inzetten voor grootschalige productie van CH<sub>4</sub>/H<sub>2</sub> mengsels of SNG uit natte biomassastromen (> 70 gew % vocht) met een negatieve markt waarde. De relatief hoge productiekosten worden veroorzaakt door de hoge investeringskosten en de bedrijfs-/ onderhoudskosten van het SCWG proces. De grote spreiding van investeringsschattingen wordt veroorzaakt doordat procesuitvoeringsvorm en ontwerp van apparaten niet vastliggen en een gebrek aan experimentele validatie. Een manier om de productiekosten te kunnen verlagen is door organische afvalstromen in te zetten met een negatieve marktwaarde. In deze economische evaluatie zijn de kosten voor o.a.: katalysator, verwerking van een grote hoeveelheid water met verontreinigingen, de voorbewerking/reiniging van de voeding en opwerking van het ruwe productgas nog niet meegenomen.

## TRANSITIE EXPERIMENT / COALITIE

Een eerste stap in de commercialisatie van het SCWG proces zou een kleinschalige demonstratie eenheid moeten zijn. Dit kan in belangrijke mate helpen technische onzekerheden weg te nemen, en gevalideerde data te verkrijgen m.b.t. de economische analyse (investeringskosten, operationele kosten, lange termijn aspecten zoals corrosie).

### *Transitie-experiment*

De capaciteit van een eerste demonstratie installatie zou typisch zo'n 1 MW<sub>th</sub> kunnen zijn. Enerzijds levert dit realistische praktijkgegevens op, anderzijds zijn de investeringskosten nog te overzien, en een redelijke flexibiliteit blijft behouden.



Figuur 0.1 *Opzet transitie-experiment*

Elk van de stappen in het transitie experiment zullen moeten worden gedefinieerd. Hieronder zal ieder van de stappen nader worden toegelicht

### *Voeding en voedingsvoorbewerking*

Het uitgangspunt is de verwerking van natte biomassa / reststromen in het algemeen, maar ook m.b.t. de voeding zal er een transitie moeten plaatsvinden. Een transitie m.b.t voeding zou kunnen zijn eerst de meer “eenvoudige” voedingen te zoeken. Onder eenvoudige voedingen wordt verstaan: vloeibare voedingen met een voldoende organisch stof gehalte (10-20 wt%). Een laag mineralen gehalte is ook een voordeel. De vraag is of dit soort eenvoudige voedingen beschikbaar zijn (tegen redelijke prijs; hoe mooier de voeding des te hoger de prijs).

Een ‘ideale’ voeding is het bijproduct van biodiesel (glycerol). De glycerol wordt nu veelal opgewerkt en afgezet in de farmaceutische industrie of wasmiddelen. Opwerking schijnt ook kostbaar te zijn en de markt beperkt. Daarnaast bevat de glycerol vaak nog de katalysator (K of Na) voor verestering, en die heeft ook katalytische activiteit voor SCWG (het resulteert in een CO vrije productgas). Deze voedingen zijn met name echter in Duitsland, Oostenrijk en Frankrijk te vinden, en vooralsnog niet of nauwelijks in Nederland.

Industrieel afvalwater is mogelijk interessant op voorwaarde dat het organische stof gehalte voldoende hoog is.

Vinasse (Nedalco) is ook een mooie vloeibare voeding en het op druk brengen van deze voeding is tamelijk eenvoudig. Complicatie is het hoge as gehalte en de hoge concentratie eiwitten. Het organische stof gehalte is wel hoog. Vinasse is nog niet getest in laboratoria.

Door in eerste instantie te kiezen voor vloeibare voedingen is de noodzaak voor verdere voorbewerking geminimaliseerd.

### *SCWG proces*

Momenteel wordt er veel onderzoek- & ontwikkelingswerk verricht aan het SCWG proces zelf. De eerste resultaten zijn goed, maar tegelijkertijd moet gerealiseerd worden dat dit met name is gebaseerd op “ideale” voedingen. Bij meer complexe voedingen is het risico van de vorming

van kool en asprecipitatie zeer zeker aanwezig. Meer geavanceerde combinaties van warmtewisselaar en reactor lijkt hiervoor goede mogelijkheden te bieden, maar is zeker nog niet bewezen. Ook ten aanzien van corrosie bestaat er nog de nodige onzekerheid.

De huidige pilot-plant in het hoge-druk laboratorium van de UT is gebaseerd op een eenvoudige basisconfiguratie. Vanuit procesoogpunt lijkt het verstandig een tussenfase te hebben tussen de huidige stand van zaken en de eerste demo, waarbij de aandacht vooral gericht is op een tweetal aspecten

- verwerking van meer complexe voedingen (incl. mineralen)
- testen van alternatieve warmtewisselaar – reactor concepten

De stap van de huidige installatie en resultaten naar een demo-installatie lijkt vooralsnog te groot.

### ***Gasopwerking – toepassing***

Het geproduceerde gas bestaat voornamelijk uit H<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> en CO<sub>2</sub>. De benodigde kwaliteit wordt volledig bepaald door de toepassing van het gas. SNG lijkt voor de hand liggend, maar dan zal H<sub>2</sub> moeten worden verwijderd, en ook voor CO<sub>2</sub> geldt dit in belangrijke mate. Bij de hoge druk van het SCWG proces ligt methanisering voor de hand – de hoge druk bevordert de vorming van methaan uit CO<sub>2</sub> en H<sub>2</sub>. Theoretisch moet dit mogelijk zijn, echter praktisch is dit niet bewezen. Methanisering is een katalytisch proces, en daarmee gevoelig voor verontreinigingen. Chloor en zwavel worden waarschijnlijk voor een groot gedeelte met de waterfase afgevoerd, maar mogelijk is dit niet voldoende, en zijn er additionele safeguard bedden noodzakelijk. Dit vergt nog enig onderzoek (deels al lopend).

