



Meer maatschappelijke waarde bij de Centrale Rotterdam

Waterstof, kunstmest en pulpproductie



CE Delft

Committed to the Environment

Meer maatschappelijke waarde bij de Centrale Rotterdam

Waterstof, kunstmest en pulpproductie

Dit rapport is geschreven door:
Harry Croezen, Frans Rooijers

Delft, CE Delft, juni 2018

Publicatienummer: 18.3N34.062

Energiecentrale / Conversietechnologie / Procestechnologie/ Waterstof / Kunstmest / Pulpproductie / Maatschappelijke factoren

Opdrachtgever: Engie

Alle openbare publicaties van CE Delft zijn verkrijgbaar via www.ce.nl

Meer informatie over de studie is te verkrijgen bij de projectleider Frans Rooijers (CE Delft)

© copyright, CE Delft, Delft

CE Delft

Committed to the Environment

CE Delft draagt met onafhankelijk onderzoek en advies bij aan een duurzame samenleving. Wij zijn toonaangevend op het gebied van energie, transport en grondstoffen. Met onze kennis van techniek, beleid en economie helpen we overheden, NGO's en bedrijven structurele veranderingen te realiseren. Al 40 jaar werken betrokken en kundige medewerkers bij CE Delft om dit waar te maken.



Inhoud

	Samenvatting	4
1	Inleiding	6
	1.1 Concept voor ENGIE Utility 2025	6
	1.2 Input	7
	1.3 Analyse	8
2	Vergassing voor waterstofproductie	9
	2.1 Verkende configuratie en ontwikkelingstraject	9
	2.2 Massa- en energiebalans	14
	2.3 Kosten	16
	2.4 Milieubelasting gerelateerde aspecten	18
3	HTC-proces	20
	3.1 Verkend concept	20
	3.2 Massa- en energiebalans	23
	3.3 Kosten	26
	3.4 Milieubelasting gerelateerde aspecten	27
4	Bioraffinage van niet-houtige biomassa met mierenzuur	28
	4.1 Inleiding, pulp uit stro?	28
	4.2 Verkende configuratie en ontwikkelingstraject	29
	4.3 Massabalans en energiegebruiken	30
	4.4 Kosten	31
	4.5 Milieubelasting gerelateerde aspecten	32
5	Arbaflame stoomexplosie voorbehandeling	33
	5.1 Essentie van het proces	33
	5.2 Verkende configuratie en ontwikkelingstraject	33
	5.3 Mogelijke verdere ontwikkelingen	35
	5.4 Massa- en energiebalans	36
	5.5 Kosten	36
	5.6 Milieubelasting gerelateerde aspecten	36
6	Een integraal concept	37
A	Bronnen	38
	A.1 Bronnen bij Hoofdstuk 2, vergassing en H ₂ -productie	38
	A.2 Literatuur bij Hoofdstuk 3, HTC-proces	39
	A.3 Literatuur bij Hoofdstuk 4, FormicoFib-proces	39
	A.4 Literatuur bij Hoofdstuk, Arbaflame proces	40
	A.5 Overige Literatuur	40



B	Arbaflame stoomexplosie	43
	B.1 Essentie van het stoomexplosieproces	43
	B.2 Indicatie van effect van procescondities	45
	B.3 Begroting voor een 200 ktpy-installatie	46
C	Terrein Centrale Rotterdam	49
D	Bibliografie	50



Samenvatting

ENGIE onderzoekt de mogelijkheid om op de Maasvlakte een nieuwe installatie te ontwikkelen: "ENGIE Utility 2025". Deze installatie moet in staat zijn diverse producten te leveren die maatschappelijk belangrijk zijn in de energietransitie. De basis voor deze installatie is de huidige kolencentrale. Delen van die installatie kunnen worden gebruikt in de nieuwe installatie.

ENGIE Utility 2025 is een installatie die rond 2025 operationeel kan zijn en die op basis van organische restproducten bio-chemicaliën, waterstof, warmte en elektriciteit kan leveren.



In deze studie zijn 4 processen onderzocht die invulling geven aan de algemene visie:

1. Waterstofproductie op basis van vergassing van RDF en meestoken van koolmonoxide-rijk restgas.
2. Hydrothermisch verkolen van RWZI-slib en meestoken van de hydrokolen.
3. Organosolv pulpen van stro voor papierpulpproductie en meestoken van de ligninerijke restfractie.
4. Stoomexplosievoorbehandeling van lage kwaliteit houtige biomassa met terugwinning van chemicaliën uit resterend proceswater.

Input

De input van de installatie bestaat uit duurzame organische reststromen. Het gaat om grote hoeveelheden. Reststromen die volledig voldoen aan de duurzaamheidseisen die gesteld zijn in het energieakkoord 1.0. Op dit moment zijn de volgende inputmaterialen verkend:

- RWZI-slib
- RDF
- Stro
- Lage kwaliteit houtige biomassa

Output

De installatie kent 2 hoofdproducten, bio-chemicaliën en piekelektriciteit, die beperkt gezamenlijk geleverd kunnen worden, en daarnaast nevenproducten die het hele jaar door geleverd kunnen worden (lage en hoge temperatuur warmte).

Bio-chemicaliën

Het grootste deel van het jaar zal de installatie bio-chemicaliën en warmte produceren, met een bedrijfstijd van circa 6000 u. De bio-chemicaliën sparen ten opzichte van fossiele chemicaliën circa @ Mton CO₂ uit.

Waterstof

Ten behoeve van derden wordt uit RDF waterstof geproduceerd en worden restgassen gebruikt in de Centrale Rotterdam.

Piekelektriciteit

Een kleiner deel van het jaar, als fluctuerende bronnen als zon en wind onvoldoende vermogen leveren zal de installatie elektriciteit produceren, 150 - 700 MW elektriciteit. De verwachting is dat als er vanaf 2025 veel zon en wind staat opgesteld er circa 1500 vollasturen per jaar behoefte is aan regelbaar vermogen. Dit concurreert met elektriciteit uit een aardgas-STEG waarvoor nu nog geen hernieuwbare opties zijn gepland. De Centrale Rotterdam levert hernieuwbare piekstroom. Dit spaart circa 0,4 Mton CO₂ uit.

Duurzame warmte/stoom

De duurzame warmte kan het hele jaar uit de installatie worden afgenomen, of deze nu bio-chemicaliën produceert of elektriciteit, die kan worden gevoed aan de toekomstige warmterotonde. Deze duurzame warmte spaart per GJ 45 kg CO₂ uit tov van aardgas CV (rekening houdend met een warmteverlies bij het transport en distributie van 20%). Bij elkaar 30 kton CO₂-reductie.

De eerste drie opties zijn in principe economisch rendabel te maken en leiden tot CO₂-reducties van meer dan 70% ten opzichte van de fossiele of conventionele referentie.

Met genoemd palet aan processen kan ongeveer 35 PJ/jaar aan brandstof voor de Centrale Rotterdam worden geleverd. Vanwege CO₂-verwijdering uit synthesesgas bij H₂-productie is er in principe 2 Mton/jaar beschikbaar voor CO₂-opslag.

Voor de conversieprocessen is aan de andere kant 1.1 TWh_e, 14 PJ lage druk stoom (ongeveer 160°C) en 3,0 PJ/jaar aan middendruk stoom (ongeveer 260°C) nodig. Gebruik van middendrukstoom is gerelateerd aan H₂-productie en hydrothermisch verkolen van RWZI-slib en betreft fataal gebruik (geen condensaat retour).

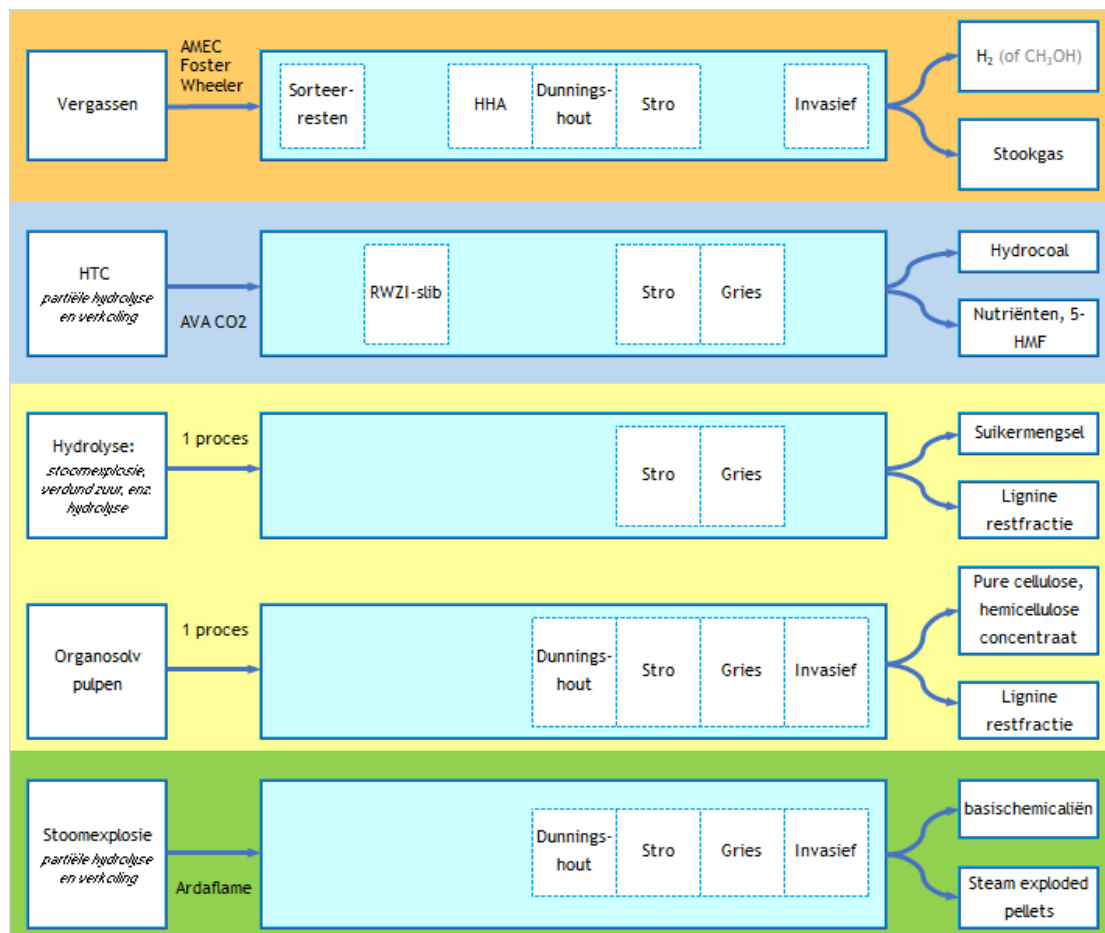
Er blijft 2 TWh over voor productie van elektriciteit voor het net. Eén en ander is hieronder geïllustreerd voor maximale elektriciteitsproductie.

Tabel 1 – Illustratie van warmteproductie en elektriciteitsproductie bij aangehouden combinatie van bioraffinageconcepten

	η _e netto	η _{th}	Bijstook- factor	MWmax.			Uur per jaar	TWh e	TWh th
				Biomassa	Elek.	Therm.			
Maximale elektriciteitsproductie	46%	0		1.633	750		589	0,4	0,0
Industriële stoom, condensaat 100% retour	33%	58%	22%	1.633	544	950	4.073	2,2	3,9
Industriële stoom, fataal stoom- gebruik	25%	47%	44%	1.633	410	768	1.133	0,5	0,9
Bruto								3,1	4,7
Eigen gebruik								1,1	4,7
Leverbaar aan extern								2,0	

De resultaten van deze verkenning zijn grafisch weergegeven in Figuur 1.

Figuur 1 – Schematische weergave van de voor verdere verkenning voorgestelde technologie-productcombinaties



1.2 Input

De input van de installatie bestaat uit duurzame organische reststromen zoals dunningshout, stro, rioolslib. Het gaat om grote hoeveelheden. Reststromen die volledig voldoen aan de duurzaamheidseisen die gesteld zijn in het energieakkoord 1.0.