Om het risico in een transitie experiment te verminderen zou het gas geleverd kunnen worden aan een specifieke eindgebruiker die met lagere eisen kan volstaan dan voor SNG gelden. Een voorbeeld is Methanor, waarbij mogelijk enig waterstof in het gas geen enkel probleem is. Tijdens het transitie-experiment kan dan de gaskwaliteit gecontroleerd worden en beoordeeld in hoeverre bijmenging realistisch wordt geacht (en bijmenging zou dan een volgende stap kunnen worden).

### ***Lokatie- eindgebruiker – investeerders***

Om het transitie-experiment concreet te maken is het nodig uiteindelijk de verschillende relevante partijen bijeen te brengen. Met name de identificatie van investeerders en eindgebruiker is hierbij van belang. De locatie voor de demo is daar vaak een afgeleide van. De investering in een dergelijke demo-installatie (1 MW<sub>th</sub>) zal zeker een aantal miljoen Euro zijn. Benaderen van deze partijen heeft alleen zin als het technische concept al voldoende bewezen is.

### ***Samenvatting***

Op basis van de stand van zaken en de technische onzekerheden in het proces kan niet anders geconcludeerd worden dat het opzetten van een eerste demo-installatie nog te vroeg is. Naast een aanzienlijke investering en bijbehorend financieel risico bestaan er ook zeker nog de nodige technisch risico's. De demo-installatie wordt dan al snel een onderzoeks- & ontwikkelingsinstallatie (zie hoofdstuk 6) met beperkte flexibiliteit en elke wijziging zal zeer kostbaar en tijdrovend zijn. Op dit moment wordt de realisatie hiervan dan ook onverantwoord gevonden.





## 5. O&O TRAJECT

De ontwikkeling van het SCWG –proces bevindt zich in een vroeg stadium, en er zullen nog de nodige R&D-inspanningen moeten worden geleverd om marktintroductie mogelijk te maken. In dit hoofdstuk wordt een kort overzicht gegeven van aandachtsgebieden voor verdere ontwikkeling. Deze aandachtsgebieden zullen geadresseerd worden in onderzoeksvoorstellen binnen het lange termijn EOS programma.

De gehele keten van natte biomassa tot eindproduct kan worden gesplitst in een aantal deelgebieden, en de ontwikkelingen kunnen betrekking hebben op een deelgebied als wel het totale proces.

### *Voedingsvoorbewerking*

Het SCWG proces wordt bedreven onder hoge druk (~300 bar). Hiervoor is het noodzakelijk dat de voeding zodanig wordt voorbereid dat het met een pomp naar deze druk kan worden gebracht. Voor vloeibare reststromen is dit geen probleem, maar bij gebruik van vaste biomassa-reststromen zal voorbehandeling noodzakelijk zijn. Verdere ontwikkeling van een proces om pompbare slurries te maken is vereist. Het gebruik van chemicaliën dient hierbij geminimaliseerd te worden, en daarnaast is het energieverbruik een belangrijk aandachtspunt. De ontwikkeling van een goed voorbereidingsproces is ook van belang voor andere processen zoals bijvoorbeeld het HTU proces.

### *SCWG - proces*

Experimenten met modelcomponenten in verschillende proefopstellingen (o.a. glycerol) hebben aangetoond dat met het SCWG proces zonder problemen een waterstofrijk gas kan worden geproduceerd. Verdere ontwikkeling van het proces naar een commercieel product zal echter nog de nodige ontwikkeling vereisen.

*Warmtewisselaar:* voor een voldoende hoog energetisch rendement is efficiënte warmte-uitwisseling van groot belang. Tot dusver heeft het ontwerp van de warmtewisselaar weinig aandacht gekregen. Efficiënte warmteoverdracht en het voorkomen van vervuiling zijn belangrijke aandachtspunten.

*Reactor:* voor een hoog energetisch rendement zijn een efficiënte warmteoverdracht en het voorkomen van vervuiling belangrijke aandachtspunten. Herontwerp van de reactor en integratie met de warmtewisselaar biedt mogelijk een oplossing voor dit probleem. Innovatieve uitvoeringsvormen van reactor en warmtewisselaar biedt de mogelijkheid tegelijkertijd oplossingen te vinden voor problemen mbt koolvorming, mineralen en corrosie.

*Mineralen:* biomassa en reststromen zullen in het algemeen naast organische bestanddelen ook anorganische bestanddelen (as, mineralen) bevatten. Een kenmerk van superkritiek water is dat de oplosbaarheid van zouten rondom het superkritieke punt sterk afneemt, waardoor uitzouting kan plaatsvinden. Dit kan leiden tot verstopping van procesleidingen.

*Koolvorming:* bij de conversie van biomassa treedt vrijwel altijd koolvorming op. Ongecontroleerde koolvorming kan aanleiding geven tot blokkades. Herontwerp van de reactorsectie biedt mogelijk de oplossing voor koolvorming en uitzouting.

*Toepassing katalysatoren:* door toepassing van katalysatoren in de SCWG reactor kan de productkwaliteit gestuurd worden. Bij relatief lage temperatuur is het zelfs mogelijk vrijwel uitsluitend methaan te produceren, en tegelijkertijd ook de koolstofconversie te bevorderen. Duurzaamheid van de katalysator is een van de belangrijkste aandachtspunten.

*Corrosie*: met name rond het superkritieke punt van water is bekend dat corrosie een belangrijk probleem kan zijn. Selectie en testen van de juiste constructiematerialen is een belangrijk aspect.

De UT heeft een conceptueel ontwerp gemaakt van een geïntegreerde katalytische warmtewisselaar/reactor die vervuilende condities aankan. Dit concept is gebaseerd op fluïde bedden en circulatie stroom van katalytische deeltjes die tevens het systeem schoon houden door i) een schurende werking tegen de wand van de warmtewisselaar en ii) de mogelijkheid van koolstof en minerale depositie op de vaste stof. Het ontwerp is nog conceptueel en moet nog volledig wetenschappelijk and technisch onderzocht worden. Er zijn allerlei alternatieve procesontwerpen denkbaar

### ***Gasopwerking en reiniging***

Afhankelijk van de eindtoepassing zal het gas in meer of mindere mate gereinigd en geconditioneerd moeten worden. Voor SNG zullen de specificaties van aardgas bereikt moeten worden. Voor de productie van puur waterstof is de afscheiding van waterstof bij hoge druk wenselijk, en de maximalisatie van de waterstofproductie. Hiertoe zullen ook resterende hoeveelheden methaan en hogere koolwaterstoffen omgezet moeten worden in waterstof, bij voorkeur bij een zo hoog mogelijk druk. Vanwege thermodynamische evenwichten zal de conversie van methaan en de afscheiding van waterstof simultaan moeten plaatsvinden in b.v. een membraan-reformer waarin H<sub>2</sub> selectief aan het evenwicht onttrokken wordt.. Maximalisatie en afscheiding van waterstof onder de heersende condities zal nog het nodige ontwikkelingswerk vergen. Methanisering bij deze hoge druk (~300 bar) dient nog aangetoond te worden, maar geschikte katalysatoren zijn waarschijnlijk commercieel verkrijgbaar

### ***Toepassing gas***

De toepassingen van het gas hoeven als zodanig niet ontwikkeld te worden. Wel is het zeer belangrijk dat de eisen die gesteld worden voor verschillende toepassingen (SNG, H<sub>2</sub>,...) tijdig worden meegenomen in de ontwikkeling van het proces. Voor de totale ontwikkeling van het proces is het echter wel belangrijk de verschillende toepassingen te demonstreren (zelfs als de schaal relatief beperkt is).

Naast de toepassing van het productgas is het interessant te onderzoeken of er nuttige toepassingen kunnen worden gevonden voor het CO<sub>2</sub> rijke gas. Permanente opslag is interessant en zodoende wordt zelfs een CO<sub>2</sub> negatief proces verkregen.

### ***Systeemevaluatie/kosten***

Het uiteindelijke marktpotentieel van de technologie wordt bepaald door de technisch-economische prestatie van het gehele proces van voeding tot product. Uitvoering van systeemevaluaties en investeringsschattingen zijn noodzakelijk. Aspecten hierbij zijn o.a. de selectie van geschikte voedings, beoogde schaalgrootte en mogelijkheden voor warmte-integratie.

Optimaal gebruik van de hoge druk van het productgas t.b.v. bijvoorbeeld energieopwekking verdient ook zeker aandacht (expansieturbines). Een aandachtspunt is ook de kwaliteit van het afvalwater en eventuele terugwinning van mineralen.

## 6. ANALYSE KRITISCHE SUCCESFACTOREN

Het transitieproject luidt in het kort het ontwikkelen van de SCWG keten voor de productie van duurzame waterstof uit natte biomassa. Op lange termijn geeft deze technologie de mogelijkheid voor grootschalige toepassing voor transport en opslag. Op korte termijn wordt deze toegepast op regionale schaal met opslagfuncties van beperkte duur. De ontwikkeling naar het streefbeeld loopt volgens het pad van SNG via methaan/waterstof naar waterstof productie.

Het zal nog lang onduidelijk blijven of er voor substantiële en brede toepassing van waterstof als energie-drager en opslagmedium een grote rol is weggelegd. Dit zal sterk afhankelijk zijn van de invoering van CO<sub>2</sub> belasting, en dan met name van de hoogte en de duur van deze CO<sub>2</sub> belasting. Een technologie-ontwikkelings scenario voor waterstof dient vanwege de grote onzekerheden te lopen langs de weg van, in welk scenario dan ook, robuuste technologie ontwikkeling. Robuuste technologieontwikkeling betekent dat er zich tijdens het gehele ontwikkelingstraject al marktimplementatie en commercialisatie mogelijkheden moeten voordoen om de ontwikkeling betaalbaar en efficiënt te doen verlopen. (Feedback uit praktijkinstallaties is onontbeerlijk). Daarmee worden knelpunten die ontstaan, en die eerder op economische acceptatie en institutionele belemmeringen zijn gebaseerd dan op technologische belemmeringen maximaal omzeild.

### ***Marktomvang en financiële inschatting***

Dit voorstel heeft als doelstelling de substitutie van aardgas door een gas geproduceerd uit duurzame bronnen te bevorderen. Een voorzichtige inschatting van het potentieel voor 2040 is gemaakt op basis van de natte biomassa die dan beschikbaar is en specifiek door genoemde technologieën kan worden verwerkt. Dit komt uit op 160 Petajoule, dus een verdringing van 10% van de huidige aardgas inzet.

### ***Internationale positie***

In opdracht van DOE heeft NREL een techno-economische analyse van het proces uitgevoerd voor waterstofproductie. Als gevolg daarvan heeft Antal uit Hawaiï zijn activiteiten op dit gebied moeten stoppen. Recentelijk is er door het DOE wel weer een project op dit gebied goedgekeurd. (uitvoerder Pacific North-West laboratory).

Matsumura (universiteit Hiroshima in Japan) heeft na economische analyses, in het kader van een NEDO project, de resultaten van NREL bevestigd voor kleinschalige (1 ton/dag) warmtekracht toepassingen. Het is kleinschalig omdat er volgens Matsumura in Japan maar maximaal 1 ton/dag geschikte voeding kan worden verzameld. Japan richt zich nu meer op de productie van chemicaliën en bio-methanol. Naast bovengenoemde partijen werken ook het Forschungszentrum in Karlsruhe en het Paul Scherrer Institute (PSI) in Zwitserland, aan de SCWG technologie. PSI onderzoekt of de SCWG technologie geschikt is voor SNG productie uit hout.