In deze studie zijn 4 processen onderzocht die invulling geven aan de algemene visie:

1. Waterstofproductie op basis van vergassing van RDF en meestoken van koolmonoxide-rijk restgas.
2. Hydrothermisch verkolen van RWZI-slib en meestoken van de hydrokolen.
3. Organosolv pulpen van stro voor papierpulpproductie en meestoken van de ligninerijke restfractie.
4. Stoomexplosievoorbehandeling van lage kwaliteit houtige biomassa ten behoeve van verstoken in met terugwinning van chemicaliën uit resterend proceswater.

RDF

RDF is resthout dat nu in Frankrijk en UK wordt gestort. Voor de productie van 130 kton waterstof per jaar is 2900 kton RDF nodig.

RWZI-slib

Op dit moment wordt RWZI-slib gedroogd en verbrand op diverse locaties.

Voor de productie van X ton waterstof per jaar is 1200 kton RWZI-slib nodig. Dit is ongeveer de gehele Nederlandse hoeveelheid slib van alle RWZI's.

Stro

Voor de productie van 500 kton papierpulp per jaar is 1250 kton stro nodig. Dit zal afkomstig zijn uit Frankrijk, België en Nederland. Het is ongeveer de gehele Nederlandse hoeveelheid.

Lage kwaliteit houtige biomassa

Voor de productie van 50 kton/jaar aan furfural en ongeveer 40 kton/jaar aan azijnzuur is Xton houtige biomassa nodig.

1.3 Analyse

Onderdelen van de analyse zijn:

- globale inschatting van integratie met de Centrale Rotterdam;
- globale massabalans en energiebalans, inclusief consumptie aan stoom en andere hulpstoffen;
- globale inschatting van broeikasgasbalans en productie van reststromen;
- een globale bedrijfseconomische analyse voor grootschalige verwerking.

Ook is globaal ingeschat in hoeverre grootschalige verwerking zou passen op het terrein rond de Centrale Rotterdam.

De in de analyse gehanteerde chemische specificaties van de beschouwde reststromen en typen biomassa en overzichtsfoto's van de locatie en omringende percelen zijn opgenomen in verschillende bijlagen.

Voor een overzicht van andere uitgangspunten en specificaties per techniek wordt verwezen naar de navolgende hoofdstukken. In elk hoofdstuk is daarbij de volgende structuur aangehouden:

- korte beschrijving van de technologie;
- reflectie op beschikbare volumes, ruimtebeslag, wijze van integratie;
- globale massabalans en energiebalans, inclusief consumptie aan stoom en andere hulpstoffen;
- globale inschatting van emissies naar milieu en productie van reststromen;
- een globale bedrijfseconomische analyse voor grootschalige verwerking.

2 Vergassing voor waterstofproductie

2.1 Verkende configuratie en ontwikkelingstraject

Vergassing van RDF en houtige biomassa is één van de vier in deze verdiepende studie verkende routes voor aan de Centrale Rotterdam gekoppelde raffinage van biomassa en reststromen¹.

In de verkenning is uitgegaan van coproductie van waterstof en stookgas voor de Centrale Rotterdam:

- de centrale Rotterdam is gelokaliseerd in de directe nabijheid van een tweetal grootgebruikers van waterstof (Neste, BP) en waterstof kan in principe via het netwerk van Air Liquide ook aan andere afnemers worden geleverd;
- door waterstof uit gereinigd synthesesgas af te scheiden wordt verlies aan energie in conversieprocessen geminimaliseerd en kan de energie-inhoud van de brandstof maximaal worden benut.

Alternatieve toepassingen voor synthesesgas zouden met name gebruik als grondstof voor methanol, SNG of Fischer Tropsch producten kunnen zijn. In deze toepassingen gaat echter een significant deel (20% voor SNG-productie tot 50% voor Fischer Tropsch) van de energie-inhoud van het geproduceerd synthesesgas verloren, waardoor navenant minder aan externe partijen leverbare chemische producten overblijven. Ook is de resterende hoeveelheid stookgas voor de Centrale Rotterdam relatief beperkt.

Bovendien vergt de conversie een significante extra investering, terwijl de marktwaarde voor methanol en SNG/aardgas eigenlijk vergelijkbaar is met die van waterstof.

De voorgestelde en verkende configuratie is vergelijkbaar met die van vergassingsinstallaties voor atmosferisch of vacuümresidu bij raffinaderijen, waarbij een combinatie van waterstof en stookgas wordt geproduceerd, bijvoorbeeld bij de Petronor raffinaderij in Bilbao en de ISAB Energy S.r.l.-installatie op Sicilië. Bij beide installaties wordt het stookgas overigens ingezet in gasturbines.

2.1.1 Een gefaseerde ontwikkeling

In deze verkennende studie is uitgegaan van een gefaseerde ontwikkeling van vergassing, geïntegreerd met de Centrale Rotterdam.

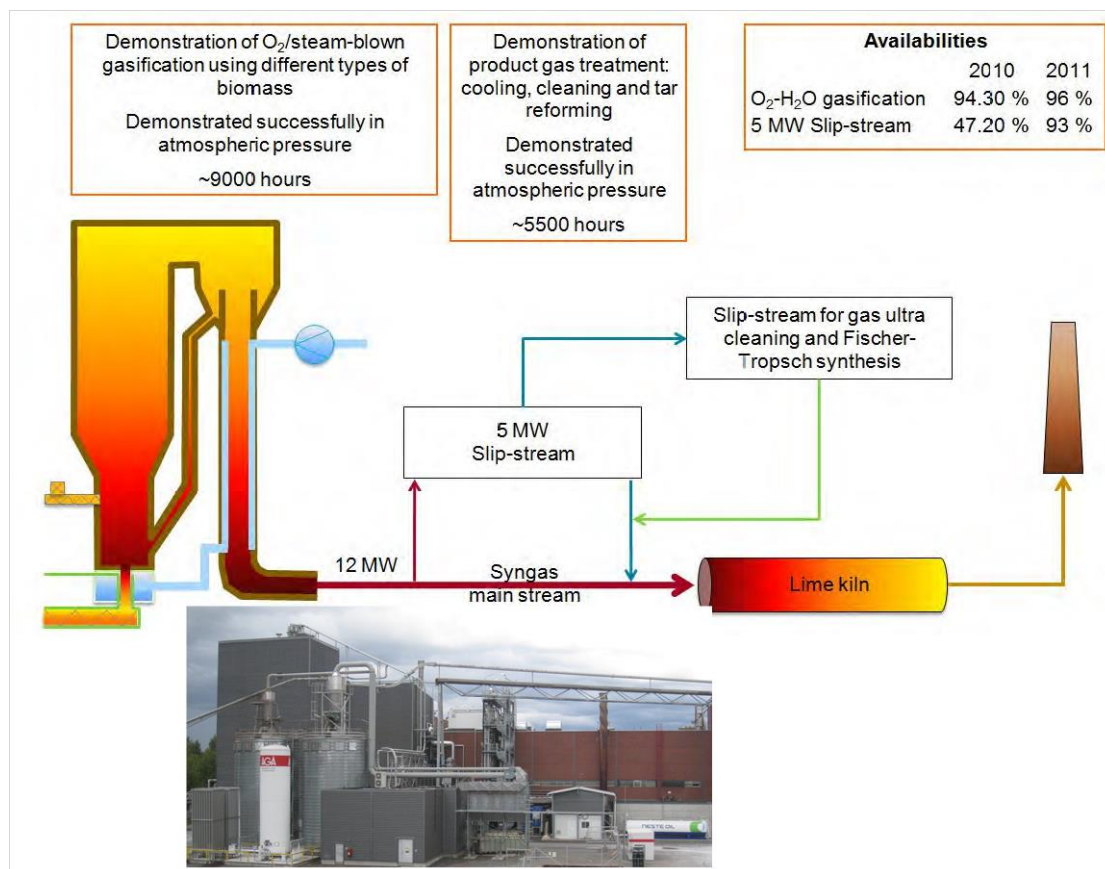
In eerste instantie wordt aan de Centrale Rotterdam een vergassingsinstallatie toegevoegd als voorbereidingsproces voor brandstoffen die niet direct in de Centrale Rotterdam kunnen worden verbrand.

De voorbereidingsinstallatie wordt vervolgens omgebouwd tot een raffinageproces waarbij uit de brandstoffen waardevolle producten worden afgescheiden voordat het resterende materiaal in de Centrale Rotterdam wordt verbrand. Conform de beoogde integratie van de Centrale Rotterdam als utiliteitencentrum wordt in de raffinage stoom gebruikt.

Bovenbeschreven ontwikkeling van een vergassingsinstallatie is door Foster Wheeler gedemonstreerd in Varkaus, Finland. In het demonstratieproject is een 12 MW vergasser geplaatst bij een cementoven voor productie van stookgas op basis van vergassing van resthout met lucht.

¹ In een eerdere studie is aangegeven dat stro en gries in principe ook voor vergassing geschikt zouden zijn. Deze stromen blijken bij nader inzien vanwege hun hoge gehalte aan alkalizouten en chloor en vanwege het lage smeltpunt van de as geen geschikte brandstof.

Figuur 2 – Indruk van opzet en omvang van het demonstratieproject in Varkaus, Finland



Bron: Palonen, 2012.

Nadat de installatie had bewezen goed te functioneren is van lucht als vergassingsmedium overgeschakeld op een mengsel van zuurstof en stoom waarna in een derde ontwikkelingsstap een gasreiniging met nageschakelde Fischer Tropsch-proces werd bijgeplaatst. Hierin werd een deel van het geproduceerde ruwe synthesegas uit de vergasser als zijstroom opgewerkt en in koolwaterstoffen omgezet.

2.1.2 De beschouwde eindconfiguratie

De veronderstelde eindconfiguratie van de bij de Centrale Rotterdam te realiseren vergassingsinstallatie omvat volgende onderdelen:

A. Initiële vergassingsinstallatie:

1. In een voorbereidingsinstallatie wordt aangevoerde brandstof voorverkleind en vervolgens in een banddroger gedroogd tot < 20 gew% aanhangend vocht.
2. De gedroogde brandstof wordt vervolgens bij 850°C-900°C in een circulerende wervelbed vergasser van Foster Wheeler (of eventueel Valmet) vergast. In eerste instantie met lucht, bij vergassing met het oog op coproductie van waterstof met een mengsel van zuurstof en door de Centrale Rotterdam geleverde stoom.
3. Aan het bedmateriaal in de vergasser is kalksteen toegevoegd voor invangen van zwavel in de assen en binden van chloride (Kaasalainen, et al., 2018).
4. In cyclonen wordt meegevoerd stof grotendeels uit het synthesegas afgescheiden.

5. Synthesegas wordt door middel van quenchen met water afgekoeld tot 450°C-400°C. De aanwezigheid van chloor geeft waarschijnlijk een onverantwoord hoog risico op hoge temperatuur corrosie in geval van warmteterugwinning.
 6. Voor additionele chloorverwijdering uit synthesegas kan een natriumhoudende commerciële verbinding als Bicar of een commercieel verhandeld natuurlijk natriumhoudend mineraal als Trona, Nahcoliet of Dawsoniet in het synthesegas geïnjecteerd.
 7. Het gedeeltelijk afgekoelde synthesegas met absorbens wordt in een keramisch filter ontstoft met een rendement >99%. Hierbij worden alkalizouten, de meeste zware metalen en chloor vrijwel volledig afgescheiden².
- B. In een later stadium toe te voegen componenten:
8. Teer wordt verwijderd in een wassysteem gebaseerd op olie. Gedacht kan worden aan het OLGA-systeem van Royal Dahlmann, dat synthesegas met een temperatuur van 450°C kan accepteren en ook resterend fijnstof verwijdert. Alternatieve systemen worden onder andere aangeboden door Envitech en zijn bijvoorbeeld gebaseerd op RME als wasvloeistof.
 9. Mogelijk kan teerverwijdering op termijn worden gecombineerd met een systeem voor terugwinning van BTX, zoals aangeboden wordt door Royal Dahlmann.
 10. Van teer gereinigd synthesegas wordt in een aantal nageschakelde wassers (of W-ESP) met water en loeloplossing verder afgekoeld en gereinigd³.
 11. CO₂ wordt verwijderd met MDEA en wordt eventueel permanent geologisch opgeslagen. Waterdamp wordt grotendeels middels condensatie (en compressie) verwijderd.
 12. Het overblijvende gas (± 60 vol% H₂) wordt gecompriëerd en middels een PSA⁴-installatie gescheiden in H₂ van commerciële kwaliteit en in overblijvend gas.
 13. Het overblijvend gas (hoofdzakelijk CO, CH₄, N₂) wordt verbrand in de Centrale Rotterdam.