### ***Overlap***

De mogelijkheden van de inzet van droge biomassa voor de productie van een aardgas vervanger, zijn beperkt. Vergassing van biomassa naar synthegas gevolgd door methanisering is een belangrijke methode die ook, zeker in een transitie naar een duurzame energievoorziening, aandacht moet krijgen. Deze technologie is juist om efficiëntie redenen meer geschikt voor gebruik van relatief droge biomassa. Het is dus feitelijk geen concurrent maar eerder een complementair proces. In dit transitiepad wordt uitgegaan van afvalstoffen, die om wettelijke of kwaliteitsgerelateerde redenen niet voor voedsel- of diervoedertoepassingen in aanmerking komen, en/of exploitatie van energieteelt (bijvoorbeeld aquatische biomassa). Hierdoor is er geen sprake van verdringing.

### ***Economische risico analyse***

Voor een stand-alone SCWG plant voor productie van een ruw productgas (een waterstofrijk CH<sub>4</sub>/H<sub>2</sub> mengsel), zal de installatie een grote capaciteit moeten hebben. Afhankelijk van de investeringsaannamen, zal voor een 100 MW systeem de verkoopprijs (met een IRR van 15% na belasting) van het ruwe onbehandelde productgas liggen tussen de 9,35 – 16,92 €/GJ<sub>productgas</sub>. Dit is een factor 2,5 – 4,8 hoger in vergelijking met de verkoopprijs van 3,5 €/GJ<sub>NG</sub> voor aardgas (grootverbruik). Tenzij de biomassa verkrijgbaar is met een negatieve waarde dan kan de prijs zakken. De prijzen voor H<sub>2</sub> productie liggen nog veel hoger. De productiekosten voor waterstof met een nageschakeld membraan, hydrogen chiller en een hydrogen chiller pomp komen uit op 61 €/GJ<sub>waterstof</sub>. Conventionele grootschalige waterstof productie uit aardgas kost 6 €/GJ en kleinschalig 11 €/GJ. Dit betekent dat men SCWG technologie alleen zou moeten inzetten voor grootschalige productie van CH<sub>4</sub>/H<sub>2</sub> mengsels of SNG uit natte biomassastromen (> 70 gew % vocht) met een negatieve markt waarde.

In deze economische evaluatie zijn de kosten voor o.a.: katalysator, verwerking van een grote hoeveelheid water met verontreinigingen, de voorbereiding/reiniging van de voeding en opwerking van het ruwe productgas nog niet meegenomen.

### ***Technische risico analyse***

De SCWG technologie bevindt zich nog in een vroeg stadium van ontwikkeling en er is nog veel onderzoek nodig. Knelpunten zijn o.a. het op druk brengen van de voeding, de vervuiling en de corrosie aspecten van de warmtewisselaar/reactor. Intensieve warmteuitwisseling is essentieel en kritisch bij SCWG omdat de voeding al tijdens het opwarmen decompositie producten, zoals teer en koolstof, vormt. Een ander aspect is het reinigen van het productgas en grote hoeveelheden afvalwater. Ook de katalysator is een knelpunt. Het volledig omzetten van de voeding, in afwezigheid van een katalysator, is alleen mogelijk bij een erg lage droge stof gehalte (<5%) of bij erg hoge temperaturen (>700°C). Beide situaties geven een productgas met een laag methaan- en een hoog waterstofgehalte. Om voedingen met een hoge droge stof gehalte (tot 20%) bij een temperatuur van < 600°C volledig om te zetten in een productgas met een hoog methaangehalte, dient de vergassing te worden uitgevoerd met een katalysator. Deze katalysator is op dit moment nog niet beschikbaar.

### ***Milieu***

Emissies naar lucht zijn beperkt tot CO<sub>2</sub>. Door ‘centrale’ productie kan deze geconcentreerde CO<sub>2</sub> opgeslagen worden; de keten zorgt dan voor netto vastlegging van CO<sub>2</sub>. Andere emissies m.n. mineralen en H<sub>2</sub>S zitten in het afvalwater. Het voorgestelde streefbeeld levert dubbele winst op t.a.v. CO<sub>2</sub>: Op grootschalige productielocaties wordt dan een geconcentreerde CO<sub>2</sub> stroom geproduceerd welke kan worden opgeslagen. Door biomassaproductie wordt CO<sub>2</sub> aan de atmosfeer onttrokken. Dus: doordat CO<sub>2</sub> diffuus aan de atmosfeer wordt onttrokken en bij de verwerking/gebruik van de energie niet opnieuw vrijkomt, en doordat het vrijkomende CO<sub>2</sub> geconcentreerd kan worden opgeslagen wordt netto CO<sub>2</sub> aan de atmosfeer onttrokken.