Afgescheiden waterstof kan via een nieuw aan te leggen pijpleiding aan BP en Neste worden geleverd en/of op het Air Liquide netwerk (100 bar, 99,99% zuiverheid)⁵ worden geïnjecteerd. In deze verkenning is uitgegaan van aanleg van een nieuwe leiding van 8 km⁶ naar Neste en levering aan Neste op een druk van 35 bar⁷.

Resterend gasmengsel kan eventueel – bijvoorbeeld voor pieklust productie – in een gasturbine worden ingezet voor maximale elektriciteitsproductie.

In de verkenning is aangenomen dat voor productie van waterstof benodigde zuurstof wordt geproduceerd middels cryogene luchtscheiding. Een alternatieve optie is doortrekken van de tot BP lopende zuurstofleiding naar de Centrale Rotterdam.

² Valmet geeft in een recente presentatie (Isaksson, 2017) aan dat één van de bij Kymijärvi II geleerde lessen is dat de betrouwbaarheid in een volgende installatie wordt verhoogd door een 'double hot gas filter concept'. Aan de andere kant blijkt de filtratie zo goed te werken dat in een volgende installatie stoomherverhitting zal worden toegepast.

³ In plaats van wassers zouden ook actieve kool filters kunnen worden gebruikt, zoals bij Eastman Chemicals in Kingsport, VS.

⁴ PSA = Pressure Swing Adsorption, een technologie waarbij gasstromen worden gescheiden door selectieve adsorptie aan een bed van vast materiaal bij verhoogde druk en het regenereren van het bedmateriaal door drukverlaging.

⁵ Vanwege de bij hydrogenatie gebruikte katalysatoren moet het waterstofgas < 1 ppm CO bevatten.

⁶ De afstand van Centrale Rotterdam naar BP bedraagt – via Neste – ongeveer 12 km. Eventueel zouden ook leidingen voor waterstof en zuurstof onder het Beergat door worden gelegd.

⁷ Het drukniveau is overgenomen uit (Zubair, et al., 2017) en heeft betrekking op levering aan BP. Waarschijnlijk moet voor levering aan Neste een nog iets hoger drukniveau worden aangehouden van 40-50 bar, gezien de procescondities van het NexBTL-proces waarin waterstof wordt geconsumeerd.



2.1.3 Ontwikkeling van de configuratie in de tijd

In het voorgestelde concept wordt in eerste instantie een installatie gerealiseerd die bestaat uit de onder nummers 1/6 genoemde deelprocessen. De configuratie kan houtige biomassa en RDF vergassen met lucht als vergassingsmedium. Laagcalorisch heet stookgas ($\pm 400^\circ\text{C}$) wordt vervolgens in de Centrale Rotterdam verbrand via daarvoor ontworpen ultra low- NO_x branders van bijvoorbeeld Saacke.

Zoals vermeld in voorgaande rapportages is een $2 \times 80 \text{ MW}_{\text{brandstof}}$ Valmet RDF-vergasser - Kymijärvi II - met een dergelijke configuratie voor Lahti Energy's gerealiseerd en sinds 2012 operationeel. Voor een indruk van de schaalgrootte en volumes zijn in Figuur 3 enkele afbeeldingen ingevoegd van een gasleiding (OKI, Indonesië) en brander (Äänekoski, Finland) voor stookgas uit vergassing met lucht.

Figuur 3 – Leiding (110 MW) en brander (87 MW) voor heet laagcalorisch stookgas



Bron: (Isaksson, 2017).

In tweede instantie wordt overgeschakeld op gebruik van zuurstof en stoom als vergassingsmiddelen. Daarvoor zal wel een zuurstofleiding moeten worden aangelegd vanaf BP of moet een lucht-scheidingsinstallatie worden gerealiseerd. De mogelijkheid van het overschakelen van lucht als vergassingsmedium op een mengsel van stoom en zuurstof is als eerder aangegeven in principe bewezen tijdens het in 20 in Varkaus uitgevoerde demonstratieproject.

Tot slot worden teerverwijdering, verder synthesesegasreiniging, CO_2 -verwijdering en afscheiding van waterstof geïmplementeerd.

CO_2 -verwijdering bij lage druk met MDEA en afscheiding van H_2 met PSA zijn bewezen commerciële technologieën. Ook gebruik van koolmonoxidierijk gas in gasmotoren⁸ of gasturbines⁹ zijn commercieel gangbaar bij bijvoorbeeld staalproductie.

De OLGA-technologie en vergelijkbare teerverwijderingstechnieken zijn alleen nog op een schaal van enkele MW toegepast. Een op grotere vermogens toegepaste en bewezen optie is een thermisch kraakproces, zoals toegepast in het Enkern-concept.

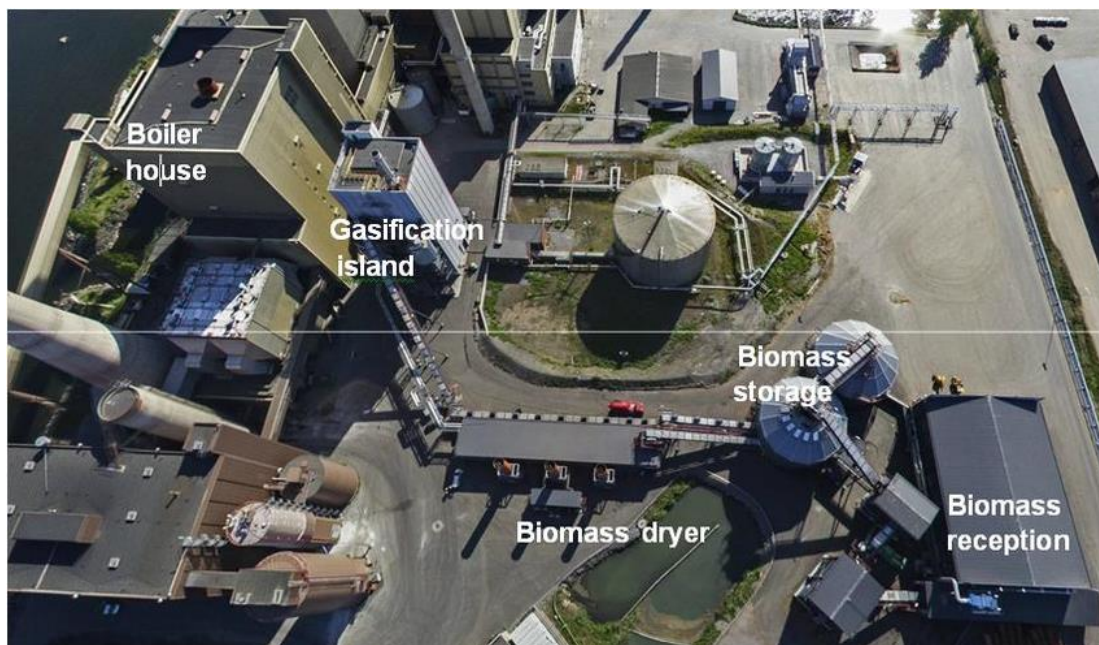
2.1.4 Inpasbaarheid op locatie

Een indruk van de inpasbaarheid van een vergassingsinstallatie op de locatie van de Centrale Rotterdam wordt gegeven door de volgende foto van de Valmet 140-160 $\text{MW}_{\text{brandstof}}$ Vaasa vergassingsinstallatie (Figuur 4).

⁸ Zie bijvoorbeeld: (GE Energy, 2008), (MWM, 2017) (MWM, sd).

⁹ (Siemens Industrial Turbomachinery, 2008), (100 ACRE FILMS, 2012).

**Figuur 4 – Indicatie van de dimensionering van een 140-160 MW brandstof vergassingsinstallatie met biomassa
voorbewerking**



Bron: (Bolhar-Nordenkamp, J. Isaksson, 2016).

De voetafdrukken van de verschillende onderdelen zijn ongeveer:

- ontvangsthal 40 x 25 meter;
- twee silo's diameter 30 meter;
- banddroger 40 x 15 meter;
- vergasser 20 x 20 meter, Lahti (Kymijärvi II, 2 x 80 MW) 2 eenheden van 20 x 20 meter, direct naast elkaar geplaatst;
- voor Kymijärvi II, keramisch filter (80 MW) 40 x 12,5 meter.

Met oog op het beperken van risico's gerelateerd aan synthesesgas zal de vergasser waarschijnlijk zo dicht mogelijk bij de vuurhaard van de Centrale Rotterdam worden geplaatst, zoals in Vaasa en Lahti. Dit beperkt de mogelijkheden voor plaatsing feitelijk tot de parkeerplaats voor de Centrale Rotterdam en Missouriweg. Bij plaatsing van meerdere vergassingseenheden kunnen de vergassers en keramische filters direct tegen elkaar aan worden geplaatst, zoals in Lahti bij de Kymijärvi II-installatie is gedaan.

Tijdens de uitbouw van het concept van stookgasproductie naar waterstofproductie zullen de temperatuur en volume van het gas drastisch wijzigen – van een heet (400°C), laagcalorisch gas naar een koud- en middencalorisch gas. Het is niet duidelijk of beide gasstromen met dezelfde leidingen en branders kunnen worden getransporteerd en verbrand.

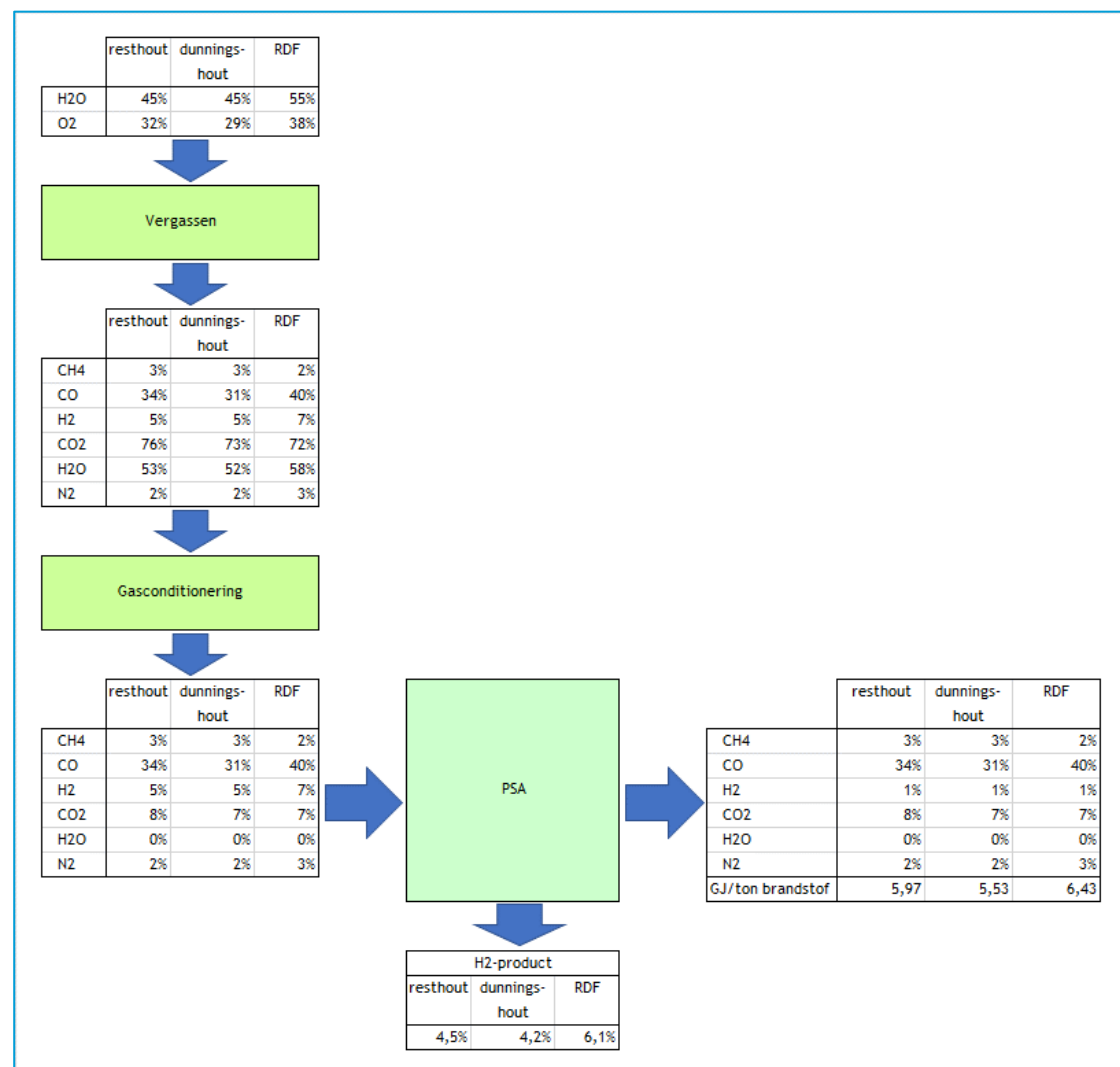
2.2 Massa- en energiebalans

Gehanteerd concept

De massabalans en energiebalans zijn opgezet aan de hand van een sterk vereenvoudigde benadering. In de benadering is conform (A.K. Sharma, sd) en andere bronnen aangenomen dat het vergassingsproces in meerdere stappen verloopt:

- er vindt eerst ontgassing/pyrolyse van de te vergassen brandstof plaats, waarbij verkoold materiaal (char), teer en permanente gassen (CH_4 , CO , CO_2 , H_2 , H_2O) worden gevormd;
- in de tweede stap wordt char verbrand door reactie met het als vergassingsmedium ingevoerde mengsel van stoom en zuurstof;
- de verbrandingsproducten (CO_2 , H_2O) reageren met CO en H_2 tot een evenwicht tussen deze gascomponenten is bereikt.

Figuur 5 – Globale massabalans voor vergassing en waterstofproductie (alle percentages in gew% t.o.v. 1 kg brandstof)



Methaan uit ontgassing lijkt grotendeels niet te reageren in de vergassingsreacties, waardoor de methaanconcentratie in het productgas hoger is dan zou worden verwacht op basis van thermodynamische evenwichtsliggingen (zie bijvoorbeeld Rofouie, et al., 2014).

Aangehouden vergassingsparameters en resulterende synthesesgas samenstelling

Voor vergassing is op basis van praktijkwaarden voor het demonstratieproject in Varkaus en de commerciële vergassingsinstallatie voor RDF in Lahti uitgegaan van een vergassingstemperatuur – na bereiken van evenwichtssituatie – van 880°C. Voor voorafgaande pyrolyse is uitgegaan van een temperatuur van 500°C.

Er is een koolstof omzettingsrendement van 99% aangehouden.

Als compromis tussen totaal energetisch rendement en opbrengst aan waterstof is steeds uitgegaan van een O₂ - H₂O-mengsel met ongeveer 40 gew% O₂ (zie ook L. Mancuso, 2015).

Bij deze aangehouden samenstelling voor het vergassingsmedium bedraagt het koudgas rendement steeds ongeveer 75%, waarvan 40-45% in de vorm van waterstof.

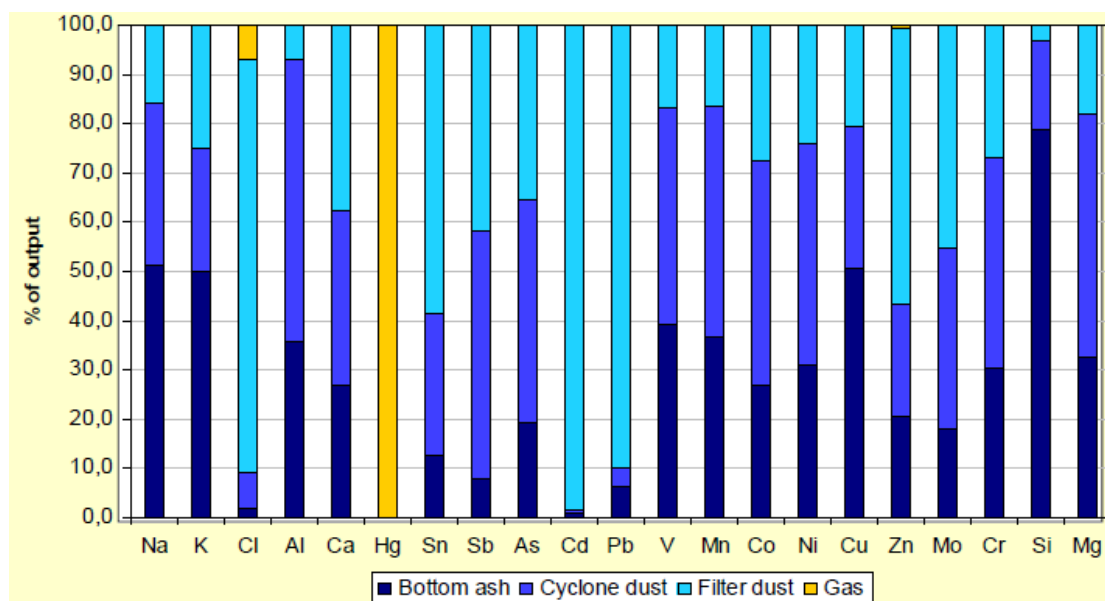
Resulterende samenstellingen voor ruw gas, waterstofproductstroom en stookgas zijn gegeven in Figuur 5.

Vracht van milieubelastende componenten

De vracht aan milieuverontreinigende stoffen zou bij productie van heet stookgas beperkt moeten zijn. Volgens door Valmet gepresenteerde informatie over het functioneren van het keramisch filter van de Kymijärvi II-installatie worden bij afvang van vaste en gecondenseerde stofdeeltjes in het keramisch filter zware metalen vrijwel volledig uit het stookgas verwijderd. Dit zou ook gelden voor vluchtige metalen als As, Cd, Pb, Sb en Zn.

Alleen kwik, ongeveer 5% van de in de brandstof aanwezige chloor en een zeer klein percentage van zink zouden in synthesesgas worden meegevoerd.

Figuur 6 – Verdeling van elementen over bodemas, cycloonas en filteras van keramisch filter bij de RDF-vergassingsinstallatie Kymijärvi II in Lahti



Vergeleken met de specificatie-eisen voor chemische samenstelling bevat RDF feitelijk teveel kwik. Omdat kwik niet wordt afgevangen in het keramisch filter zou RDF feitelijk niet kunnen worden gebruikt als brandstof voor de vergasser in de periode dat stookgas wordt geproduceerd.

Bij een uitbreiding van het vergassingsconcept met teerverwijdering, verdere gasreiniging en waterstofproductie zal kwik ook worden afgevangen en is inzet van RDF wel mogelijk zonder onacceptabel hoge kwikemissie.

2.3 Kosten

Voor een verkennende kostenevaluatie is uitgegaan van een vergasser met een schaalgrootte van 160 MW_{brandstof}. De aangehouden schaalgrootte is gebaseerd op de schaalgrootte van een aantal recent door Valmet gerealiseerde vergassingsinstallaties voor RDF (2 x 80 MW) en biomassa reststromen (90 MW, 2 x 110 MW, 140-160 MW). Mogelijk dat een technologieleverancier als Foster Wheeler vergassingsinstallaties met een groter vermogen kan leveren.

2.3.1 Investeringskosten

De investering voor een 160 MW_{brandstof} vergassingsinstallatie voor productie van waterstof en stookgas bedragen naar schatting M€ 190, inclusief investeringen in voor waterstoflevering benodigde compressor en pijpleiding.

Tabel 2 – Schatting van investeringskosten voor H₂-productie via vergassing

	Resthout	Dunningshout	RDF
Vergasser + biomassaopslag + droger + keramisch filter	88	88	88
ASU	30	30	30
OLGA	9	9	9
S- en Cl-verwijdering	15	16	15
MDEA-wasser	17	17	15
Compressor	11	11	11
PSA	15	15	16
H ₂ compressor	2	2	3
Bebuizing voor H ₂ -levering	3	3	3
	190	191	190

Bronnen: Zie voetnoot 10 en tekst.

Investeringskosten voor vergasser, biomassa voorbehandeling en keramisch filter zijn gebaseerd op de investeringen voor de Kymijarvi II (2 x 80 MW, M€ 160) en de Vaasa (140-160 MW, M€ 40) vergassingsinstallaties (Isaksson, J. 2017).

De investeringen voor de Vaasa vergassingsinstallatie omvatten ook investeringen in opslag van aangevoerde en gedroogde biomassa en investeringen voor banddroger en integratie van vergassingsinstallatie met de kolencentrale waaraan het door de vergasser geproduceerde stookgas wordt geleverd.

De investeringen voor de Kymijarvi II-vergassingsinstallatie omvatten naast opslag voor biomassa, drogers, vergassers en keramische filters ook een HD-stoomketel met nageschakelde DeNO_x en doekenfilter met absorbensinjectie. In (JRC, 2016) wordt genoemd dat een met Kymijarvi II vergelijkbare installatie bij integratie met een bestaande energiecentrale – dus zonder stoomketel en rookgasreiniging – een investering van naar schatting M€ 72-M€ 104 vergt.

De overige kostenposten zijn geschat aan de hand van gegevens uit bureaustudies¹⁰.

Met name de investeringsschatting voor de PSA is zeer indicatief vanwege gebruik van een oudere bron. Er zijn helaas geen recentere en meer representatievere data gevonden in de bestudeerde bronnen.

Voor isolatie van een hoogzuivere stroom waterstof is uitgegaan van een investeringsindicatie voor een standaard PSA-installatie. Mogelijk kunnen de investeringskosten worden geoptimaliseerd door gebruik van een nieuw, goedkoper en compacter PSA-concept, Rapid Cycle PSA (RCPSA) van ExxonMobil en Xebec (XEBEC, sd).

Figuur 7 – Illustratie compactheid RCPSA concept



Bron: Hydrocarbon Processing' Refinery Processes 2006 handboek.

2.3.2 Jaarlijkse kosten

Een inschatting van de jaarlijkse kosten is gegeven in Tabel 3.

De operationele kosten zijn verondersteld ook kosten voor afvoer van reststoffen en inkoop van chemicaliën te dekken.

Voor kosten gerelateerd aan gedeelde inkomsten uit afzet van elektriciteit is uitgegaan van een elektriciteitsprijs van € 28/MWh_e, conform de correctiebedragen aangehouden in de SDE+ 2017-regeling. Uitgespaarde inkoopkosten voor steenkool zijn geschat uitgaande van een door Engie aangehouden prijsniveau van € 3/GJ.

Kapitaallasten en operationele kosten zijn geschat als respectievelijk 12% en 4% van de investeringskosten. De inkomsten uit afzet van H₂ is voor een situatie met hoge referentieprijs voor H₂ uit aardgas geschat uitgaande van de in Zubair, et al., (2017) genoemde prijs van € 2/kg H₂ en voor een lage referentieprijs op € 7,5/GJ.

¹⁰ Dit betreft: (Hamelinck, 2004) voor PSA, (IEAGHG, 2017) voor MDEA-wasser (DOE/NETL, 2015) voor ASU, (ECN, 2006) voor OLGA teerverwijderingsproces en Cl- en S-verwijdering, (Müller-Langer, 2011) voor H₂-compressie en (Zubair, et al., 2017) voor H₂-pijpleiding.

Tabel 3 – Opbouw jaarlijkse kosten

	Hoge H ₂ -prijs			Lage H ₂ -prijs		
	Resthout	Dunningshout	RDF	Resthout	Dunningshout	RDF
Investering, M€	190	191	190			
CAPEX	23	23	23	23	23	23
OPEX	8	8	8	8	8	8
Gederfde inkomsten elektriciteit	4	4	4	4	4	4
Uitgespaarde inkoop steenkool	-5	-5	-5	-5	-5	-5
Inkoop brandstof	-7	18	-8	-7	18	-8
Inkomst uit H ₂ -afzet	-27	-27	-32	-12	-12	-14
	-5	20	-11	10	35	7

De voor een lage referentieprijs aangehouden waarde is gebaseerd op een interview met Air Liquide, waarin werd aangegeven dat Air Liquide voor levering van H₂ door andere partijen aan het Air Liquide-pijpleidingnetwerk aanhoudt van 10-20% boven de marktwaaarde van aardgas. Deze prijsstelling is lager dan de productiekosten voor waterstof uit aardgas (rendement 75%) en vertegenwoordigt in feite een situatie waarin Air Liquide een monopolypositie heeft. Er is een aardgasprijs van € 6,5/GJ aangehouden.

Voor brandstof is uitgegaan van de volgende geschatte prijzen bij aflevering aan de poort bij Centrale Rotterdam:

- resthout/B-hout: - € 20/ton, conform de huidige prijzen voor B-hout (Mühlenhoff, et al., 2017).
- dunningshout: € 50/ton – conform de in de SDE+-regeling aangehoudenprijs voor houtsnippers;
- RDF: - € 30/ton.

De prijs voor RDF is afgeleid uit de gemiddelde poortprijs voor AVI's in Frankrijk en Verenigd Koninkrijk (ongeveer - € 80/ton) en anderzijds de productiekosten voor RDF en kosten voor transport naar Nederland (€ 30-€ 60 per ton).

2.3.3 Conclusie

Productie van waterstof en stookgas is mogelijk economisch rendabel mits materiaal met een negatieve poortprijs kan worden gecontracteerd en mits de geproduceerde waterstof tegen een voldoende hoge prijs direct bij afnemers kan worden afgezet.

2.4 Milieubelasting gerelateerde aspecten

Broeikasgasbalans voor waterstofproductie

Een globale inschatting van de per jaar realiseerbare bruto CO₂-reductie bij waterstofproductie uit reststromen is gegeven in Tabel 4.

De gegeven bruto waarden zijn voor dunningshout min of meer gelijk aan de netto CO₂-reductie. Bij RDF uit afval dat anders in Frankrijk of Verenigd Koninkrijk zou zijn gestort zal de netto CO₂-reductie hoger zijn omdat methaanemissies uit de stort worden vermeden. Resthout wordt momenteel al gebruikt als brandstof in bio-energiecentrales of – mits van voldoende hoge kwaliteit – als grondstof voor spaanplaat. De netto broeikasgasemissiereductie zal bij deze brandstof lager zijn.

Tabel 4 – Bruto uitgespaarde en eventueel via CCS te verwijderen CO₂-emissies

	Resthout	Dunningshout	RDF
H ₂ -productie, PJ/jaar	1,6	1,6	1,9
Mton CO ₂ /GJ H ₂ bij referentie	0,2	0,2	0,2
Bij CCS verwijderde CO ₂ , Mton/jaar	0,2	0,3	0,2
Totaal potentiële bruto CO ₂ -reductie, Mton/jaar	0,4	0,4	0,4

Productie van reststoffen en emissies

De emissies zullen bij inzet van stookgas gezien de ervaringen met inzet van dit type brandstof lager liggen als bij steenkoolstook:

- in Lahti wordt bij de Kymijärvi II-installatie vastgesteld dat concentraties van fijnstof beneden de detectielimiet liggen;
- NO_x-emissies kunnen bij inzet van laagcalorisch en middencalorisch synthesesgas door inzet van een 'multi-stage'-brander in principe beneden de concentratiegrens van 70 mg/Nm³ (3 vol% O₂) worden gehouden¹¹;
- chloor en zwavel worden vergaand verwijderd in vergasser en keramisch filter, nog voordat het stookgas als brandstof wordt benut en de gevormde rookgassen in de rookgasreiniging van de Centrale Rotterdam worden behandeld.

De enige probleemstof bij productie en inzet van stookgas lijkt kwik, dat ongehinderd met het stookgas in de ketel van de Centrale Rotterdam wordt ingevoerd.

Bij waterstofproductie zal de belading van het na waterstofafscheiding overblijvende stookgas aanzienlijk lager zijn door de geïmplementeerde additionele gasreiniging.

¹¹ Zie bijvoorbeeld: (STORK, sd).

3 HTC-proces

3.1 Verkend concept

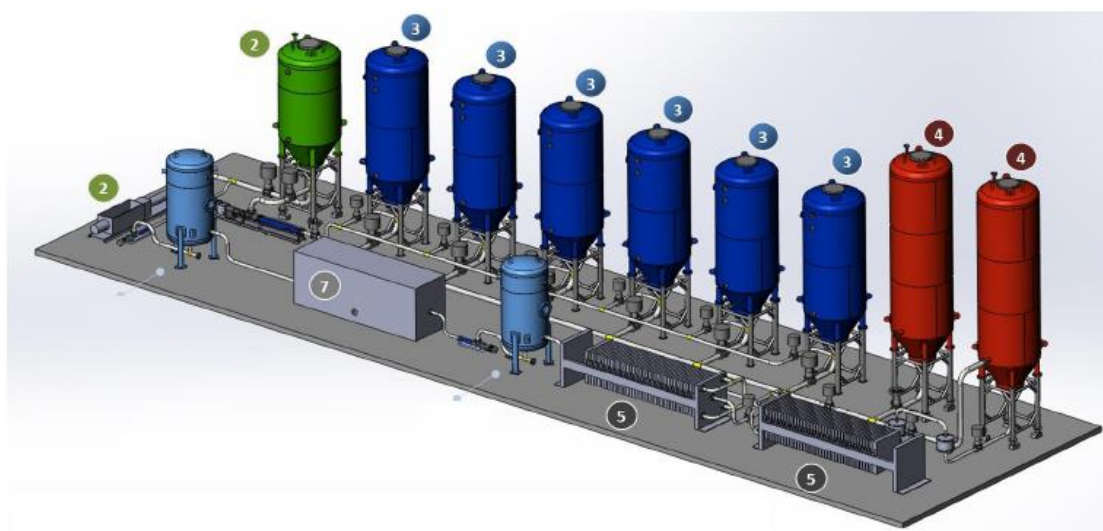
In deze verkennende studie is vanwege de inzet van stoom als warmtedragend medium¹² en de grotere beschikbaarheid van informatie uitgegaan van de door AVA CO2 aangeboden technologie.

In deze technologie wordt ligninearme biomassa chargegewijs verkoold door hydrolyse en navolgende chemische reacties bij een druk van 15-25 bar en een temperatuur 200-250°C.

3.1.1 Installatie en procesvoering

De installatie is opgebouwd uit een aantal naast elkaar geplaatste reactoren met één daarvoor geplaatst mengvat voor mengen van biomassa met water en met twee na de reactoren geplaatste flashtanks voor het afdrukken van druk en stoom.

Figuur 8 – Opbouw van een HTC-module zoals aangeboden door AVA CO2



Toelichting:

2: Mengvat

4: Flashtanks

5: Filterkamerpersen

3: Reactorvaten

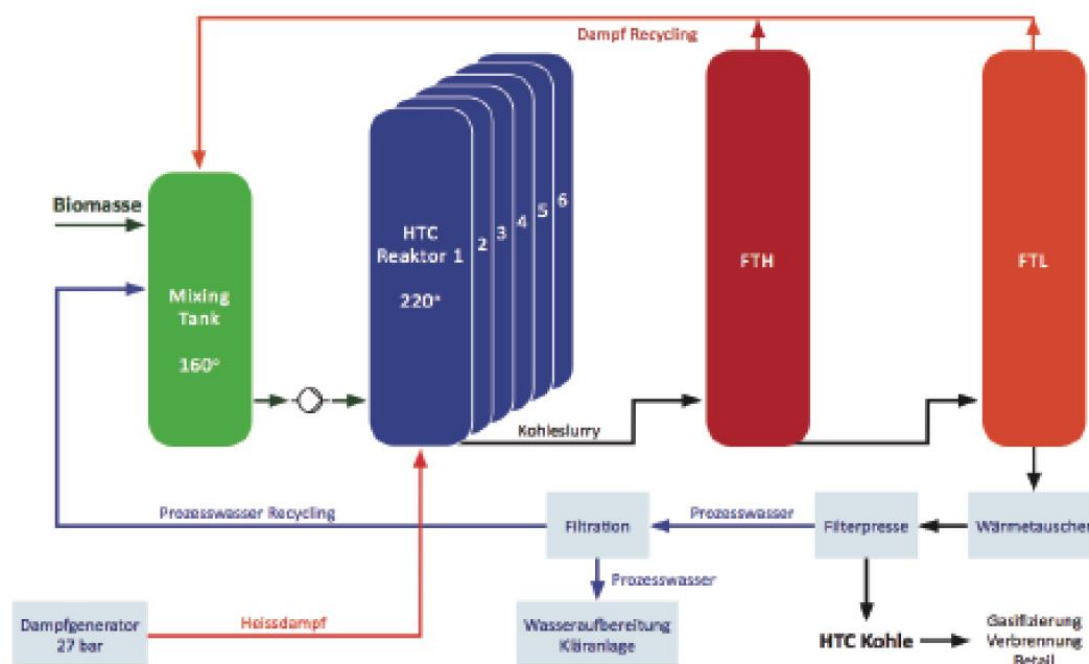
7: Proceswatervoorbehandeling

Te verwerken biomassa wordt chargegewijs gemengd met heet water tot een slurry van ongeveer 15 gew% droge stof. De slurry wordt naar een reactorvat verpompt en daar met stoom op de proces-temperatuur gebracht en vervolgens gedurende ongeveer 6 uur (4 batches per dag per reactor) bij genoemde druk en temperatuur in de reactorvaten gehouden voor het laten verlopen van hydrolyse en recombinate van hydrolyseproducten tot hydrokolen.

¹² De andere commercieel aangeboden technologie – TerraNova – werkt met thermische olie als medium voor aanvoer van warmte.

De behandelde slurry wordt vervolgens naar de flashvaten verpompt voor scheiding van product-gassen, water en hydrokolen. Stoom wordt in twee stappen geflasht en wordt hergebruikt voor het voorverwarmen van te verwerken biomassa.

Figuur 9 – Illustratie bedrijfsvoering AVA CO₂ HTC-proces



Bron: KIT, 2012.

Geproduceerde hydrokolen worden via filtratie afgescheiden en met zwavelzuur nabehandeld voor uitloging van fosfor en alkalizouten. De loging verwijderd meer dan 90% van de in de biomassa aanwezige fosfor en vrijwel alle alkalizouten en chloor.

Tijdens loging geproduceerd fosforzuur wordt middels nanofiltratie gescheiden van metaalsulfaten als een 5 gew% sterke oplossing, die vervolgens wordt opgeconcentreerd tot 20-30% sterkte.

Stikstof wordt als ammoniumsulfaat teruggewonnen en kan in principe direct als kunstmest worden afgezet.

De uitgeloopte hydrokolen worden mechanisch ontwaterd (d.s. gehalte $\approx$ 70%) en kunnen worden gebruikt als brandstof voor Centrale Rotterdam of voor een eventueel te realiseren vergasser. Over geschiktheid voor langdurigere opslag van mechanisch ontwaterde hydrokolen is geen eenduidige informatie gevonden.

3.1.2 Bijproducten

Als bijproducten komen een gasstroom en een waterige oplossing van zouten en organische zuurstofhoudende stoffen vrij.

De gasstroom bestaat hoofdzakelijk uit CO₂ (> 90 vol%) met kleine hoeveelheden CO en bevat sporen van koolwaterstofverbindingen. Het gasmengsel zou na CO₂-afvang kunnen worden verbrand in de Centrale Rotterdam of in een aparte ketel.