## 7. CONCLUSIES EN AANBEVELINGEN

### 7.1 Conclusies

De volgende conclusies kunnen, met betrekking tot de economische aspecten, internationale status en de technische aspecten, getrokken worden omtrent de SCWG technologie:

#### *Economische aspecten*

Voor een stand-alone SCWG plant voor productie van een ruw productgas (een waterstofrijk CH<sub>4</sub>/H<sub>2</sub> mengsel), zal de installatie een grote capaciteit moeten hebben. Afhankelijk van de investeringsaannamen, zal voor een 100 MW systeem de verkoopprijs (met een IRR van 15% na belasting) van het ruwe onbehandelde productgas liggen tussen de 9,35 – 16,92 €/GJ<sub>productgas</sub>. Dit is een factor 2,5 – 4,8 hoger in vergelijking met de verkoopprijs van 3,5 €/GJ<sub>NG</sub> voor aardgas (grootverbruik). Tenzij de biomassa verkrijgbaar is met een negatieve waarde dan kan de prijs zakken. De prijzen voor H<sub>2</sub> productie liggen nog veel hoger. De productiekosten voor waterstof met een nageschakeld membraan, hydrogen chiller en een hydrogen chiller pomp komen uit op 61 €/GJ<sub>waterstof</sub>. Conventionele grootschalige waterstof productie uit aardgas kost 6 €/GJ en kleinschalig 11 €/GJ. Dit betekent dat men SCWG technologie alleen zou moeten inzetten voor grootschalige productie van CH<sub>4</sub>/H<sub>2</sub> mengsels of SNG uit natte biomassastromen (> 70 gew % vocht) met een negatieve markt waarde.

In deze economische evaluatie zijn de kosten voor o.a.: katalysator, verwerking van een grote hoeveelheid water met verontreinigingen, de voorbereiding/reiniging van de voeding en opwerking van het ruwe productgas nog niet meegenomen.

#### *Internationale status*

Antal uit Hawaiï heeft zijn activiteiten op het gebied van het SCWG proces voor waterstofproductie moeten stoppen als gevolg van een techno-economische analyse, die NREL in opdracht van DOE heeft uitgevoerd. Recentelijk is er door het DOE wel weer een project op dit gebied goedgekeurd (uitvoerder Pacific North-West laboratory).

Matsumura (universiteit Hiroshima in Japan) heeft na een economische analyse, in het kader van een NEDO project, de resultaten van NREL bevestigd voor kleinschalige (1 ton/dag) warmtekracht toepassingen. Het is kleinschalig omdat er volgens Matsumura in Japan maar maximaal 1 ton/dag geschikte voeding (per locatie) kan worden verzameld. Japan richt zich nu meer op de productie van chemicaliën en bio-methanol. Naast bovengenoemde partijen werken ook het Forschungszentrum in Karlsruhe en het Paul Scherrer Institute (PSI) in Zwitserland aan de SCWG technologie. PSI onderzoekt of de SCWG technologie geschikt is voor SNG productie, uit o.a. hout.

Conclusie is dat op basis van enkele Tee's sommige Instituten hun onderzoek (noodgedwongen) gestaakt hebben en dat anderen na herinterpretatie van deze Tee's de draad weer opgepakt hebben. De basis (aannames) van de reeds uitgevoerde Tee's zijn niet eenduidig en voor meerdere uitleg vatbaar, een sluitende conclusie omtrent de technisch economische haalbaarheid kan nog niet gegeven worden omdat de technologie-ontwikkeling nog niet in een ver genoeg stadium is).

#### *Technische aspecten*

In Twente staat een laboratoriumopstelling van 30 kg/hr en in het Forschungszentrum in Karlsruhe staat een opstelling van 100 kg/hr. Beide opstellingen draaien nog niet op biomassa, maar alleen op ideale voedingsstoffen zoals b.v. glycerol. Bij meer complexe voedingsstoffen zijn de knelpunten o.a.: het op druk brengen van de voeding en de vervuiling/corrosie aspecten van de

warmtewisselaar/reactor. Intensieve warmte-uitwisseling is essentieel en kritisch bij SCWG omdat de voeding al tijdens het opwarmen decompositie producten, zoals teer en koolstof, vormt. Een ander aspect is het reinigen van het productgas en grote hoeveelheden afvalwater. Ook de katalysator is een knelpunt. Om voedingen met een hoog droge stof gehalte ( 5 - 20%), bij een temperatuur van < 600°C, volledig om te zetten in een productgas met een hoog methaan gehalte, dient de vergassing te worden uitgevoerd met een katalysator. Deze katalysator is op dit moment nog niet beschikbaar. Concluderende kan gezegd worden dat de SCWG zich nog in een vroeg stadium van ontwikkeling bevindt en nog verre van commercialisatie is.

Op basis van de stand van zaken en technische onzekerheden in het proces kan niet anders geconcludeerd worden dat het nog te vroeg is voor het opzetten van een eerste demo-installatie. Naast een aanzienlijke investering en bijbehorend financieel risico bestaan er ook zeker nog de nodige technische risico's. De demo-installatie wordt dan al snel een onderzoeks- & ontwikkelingsinstallatie met beperkte flexibiliteit en elke wijziging zal zeer kostbaar en tijdrovend zijn. Op dit moment wordt de realisatie hiervan dan ook onverantwoord gevonden. Alle bovengenoemde aspecten/onzekerheden vereisen additioneel onderzoek en ontwikkeling op lab-/pilot schaal voor de komende jaren. Dit geldt ook voor de productie van chemicaliën. Deze aspecten/onzekerheden zullen geadresseerd worden in onderzoeksvoorstellen binnen het lange termijn EOS programma.

## 7.2 Aanbevelingen

Vanwege de (relatief) hoge investeringskosten van het SCWG proces, is het aan te bevelen om een technische economische vergelijking te maken van het SCWG proces met de traditionele routes voor de conversie van natte biomassa / reststromen, zoals vergisting en met thermochemische processen, geschikt voor relatief droge biomassa. Voor deze laatst genoemde processen dient wel een groot gedeelte van het water van de natte biomassa/reststromen verwijderd te worden door mechanisch drogen, door verschillende filtratie technieken, eventueel gevolgd door thermisch drogen, om tot het vereiste vochtgehalte voor verbranding (50 gew.%), of vergassing (10-15 gew.%) te komen.