De waterige oplossing bevat opgeloste zouten en organische afbraakproducten als suikers en organische zuren. De opgeloste organische verbindingen zijn vooral typische hydrolyseproducten en dehydratieproducten van hemicellulose en cellulose, waarvan azijnzuur, glycolzuur en mierenzuur, de belangrijkste zijn. Daarnaast komen kleinere hoeveelheden levulinezuur, glucose, hydroxymethylfurfural (HMF), furfural en fenol voor, naast niet-geïdentificeerde stoffen.

De behandeling van deze waterstroom omvat de volgende stappen:

5. Membraanfiltratie:
Scheiding van te recirculeren organische verbindingen en niet meer verder omzetbare verbindingen (zogenaamde dead ends - azijnzuur en andere carbonzuren).
6. Omgekeerde osmose en MBR:
Concentratie van dead-ends en eliminatie door anaerobe vergisting (recirculatie van slib in de HTC).
7. Nareiniging proceswater uit vergister middels ionenwisseling en stripping, scheiding van stikstof voor de productie van kunstmest.

3.1.3 Voetafdruk en inpasbaarheid

De voetafdruk van een installatie met een verwerkingscapaciteit van 80 kton/jaar aan slib ongeveer 2.000 m². Een foto van de demonstratie-installatie in Retow in Oost-Duitsland geeft een indicatie van de schaal van installatie en apparatuur.

Figuur 10 – Demonstratie-installatie in Retow



Bron: (Kläusli, 2014).

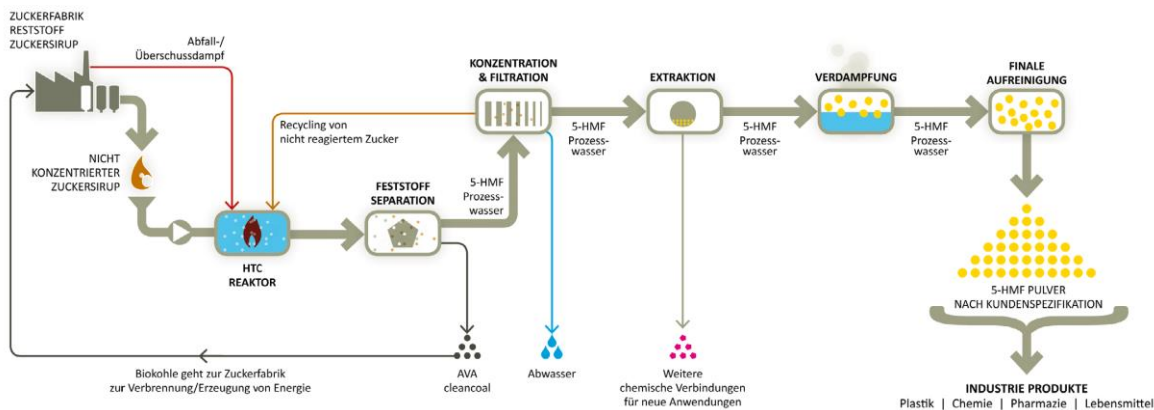
Het proces vraagt middendrukstoom met een druk minimaal gelijk aan de procesdruk van het HTC-proces. Stoomconsumptie is fataal.

Restwarmte uit het proces (ongeveer 100°C) wordt gebruikt voor voorverwarmen van ketelvoedingswater of voor het drogen van mechanisch ontwaterde hydrokolen.

3.1.4 Verdere ontwikkeling

In het HTC-proces vindt vorming van 5-HMF (5-hydromethylfurfural) plaats, een chemische verbinding die kan worden gebruikt als grondstof voor PEF (een alternatief voor PET) en die een marktwaarde van ruim € 2.000/ton zou hebben.

Figuur 11 – Concept voor toepassing van HTC-proces voor industriële productie van hydrokolen



Bron: KIT, 2014.

AVA CO2 is er in geslaagd een op het HTC-proces gebaseerd concept te ontwikkelen gericht op industriële productie van 5-HMF. De op HTC-proces met nageschakelde vloeistof-vloeistof extractie gebaseerde technologie is ondergebracht bij een dochteronderneming – Avalon Industries AG (Avalon Industries, 2018). Mogelijk valt 5-HMF-productie te combineren met productie van hydrokolen.

Daarnaast zouden de zogenaamde 'dead ends' – zoals azijnzuur – kunnen worden afgescheiden uit de restwaterstroom om te worden afgezet als waardevolle chemicaliën. Azijnzuur van farmaceutische kwaliteit heeft bijvoorbeeld een marktwaarde van € 500-€ 600 per ton.

3.2 Massa- en energiebalans

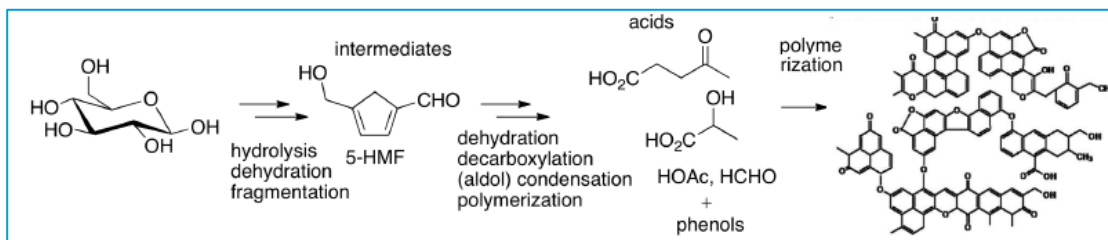
Het principe van het HTC-proces

Het HTC-proces is een combinatie van hydrolyse, dehydratie (afbreken van OH-groepen) en in beperkte mate ook van decarboxylatie (afbreken van CO₂-groepen) van hemicellulose, vetten, eiwitten en (in mindere mate) cellulose¹³. Lignine wordt beperkt omgezet. Door hydrolyse en dehydratie gevormde en in water opgeloste moleculen polymeriseren deels weer op niet opgeloste lignine en cellulose. Door afsplitsing van zuurstofrijke hydroxyl- en carbonylgroepen hebben de gevormde hydrokolen een hoger koolstofgehalte dan het uitgangsmateriaal. Zeer globaal is het reactieverloop grofweg:

- cellulose → hexose (glucose, fructose) → HMF → char;
- hemicellulose → pentose (xylose) → furfural → char.

¹³ Er wordt in de geraadpleegde literatuur bijvoorbeeld een percentage van 40% genoemd.

Figuur 12 – Illustratie van vorming van hydrokolen uit glucose



Bron: (Avalon Industries, 2017).

De in beschouwd concept uit het proceswater te verwijderen 'dead ends' betreffen onder meer:

- azijnzuur, dat vrijkomt bij hydrolyse van hemicellulose;
- mierenzuur, levulinezuur uit thermische degradatie van furfural en 5-HMF;
- glycolzuur uit thermische degradatie van aldehyden.

In feite is het begin van hydrothermische verkoling grotendeels vergelijkbaar met het stoomexplosieproces van Arbaflame, maar door langere verblijftijden treden in tweede instantie een aantal additionele reacties op, die niet allemaal even goed bekend zijn. Het precieze verloop van het HTC-proces is dan ook niet bekend, ook niet bij de technologieleverancier. Ook is niet bekend welke stoffen allemaal worden gevormd en in de geproduceerde waterige oplossing aanwezig zijn. Om die reden is het niet mogelijk om zoals bij vergassing een integraal model te bouwen waarmee aan de hand van de samenstelling van de te verwerken biomassa een redelijke schatting van massabalans en energiebalans kan worden gegeven.

In plaats daarvan is voor stro op basis van informatie uit literatuur en gegevens van AVA CO2 voor slibverwerking een benaderde massabalans opgesteld.

Voor gries blijkt onvoldoende gegevens over de biomassa zelf beschikbaar te zijn om een schatting van de massabalans te kunnen maken.

Gehanteerde benadering en resulterende massabalans

Op basis van openbare bronnen en informatie van AVA CO2 is volgende benaderingswijze aangehouden voor het opzetten van een massabalans voor hydrothermisch verkolen van RWZI-slib en stro:

- van de koolstof en de organische stof wordt ongeveer 5% omgezet in CO₂;
- het percentage koolstof dat wordt omgezet in dead ends is geschat aan de hand van de hoeveelheid acetyl-groepen in de biomassa;
- aangenomen is dat de overige koolstof in de hydrokolen wordt vastgelegd;
- voor de chemische samenstelling van de hydrokolen geproduceerd uit slib en stro is op basis van literatuur een O/C-verhouding van respectievelijk 0,32 en 0,28 en een H/C-verhouding van respectievelijk 1,6 en 0,98 aangehouden.

Voor stikstof is aangenomen dat 2/3 in oplossing gaat, voor zwavel dat de helft in oplossing gaat.

De resulterende massabalans voor de droge stof is voor beide brandstoffen gegeven in Tabel 5.

De opbrengst aan hydrokolen en het asgehalte en de stookwaarde van de hydrokolen komen voor RWZI-slib goed overeen met informatie van AVA CO2.

Tabel 5 – Geschatte massabalans voor hydrothermische verkolings van RWZI-slib en stro

	RWZI-slib				Stro			
	Brandstof	CO ₂	Waterfase	Hydrokolen	Brandstof	CO ₂	Waterfase	Hydrokolen
Macrocomponenten, gew% d.s.								
Asgehalte	32%	0%	14%	18%	8%	0%	4%	4%
C	34%	1%	2%	31%	45%	2%	3%	40%
H	5%	0%	1%	4%	5,4%	0,0%	2,1%	3,2%
N	4%	0%	3%	1%	0,7%	0,0%	0,4%	0,2%
S	1%	1%	0%	1%	0,1%	0,0%	0,1%	0,1%
O	24%	2%	0%	13%	40%	6%	20%	15%
Chloor (Cl)	0,08%	0%	0,06%	0,02%	0,4%	0,0%	0,3%	0,1%
	100%	4%	19%	69%	100%	8%	29%	62%
Microcomponenten, mg/kg d.s.								
Fluor (F)	2550	0	1913	638	7		5	2
Som zware metalen ¹⁴	3225	0	645	2580	30		6	24
Cadmium (Cd) + Thallium (Tl)	4	0	1	4	0,18		0,04	0,15
Kwik (Hg)	2	0	0	2				

Een samenvattend overzicht van de voornaamste productstromen in gegeven in Tabel 6.

Tabel 6 – Overzicht van productstromen uit hydrothermisch verkolen van RWZI-slib en stro

	RWZI-slib	Stro
Per ton brandstof (d.s.):		
- hydrokolen		
Kg d.s./ton	693	620
GJ/ton (bij 70% d.s.):	12,9	14,7
- P - afgevangen, kg/ton d.s.	6	2
- N - afgevangen, kg/ton d.s.	25	1

De resulterende hydrokolen voldoen bij RWZI-slib naar verwachting niet, bij stro naar verwachting wel aan de eisen die vanuit de Centrale Rotterdam aan de specificaties voor milieuverontreinigende stoffen worden gesteld (zie Tabel 7).

Het is echter niet zeker of de as in hydrokolen een voldoende hoge deformatietemperatuur en vervloeitings temperatuur heeft. De met de empirische benadering van (Holubcik, et al., 2015). geschatte deformatietemperatuur is met een waarde van 1.070°C lager dan de in de MilieuEffectRapportage van de Centrale Rotterdam genoemde grenswaarde van 1.150°C.

Samenvattend lijkt er geen zekerheid dat hydrothermische verkolings van RWZI-slib en stro een brandstof op kan leveren die geschikt zijn voor grootschalige inzet in de Centrale Rotterdam. De brandstof zou wel geschikt zijn voor vergassing.

¹⁴ De som van Sb, As, Cr, Co, Cu, Pb, Mn, Ni, V.

Tabel 7 – Geschatte massabalans voor hydrothermische verkoling van RWZI-slib en stro

	Hydrokolen uit RWZI-slib	Specificatie-eisen	Hydrokolen uit stro	Specificatie-eisen
Macrocomponenten, gew% d.s.				
Asgehalte	27%		6%	
C	45%		64%	
H	6,0%		5,2%	
N	1,8%		0,4%	
S	1,0%	0,6%	0,1%	0,6%
O	19%		24%	
Chloor (Cl)	0,03%	0,20%	0,16%	0,20%
Microcomponenten, mg/kg d.s.			100%	
Fluor (F)	920	167	3	167
Som zware metalen ¹⁵	3722	889	39	889
Cadmium (Cd) + Thallium (Tl)	5,05	7,78	0,24	7,78
Kwik (Hg)	2,9	0,2		0,2

Hydrothermische verkoling leidt tot grote hoeveelheden afvalwater belast met organische stoffen, zouten en toxische zware metalen. Er is verondersteld dat deze stroom na verwijdering van organische stoffen in de waterbehandeling van de Centrale Rotterdam kan worden verwerkt.