## LITERATUUR

Adschiri, T., S. Hirose, R.M. Malaluan, K. Arai: *Noncatalytic Conversion of Cellulose in Supercritical and Subcritical Water*, Journal of Chemical Engineering of Japan, 26(6): 676-680, 1993

Amos, W.A.: *Assessment of supercritical water gasification, milestone report for the U.S. Department of Energy's Hydrogen Program*, National Renewable Energy Laboratory, 1999a

Amos, W.A.: *Assessment of supercritical water gasification: alternative design, milestone report for the U.S. Department of Energy's Hydrogen Program*, National Renewable Energy Laboratory, 1999b

Antal, M.J., H.L. Friedman, F.E. Rogers: *Kinetics of Cellulose Pyrolysis in Nitrogen and Steam*, Combust. Sci. Technol 21: 141, 1980

Antal, M.J., S. Manarungson, W.S. Mok: *Hydrogen Production by Steam Reforming Glucose in Supercritical Water*, Advances in Thermochemical Biomass Conversion. A.V. Bridgewater. London, Blackie Academic and Professional: 1367-1377, 1993

Antal, M.J., S.G. Allen, D. Schulman, X. Xu, R.J. Divilio: *Biomass Gasification in Supercritical Water*, Ind. Eng. Chem. Res. 39: 4040-4053, 2000

Antal, M.J., W.S. Mok: *A Study of the Acid Catalysed Dehydration of Fructose in Near-Critical Water*, Research in Thermochemical Biomass Conversion. A.V. Bridgewater and L.J. Kuester. New York, Elsevier: 464-472, 1988

Antal, M.J.: *A Review of the Vapor Phase Pyrolysis of Biomass Derived Volatile Matter*, Fundamentals of Thermochemical Biomass Conversion. L.K. T. A. M. Milne. New York, Elsevier Applied Science: 511, 1985b

Antal, M.J.: *Biomass Pyrolysis. Part 1: Carbohydrate Pyrolysis*, Solar Energy. J.A. K. W. D. Boer. New York, Plenum Press: 61, 1982

Antal, M.J.: *Biomass Pyrolysis. Part 2: Lignocellulose Pyrolysis*, Solar Energy. J.A. K. W. D. Boer. New York, Plenum Press: 175, 1985a

Antal, M.J.: *Energy from Biomass and Waste*, D.L. Class. Chicago: 495, 1978

Antal, M.J.: *The Effects of Reactor Severity on the Gas Phase Pyrolysis of Cellulose and Kraft Lignin Derived Volatile Matter*, Ind. Eng. Chem. Res. 22: 366, 1983a

Antal, M.J.: *The Effects of Reactor Severity on the Gas Phase Pyrolysis of Cellulose and Kraft Lignin Derived Volatile Matter*, Ind. Eng. Chem. Res. 22: 366-375, 1983b

Beld, L. van de, Hutten, R. van, Kokke, R.: *Productie van SNG/CNG via vergassing van natte biomassa in superkritiek water*. Novem-NEO project nr: 0268-03-04-02-010, April 2004b

Beld, L. van de, Penninger, J.: *Vergassing in superkritiek water: status en toekomstperspectief voor Nederland*. Novem-NEO project nr: 0268-03-07-01-0018, April 2004a

*Biogas technology and biogas use in Sweden; an overview*. Traffic & public transport authority city of Gothenburg, November 2000

Boukis, N., V. Diem, D. E., G. U., K. A.: *Advances with the process of biomass gasification in supercritical water*, 4th International Symposium on High Pressure Technology and Chemical Engineering, Venice, Italy, 2002

Bridgewater, A.V.: *The Technical and Economic Feasibility of Biomass Gasification for Power Generation*, Fuel 74: 631, 1995

Buhler, W., E. Dinjus, H.J. Ederer, A. Kruse, M. C.: *Ionic reactions and pyrolysis of glycerol as*