Energiebalans

De energiebalans is geschat uitgaande van:

- opmengen van de brandstof met water tot een slurry met een droge stof gehalte van 15%;
- de hydrothermale verkoling vindt plaats bij 230°C;
- stoom wordt middels een flashtank op 160°C (zie ook Figuur 9) en een flashtank op 100°C teruggewonnen;
- gebruik van aftapstoom uit de middendruk turbine van de Centrale Rotterdam op 27 bar – geschatte temperatuur en enthalpie respectievelijk 380°C en 3.200 kJ/kg.

Op basis van deze uitgangspunten is het stoomgebruik geschat op 250 kg/ton RWZI-slib en 1.030 kg/ton stro. De voor RWZI-slib berekende hoeveelheid verse stoom is aanmerkelijk hoger als de door AVA CO2 opgegeven hoeveelheid van 180 kg/ton RWZI-slib.

Elektriciteitsgebruik is gerelateerd aan verpompen en bedraagt 80 kWh_e/ton droge stof.

3.3 Kosten

Investeringskosten en vaste operationele kosten

AVA CO2 heeft een prijsopgave gedaan voor een installatie met een verwerkingscapaciteit van 120 kton RWZI-slib (24% d.s.) per jaar. De prijsopgave heeft betrekking op een situatie waarin afvalwater met zouten en 'dead ends' organische stoffen kunnen worden afgezet bij een bestaande waterzuivering. In de configuratie is terugwinning van fosfor door logging met zwavelzuur geïntegreerd. Er is geen rekening gehouden met thermisch drogen van de geproduceerde hydrokolen.

¹⁵ De som van Sb, As, Cr, Co, Cu, Pb, Mn, Ni, V.

De investering voor deze configuratie zou M€ 23 bedragen.

Voor de vaste operationele kosten voor personeel, onderhoud, verzekeringen en de technologie-licentie is een bedrag van M€ 1,16 opgenomen.

Jaarlijkse kosten

Een inschatting van de jaarlijkse kosten is gegeven in Tabel 8.

Tabel 8 – Opbouw jaarlijkse kosten

	RWZI-slib	Stro
Afschrijvingen	2,8	2,8
Vaste operationele kosten	1,2	1,2
Gederfde inkomsten elektriciteit	0,4	0,4
Uitgespaarde inkoop steenkool	-1,1	-1,2
Inkoop brandstof	-4,8	3,2
	-1,5	6,3

Kapitaallasten zijn geschat als 12% van de investeringssom. De vaste operationele kosten zijn als aangegeven overgenomen van een aanbieding van AVA CO2.

Voor kosten gerelateerd aan gederfde inkomsten uit afzet van elektriciteit is uitgegaan van een elektriciteitsprijs van € 28/MWh_e, conform de correctiebedragen aangehouden in de SDE+ 2017-regeling. Uitgespaarde inkoopkosten voor steenkool zijn geschat uitgaande van een door Engie aangehouden prijsniveau van € 3/GJ.

Voor de inkoop van brandstof is uitgegaan van een poortprijs van € 40/ton te betalen door de ontdoener voor RWZI-slib. Verwerkingskosten voor RWZI-slib variëren in de praktijk van € 35/ton tot meer dan € 100/ton.

Voor stro is uitgegaan van een prijs van € 100/ton, zoals geldt op de Nederlandse markt. In principe is stro goedkoper te contracteren vanaf Midden-Frankrijk, maar bij verdisconteren van de logistieke kosten is de prijs aan de kade bij de Centrale Rotterdam vergelijkbaar.

Er zijn geen kosten voor waterzuivering meegenomen en geen inkomsten uit afzet van fosfor en ammoniak. Kosten voor waterzuivering vergen een verdiepende analyse naar bijvoorbeeld de capaciteit van de afvalwaterzuivering van de Centrale Rotterdam en de daarop nog beschikbare ruimte voor additionele afvalwaterstromen.

De opbrengsten voor afzet van P en N-kunstmest zijn bescheiden.

Zoals de jaarkosten illustreren is hydrothermisch verkolen geïntegreerd met de Centrale Rotterdam waarschijnlijk rendabel voor een restproduct met een negatieve waarde zoals RWZI-slib, maar is dat niet het geval bij een biomassastroom met een positieve economische waarde.

3.4 Milieubelasting gerelateerde aspecten

De vervangingsverhouding slib : steenkool is ongeveer 1 MJ slib (d.s.) : 0,7 MJ steenkool (a.r.) wanneer wordt aangenomen dat steenkool door hydrokolen in een verhouding 1 MJ hydrokolen : 1 MJ steenkool kunnen worden vervangen, rekening houdend met verbruik van stoom en elektriciteit tijdens hydrothermisch verkolen. De overeenkomstige CO₂-reductie bedraagt ongeveer $94,5 \times 0,7 = 67$ kg CO₂/GJ houtige biomassa.

4 Bioraffinage van niet-houtige biomassa met mierenzuur

4.1 Inleiding, pulp uit stro?

Beschouwde proces

De in deze studie beschouwde en in voorgaande fasen geselecteerde bioraffinagetechnologie – het FormicoFib-proces van Chempolis – is feitelijk alleen geschikt voor stro.

Stromen als RDF en brandbaar restafval hebben een te wisselende samenstelling en een samenstelling ongeschikt voor het betreffende proces. Houtige biomassa is ongeschikt vanwege de te dichte structuur van het materiaal. Gries bevat een te laag gehalte aan cellulose, het hoofdproduct van het raffinageproces.

Het beschouwde proces bestaat kort gezegd uit het pulpen van stro tot cellulose door het oplossen van hemicellulose en lignine in heet mierenzuur. De geïsoleerde cellulose kan worden afgezet als papierpulp, de in deze studie beschouwde afzet. Bijproducten zijn met name azijnzuur en furfural, naast een als brandstof toepasbaar lignineconcentraat.

Er loopt in India een initiatief voor de realisatie van een bioraffinaderij voor bamboe naar ethanol. Het project wordt financieel ondersteund door onder andere Unido, een agentschap van de VN. Chempolis beschikt zelf over een demonstratie-installatie met 25 kton/jaar verwerkingscapaciteit in Oulu, Finland.

Pulp uit stro

Pulp uit stro en uit andere agrarische bijproducten en reststromen krijgt met name in de VS in toenemende mate aandacht als duurzamer alternatief voor pulp geproduceerd op basis van hout. Pulpproductie op basis van agrarische reststromen zou de druk op bos en de biodiversiteit en koolstof opslagfunctie daarvan verminderen.

De perceptie is dat – plat gezegd – door agrarische residuen te gebruiken voor pulpproductie de bomen in het bos kunnen blijven staan. Mogelijk dat deze perceptie ook nuttig is in de discussie in relatie tot bioraffinage in Nederland en in relatie tot de Centrale Rotterdam in het bijzonder.

Twee voorbeelden van de interesse bij gezaghebbende merken en producenten in de VS zijn hieronder gegeven:

- Kimberly-Clark Professional, producent van de merken Kleenex en Scott toilethanddoeken en tissues, produceert bijvoorbeeld in Mobile, Alabama sanitaire producten met 20% pulp uit stro (The Associated Press, 2015);
- de telecomgigant Sprint gebruikt papier op basis van stropulp als firma-eigen briefpapier (The Guardian, 2015).

Door de aandacht voor agrarische residuen als grondstof voor papierpulp zijn ook initiatieven voor pulpproductie op basis van deze residuen in ontwikkeling.

Columbia Pulp bijvoorbeeld realiseert in Lyons Ferry in de staat Washington een stropulp fabriek met een jaarproductie van 140 kton pulp (Pulp & Paper Canada, 2018). Columbia Pulp zou een zeer mild pulpproces gebruiken gebaseerd op met name natronloog en bleken met waterstofperoxide dat pulp oplevert dat superieur zou zijn aan Eucalyptuspulp.

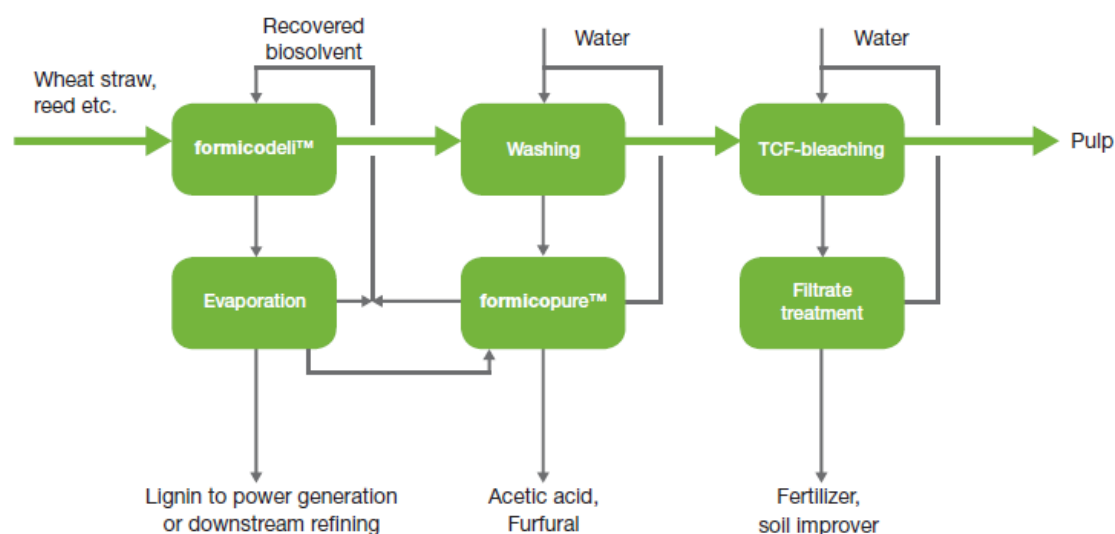
Het is dan ook niet gezegd dat de in deze studie beschouwde pulptechnologie van Chempolis de beste keuze is qua pulp kwaliteit. Nadere informatie over het door Columbia Pulp toegepaste proces wordt momenteel opgevraagd.

4.2 Verkende configuratie en ontwikkelingstraject

Standaard Chempolis-proces

Het Chempolis-proces is gebaseerd op het gebruik van mierenzuur (Chempolis, 2017) (Rousu, 2015), (Anonymus, 2006) als kookchemicaliën voor pulpen van niet-houtige biomassa.

Figuur 13 – Stroomschema FormicoFi



Bij pulpen wordt stro gemengd in een verhouding van 3 : 1 tot 5 : 1 met een overmaat heet mierenzuur, waarna hemicellulose en lignine bij 150°C en verhoogde druk respectievelijk worden gehydrolyseerd en afgebroken en de reactieproducten oplossen in het mierenzuur. Ook as gaat grotendeels in oplossing, terwijl cellulose en silica in vaste vorm overblijven. Het proces wordt indirect verwarmd met lagedrukstoom.

Een deel van de opgeloste suikers uit hemicellulose reageert verder tot furfural (C5-suikers) en hydroxymethylfurfural (C6-suikers). Acetylgroepen van hemicellulose worden omgezet in azijnzuur.

Cellulose wordt vervolgens in drie stappen bij ongeveer 70°C afgescheiden uit de geproduceerde oplossing en gereinigd van aanhangende ongewenste componenten:

- De oplossing wordt van druk afgelaten en met filterpersen in meerdere stappen gescheiden in vloeistoffase en cellulosefractie
- Overblijvend lignine en andere opgeloste componenten worden uit het celluloseproduct uitgewassen met gerecirculeerd mierenzuur. De wasvloeistof wordt gerecirculeerd naar het pulpproces.
- In een tweede wasstap wordt water in een gewichtsverhouding met cellulose van 1 : 1 als wasvloeistof gebruikt. Silicium blijft in de cellulosefractie achter.