- competing reaction pathways in near- and supercritical water*, J. of Supercritical Fluids 22: 37, 2002
- Delgado, J., M.P. Aznar, J. Corella: *Biomass Gasification with Steam in Fluidised Bed: Effectiveness of CaO, MgO, and CaO-MgO for Hot Raw Gas Cleaning*, Ind. Eng. Chem. Res. 36: 1535, 1997
- Deurwaarder, E.P., Ree, R. van: *Biofuels for transportation; conventional and advanced alternatives within a Dutch perspective*. ECN-CX--03-099 (confidential), December 2003  
EC-project: JO-ST-3042
- Elliott, D.C., E.G. Baker, R.S. Butner, J. L. J. Sealock: *Bench-Scale Reactor Tests of Low-Temperature, Catalytic Gasification of Wet Industrial Wastes*, J. Solar Energy Eng. 115(1): 52-56, 1993b
- Elliott, D.C., G.G. Neuenschwander, M.R. Phelps, T.R. Hart, A.H. Zacher, L.J. Silva: *Chemical Processing in High-Pressure Aqueous Environment. 6. Demonstration of Catalytic Gasification for Chemical Manufacturing Wastewater Clean-up in Industrial Plants*, Ind. Eng. Chem. Res. 38: 879, 1999
- Elliott, D.C., J. L. J. Sealock, E.G. Baker: *Chemical Processing in High-Pressure Aqueous Environments. 2. Development of Catalysts for Gasification*, Ind. Eng. Chem. Res. 32(8): 1542-1548, 1993d
- Elliott, D.C., J. L. J. Sealock, E.G. Baker: *Method for the Catalytic Conversion of Organic Materials into a Product Gas*, U.S., 1997
- Elliott, D.C., J. L. J. Sealock: *Low Temperature Gasification of Biomass Under Pressure, Fundamentals of Thermochemical Biomass Conversion*. T.A.M. R. P. Overend, and L. K. Mudge. London, Elsevier Applied Science Publishers: 937-950, 1985
- Elliott, D.C., L.J. Sealock, B.E.G.: *Chemical Processing in High-Pressure Aqueous Environment: 2. Development of Catalyst for Gasification*, Ind.Eng.Chem.Res. 32: 1542, 1993a
- Elliott, D.C., L.J. Sealock, Jr., E.G. Baker: *Chemical Processing in High-Pressure Aqueous Environment. 3. Batch Reactor Process Development Experiments for Organics Destruction*, Ind. Eng. Chem. Res. 33: 558, 1994b
- Elliott, D.C., L.J. Sealock, M.R. Phelps, G.G. Neuenschwander, T.R. Hart: *Development of a Catalytic System for Gasification of Wet Biomass*, First Biomass Conference of the Americas: Energy, Environment, Agriculture, and Industry, Burlington, Vermont, U.S., 1993c
- Elliott, D.C., M.R. Phelps, L.J. Sealock, Jr., E.G. Baker: *Chemical Processing in High-Pressure Aqueous Environment. 4. Continuous-Flow Reactor Process Development Experiments for Organic Destruction*, Ind. Eng. Chem. Res. 33: 566, 1994a
- Elliott, D.C., T.A. Werpy, Y. Wang, J.G. Frye, Jr.: *Ruthenium on Rutile Catalyst, Catalytic System, and Method for Aqueous Phase Hydrogenations*, U.S., 2001
- Franch, E.U.: *Fluids at High Pressure and Temperature*, J.Chem.Thermodynamics 19: 225, 1987
- Garcia, A.N., X. Xu, M.J. Antal: *Carbon Catalysed Gasification of Organic Wastes in Supercritical Water*, The 4th Symposium on Supercritical Fluids, Senai, Japan, 1997
- Goudriaan, F., D.G.R. Peferoen: *Liquid Fuels from Biomass via a Hydrothermal Process*, Chem. Eng.Sci. 45: 2729, 1990
- Hao, X.H., L.J. Guo, X. Mao, X.M. Zhang, X.J. Chen: *Hydrogen Production from Glucose used as a Model Compound of Biomass Gasified in Supercritical Water*, International Journal of Hydrogen Energy 28: 55, 2003
- Herguido, J., J. Corella, J. Gonzalez-Saiz: *Steam Gasification of Lignocellulosic Residues in a Fluidised Bed at a Small Pilot Scale. Effect of the Type of Feedstock*, Ind. Eng. Chem. Res. 31:



1274, 1992

Holgate, H.R., J.C. Meyer, W.J. Tester: *Glucose Hydrolysis and Oxidation in Supercritical Water*, AIChE J. 41: 637-648, 1995

J.P. Van Hook, J.P.: *Methane-Steam Reforming*, Catal. Rev. -Sci. Eng 21: 1., 1980

Kabyemela, B.M., M. Takigawa, T. Adschiri, R.M. Malaluan, K. Arai: *Mechanism and Kinetics of Cellobiose Decomposition in Sub- and Supercritical Water*, Ind. Eng. Chem. Res. 37: 357-361, 1998

Kabyemela, B.M., T. Adschiri, R.M. Malaluan, K. Arai, H. Ohzeki: *Rapid and Selective Conversion of Glucose to Erythrose in Supercritical Water*, Ind. Eng. Chem. Res. 36: 5063, 1997

Kabyemela, B.M., T. Adschiri, R.M. Malaluan, K. Arai: *Glucose and Fructose Decomposition in Subcritical and Supercritical Water: Detailed Reaction Pathway, Mechanisms, and Kinetics*, Ind. Eng. Chem. Res. 38: 2888-2895, 1999

Kersten, S.R.A.: *Biomass Gasification in Circulating Fluidised Beds*, Enschede, University of Twente: 227, 2002

Kersten, S.R.A.: *Biomass gasification in sub and supercritical water: a review*. University of Twente, November 2003

Kruse, A., A. Gawlik: *Biomass Conversion in Water at 330-410 C and 30-50 MPa. Identification of Key Compounds for Indicating different Chemical Reaction Pathways*, Ind.Eng.Chem.Res. 42: 267, 2003b

Kruse, A., D. Meier, P. Rimbrecht, E. Schacht: *Gasification of Pyrocatechol in Supercritical Water in the Presence of Potassium Hydroxide*, Ind.Eng.Chem.Res. 39: 4842, 2000

Kruse, A., J. Abeln, E. Dinjus, M. Kluth, G. Petrich, M. Schacht, H. Sadri, H. Schmieder: *Gasification of Biomass and Model Compounds in Hot Compressed Water*, International Meeting of the GVC-Fachauschu "Hochdruckverfahrenstechnik", Karlsruhe, Germany, 1999

Kruse, A., T. Henningsen, A. Sinag, J. Pfeiffer: *Biomass Gasification in Supercritical Water: Influence of the Dry Matter Content and the formation of Phenols*, Ind.Eng.Chem.Res. 42: 3711-3717, 2003a

Kyle, B.G.: *Chemical and Process Thermodynamics*, New Jersey, Prentice Hall PTR, 1999

L.J. Sealock, L.J., Jr., D.C. Elliott: *Method for the Catalytic Conversion of Lignocellulosic Materials*, U.S., 1991

Lee, I. -G. L. Jae-Sung, M.-S. Kim: *Hydrogen production by the gasification of biomass in supercritical water*, 5th Korea-Japan Joint Symposium '99 on Hydrogen Energy, Yusong, Taejon, Korea, 1999

Lee, I., M.S. Kim, S.K. Ihm: *Gasification of Glucose in Supercritical Water*, Ind. Eng. Chem. Res. 41: 1182, 2002

Matsumura, Y., T. Minowa, B. Potic, S.R.A. Kersten, W. Prins, W.P.M. Van Swaaij, L. Van de Beld, D.C. Elliott, G.G. Neuenschwander, A. Kruse, J.M.L. Penninger, M.J. Antal: *Biomass Gasification in Near- and Supercritical Water: Status and Prospects*, in preparation

Matsumura, Y.: *Evaluation of supercritical water gasification and biomethanation for wet biomass utilization in Japan*. Energy Conversion and Management 43: 1301, 2002

MEZ (Ministerie van Economische Zaken): *Biomassa: de groene motor in transitie; stand van zaken na de tweede etappe*. Den Haag, December 2003

MEZ (Ministerie van Economische Zaken): *Derde energienota*. Den Haag, 1995

MEZ (Ministerie van Economische Zaken): *Duurzame energie in opmars, actieprogramma 1997-2000*. Den Haag, 1997

Modell, M.: *Gasification and Liquefaction of Forest Products in Supercritical Water, Fundamentals of Thermochemical Biomass*. T.A.M. R. P. M. Overend, L. K. London, Elsevier Applied Science Publishers, Ltd.: 95, 1985

Mozaffarian, M., Deurwaarder, E.P., Kersten, S.R.A. : “Green gas”(SNG) production by supercritical gasification of biomass.. Final report, ECN-C--04-081, ECN, Petten, The Netherlands, November 2004

Mozaffarian, M., Zwart, R.W.R.: *Feasibility of biomass/waste-related SNG production technologies*. Final report, ECN-C--03-066, ECN, Petten, The Netherlands, July 2003

Penninger, J.M.L., R.J.A. Kersten, H.C.L. Baur (1999). *Reactions of Diphenylether in Supercritical Water-Mechanism and Kinetics*, J. Supercritical Fluids 16: 119-132, 1999

Penninger, J.M.L.: *Reactions of Di-n-butylphthalate in Water at Near-critical Temperature and Pressure*, Fuel 67: 490, 1988

Potic, B., L. Van de Beld, D. Asink, W. Prins, W.P.M. Van Swaaij: *Gasification of Biomass in Supercritical Water*, 12th European Conference and Exhibition on Biomass for Energy, Industry and Climate Protection, Amsterdam, 2002

Potic, B., S.R.A. Kersten, W. Prins, W.P.M. Van Swaaij: *A High-throughput Screening Technique for Conversion in Hot Compressed Water*, submitted to Ind.Eng.Chem.Res

Reith, J.H., et al.: *Energieproductie uit algenresiduen na extractie van fijnchemicalien*. ECN-CX—04-0.16, ECN, Petten, The Netherlands, februari 2004.

Sakaki, T., M. Shibata, T. Miki, H. Hirose, N. Hayashi: *Reaction Model of Cellulose Decomposition in near-Critical Water and Fermentation of Product*, Bioresource Technology 58: 197-202, 1996

Savage, P.E.: *Organic Chemical Reactions in Supercritical water*, Chem. Rev. 99: 603, 1999

Sealock, L.J., Jr., D.C. Elliott, E.G. Baker, A.G. Fassbender, L.J. Silva: *Chemical Processing in High-Pressure Aqueous Environments. 5. New Processing Concepts*, Ind. Eng. Chem. Res. 35(11): 411-4118, 1996

Shaw, R.W., T.B. Brill, A.A. Clifford, E.U. Franch: *Supercritical Water- a Medium for Chemistry*, Chem. Eng. News 69: 26, 1991

Siemons, R.V.: *Biogas voor bijmenging in het aardgasnet, rapport aan het Team Nieuw Gas (23 juli 2003)*. In “Wegen naar Nieuw Gas: de eerste stap is een daalder waard”, Ministerie van Economische Zaken, december 2003

Sinag, A., A. Kruse, V. Schwarzkopf: *Key Compounds of the Hydrolysis of Glucose in Supercritical Water in the Presence of K<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>*, Ind. Eng. Chem. Res. 42: 3516-3521, 2003

UNFCCC, U.: *United Nations Framework Convention on Climate Change Secretariat (UNFCCC) and United Nations Development Programme (UNDP)*, 2002

Van Swaaij, W.P.M.: *Technical Feasibility of Biomass Gasification in a Fluidised Bed with Supercritical Water*, Enschede, University of Twente: 160, 2003

Vis, M.: *Beschikbaarheid van reststromen uit de voedings- en genotmiddelenindustrie voor energieproductie*. BTG bv, Novem project: 2020-01-23-03-0003, juli 2002

Vogel, F., M. Waldner: *Catalytic hydrothermal gasification of wood biomass at high feed concentrations*. Contribution to the “Science in Thermal and Chemical Biomass Conversion” Conference, Victoria, Vancouver Island, BC, Canada, 30 August – 2 September 2004.

Wagenaar, B.M., W. Prins, W.P.M. Van Swaaij: *Flash Pyrolysis Kinetics of Pine Wood*, Fuel Proc. Techn. 36: 291, 1994

Woods, D.R.: *Process Design and Engineering Practice*, New Jersey, PTR Prentice Hall, 1995

Xu, X., M.J. Antal, Jr.: *Gasification of Sewage Sludge and Organics in Supercritical Water*, AIChE Annual Meeting, 1997b

Xu, X., M.J. Antal, Jr.: *Gasification of Sewage Sludge and Other Biomass for Hydrogen Production in Supercritical Water*, *Environmental Progress* 17: 215, 1998

Xu, X., Y. Matsumura, J. Stenberg, M.J. Antal, Jr.: *Carbon-Catalysed Gasification of Organic Feedstocks in Supercritical Water*, *Ind. Eng. Chem. Res.* 35: 2522, 1996b

Xu, X., Y. Matsumura, J. Stenberg, M.J. Antal: *Carbon-Catalysed Gasification of Organic Feedstocks in Supercritical Water*, *Ind. Eng. Chem. Res.* 35: 2522-2530, 1996a