De geproduceerde cellulosepulp wordt vervolgens gebleekt met waterstofperoxide en wordt tenslotte gedroogd. De pulp zal bij productie naast de Centrale Rotterdam vanwege ontbreken van een in de buurt gelegen papierfabriek moeten worden gedroogd om te kunnen worden getransporteerd en te kunnen worden opgeslagen.

Bij het van druk afdrukken van de cellulose slurry vrijkomende stoom en vluchtige stoffen worden deels gecondenseerd, waarbij warmte wordt teruggewonnen voor productie van processtoom. Resterende dampen kunnen worden verbrand in bijvoorbeeld de Centrale Rotterdam.

Filtraat van de filterpersen wordt middels zestraps vallende film verdamper bij onderdruk (tot 0,12 bar) tot ongeveer 65% d.s. ingedampt. Het verdampte mierenzuur wordt hergebruikt als kookvloeistof in het pulpproces en wasvloeistof in de eerste wasstap. De procescondities tijdens de verdamping leiden tot een gedeeltelijke omzetting van pentosen naar furfural (en hexosen naar 5-HMF).

Resterend filtraat en waterige wasvloeistof van de tweede wasstap worden gecombineerd en middels dunne filmverdamper en indirect drogen verder ingedikt tot ongeveer 95% d.s.

De waterige wasvloeistof van de tweede wasstap en het condensaat van drogen van filtraat tot lignineconcentraat wordt middels destillatie in drie destillatiestappen gescheiden in water, te recirculeren mierenzuur en in bijproducten azijnzuur en furfural.

Te overwegen alternatieve opwerking van waterige wasvloeistof en filtraat

Gezien de lage belading van de waterfractie uit de tweede wasstap zou kunnen worden overwogen om de in de wasstap opgeloste stoffen te concentreren met een filterstap. Hierdoor zou de stoombehoefte kunnen worden beperkt.

Daarnaast kan worden overwogen om lignine en hemicellulose in het ingedampte filtraat te scheiden door de lignine te laten neerslaan. Dit zou het mogelijk maken opgeloste assen en met name de alkalizouten uit de assen in een waterige fractie af te scheiden van de als brandstof te benutten lignine. ECN beschrijft dat door toevoeging van water in een 1 : 1 gewichtsverhouding met een 60% sterk lignine/hemicellulose concentraat de lignine coaguleert en door filtratie kan worden verwijderd. De resterende hemicellulose waterige oplossing met de uit stro opgeloste zouten zou vervolgens verder kunnen worden opgewerkt via filtratie, indampen en destillatie.

4.3 Massabalans en energiegebruiken

Per ton stro (ongeveer 90% d.s.) worden naar schatting geproduceerd:

- iets meer dan 400 kg droge pulp;
- ongeveer 40 kg furfural (> 99% zuiver);
- ongeveer 30 kg azijnzuur (> 99,8% zuiver);
- ruim 400 kg (d.s.) brandstof.

De consumptie van mierenzuur bedraagt 20 kg/ton stro.

Een geschatte massabalans is opgenomen in Tabel 9, Een geschatte samenstelling van de ligninefractie is gegeven in Tabel 10. Zoals aangegeven in Tabel 10 is – zonder andere afvoertracé dan de ligninerijke brandstof - het cloorgehalte hoger dan de in de specificatie-eisen voor alternatieve brandstoffen vastgelegde grenswaarde.

Tabel 9 – globale massabalans voor organosolv pulpen van stro met mierenzuur

	Cellulose	Furfural	Azijszuur	Lignine concentraat
- C	17%	2%	1%	21%
- H	2,4%	0,1%	0,2%	2,6%
- O	19%	1%	1%	16%
- S				0,10%
- N				0,51%
as	1,8%	0,0%	0,0%	1,7%
	41%	4%	3%	42%

Tabel 10 – Geschatte en indicatieve samenstelling van de ligninerijke brandstof

	Eenheid	Grenswaarde	
Stookwaarde:	MJ/kg		
- Industriële pellets		>16,5	16,5
- Worst case		>12	
Vochtgehalte	Gew% a.r., ≤	10%	10%
Asgehalte	Gew% a.r., ≤		7,4%
C			43,6%
H			5,3%
N			1,1%
S		0,50%	0,2%
O			32,5%
Chloor (Cl)	Gew% a.r., ≤	0,18%	0,7%
Fluor (F)	mg/kg a.r., ≤	150	11
Som zware metalen (Sb, As, Cr, Co, Cu, Pb, Mn, Ni, V)	mg/kg a.r., ≤	800	51
Cadmium (Cd) + Thallium (Tl)	mg/kg a.r., ≤	7	0
Kwik (Hg)	mg/kg a.r., ≤	0,14	0

Het energiegebruik per ton pulp bedraagt:

- 8,3 ton stoom van ongeveer 160°C;
- 0,9 MWh_e.

4.4 Kosten

Voor een verkennende kostenevaluatie is uitgegaan van een pulpfabriek met een productiecapaciteit van 100 kton/jaar aan gedroogde pulp.

Voor de investeringen voor een installatie met een dergelijke productiecapaciteit wordt in de geraadpleegde literatuur voor de situatie in 2006 een waarde genoemd van M€ 55. Geschat is dat de investeringen anno 2018 ongeveer M€ 70 bedragen (rekening houdend met een inflatie van 2%).

Een inschatting van de operationele kosten is gegeven in Tabel 11. Ook bij de huidige zeer hoge stroprijzen zou pulpproductie nog economisch rendabel kunnen zijn.

Tabel 11 – Inschatting jaarkosten voor pulpproductie op basis van stro, alle cijfers in M€/jaar

Kapitaallasten	8,4
Vaste operationele kosten	2,8
Gederfde inkomsten elektriciteit	5,9
Inkoop mierenzuur	2,5
Inkoop brandstof	25
	44,6
Pulpafzet	-45,5
Furfural verkoop	-9,0
Aziijnzuur verkoop	-3,8
Uitgespaarde inkoop steenkool	-7,5
	-65,7
Netto	-21,1

Kapitaallasten en operationele kosten zijn geschat als 12% en 4% van de investeringskosten. Er is een inkoopprijs voor stro van € 145/ton aangehouden (Boerderij.nl, 2018), voor mierenzuur een prijs van € 500/ton. Voor elektriciteit is een prijs van € 28/MWhe aangehouden.

Voor pulp, furfural en aziijnzuur zijn prijzen van respectievelijk € 450/ton, € 900/ton en € 500/ton aangehouden. De prijzen voor de chemicaliën zijn uit internetbronnen overgenomen. De pulpprijs is gebaseerd op (IFC, 2013) en (Kolin, 2016). De laatste bron betreft een uitvoerige analyse van financiële risico's bij het verstrekken van een lening van M\$ 130 aan Columbia Pulp voor de bouw van hun pulpfabriek in Lyons Ferry. Voor steenkool is een inkoopprijs van € 3/GJ aangehouden.

4.5 Milieubelasting gerelateerde aspecten

Welke CO₂-reductie kan worden gerealiseerd met productie van pulp en additionele chemicaliën is in dit stadium niet goed in te schatten omdat nog niet duidelijk is in hoeverre de geproduceerde pulp kan worden gebruikt voor vervanging van primaire Kraft pulp uit houtige biomassa.

5 Arbaflame stoomexplosie voorbehandeling

5.1 Essentie van het proces

Bij stoomexplosie voorbehandeling wordt voorgedroogd houtige biomassa gedurende 5-10 minuten blootgesteld aan hoge druk verzadigde stoom (160-250°C), met of zonder de toevoeging van een zure (bijvoorbeeld zwavelzuur) of alkalische katalysator. Het mengsel wordt daarna abrupt van druk afgelaten, waardoor de stoom explosief wordt geflasht en de snippers houtige biomassa worden 'opgeblazen' tot kleinere deeltjes.

Tijdens het proces wordt azijnzuur gevormd door reactie van stoom met hemicellulose¹⁶.

De gevormde hoeveelheid azijnzuur is afhankelijk van de samenstelling van de biomassa; naaldhout produceert relatief weinig azijnzuur, loofhout relatief veel. Het gevormde azijnzuur hydrolyseert vervolgens de hemicellulose tot enkelvoudige opgeloste suikers.

Bij extremere procescondities (langere verblijftijd, hogere temperatuur) zal een deel van de gevormde monomere C5- en C6-suikers verder worden afgebroken tot 2-furaldehyde (of furfural) en 5-hydroxymethyl-2-furaldehyde (of HMF) en tot organische zuren (levulinezuur en mierenzuur). Suikers, azijnzuur en eventueel uit suikers gevormde aldehyden en zuren gaan in oplossing en komen terecht in het stoomexplosiecondensaat.

Lignine wordt zeer beperkt afgebroken, waarbij fenolen ontstaan, die in stoomexplosiecondensaat terechtkomen. Vergaande afbraak van lignine is met oog op de kwaliteit van de te produceren pellets niet wenselijk omdat de lignine na de stoomexplosie als bindmiddel en lijm fungeert.

5.2 Verkende configuratie en ontwikkelingstraject

Configuratie

In de beschouwde configuratie wordt aangevoerd stamhout met een schorsverwijderingsmachine ontschorst. Na verkleining met een innovatieve technologie van Arbaflame wordt het fijngemalen stamhout en separaat aangevoerde houtsnippers in een met voorverwarmde lucht als droogmiddel bedreven banddroger gedroogd tot een vochtgehalte van 30-35 gew%. De drooglucht wordt daarbij voorverwarmd met uit het proces teruggewonnen warmte.

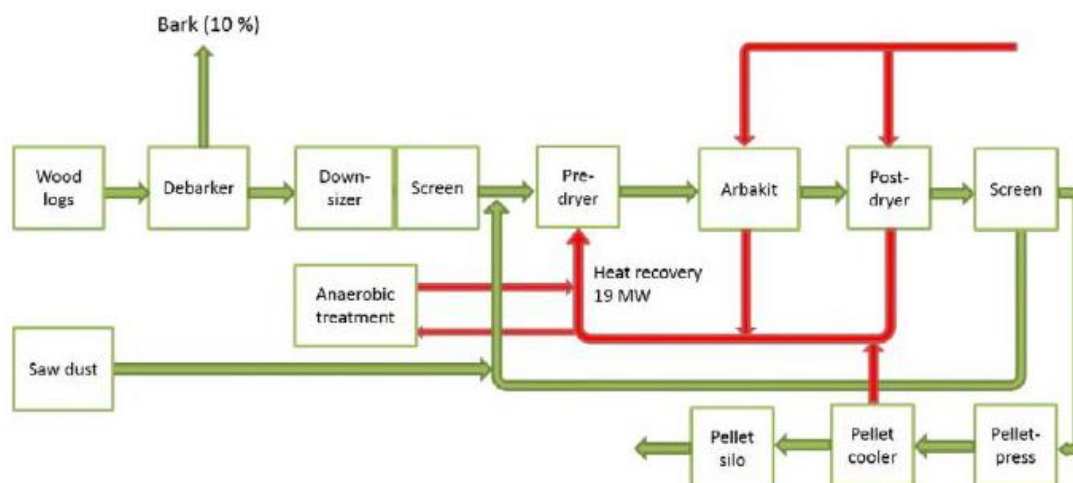
De semi-droge snippers worden vervolgens chargegewijs toegevoerd aan Arbaflame's stoomexplosie systeem, de Arbakit. In de eerste reactorstap wordt hogedrukstoom geïntroduceerd. Het materiaal wordt vervolgens gedurende 5-10 minuten blootgesteld aan hoge druk verzadigde stoom (160-250°C). Tijdens deze fase van het proces wordt ook een kleine hoeveelheid lucht toegevoegd voor omzetting van gevormde (sterk geurende) aldehyden en ketonen.

Na de benodigde verblijftijd wordt de stoomdruk abrupt verlaagd en wordt de grondstof onder invloed van een stoomexplosieproces pneumatisch naar de tweede processtap getransporteerd, de flashtank, waar stoom, overige gassen en door de explosie verder verkleinde snippers worden

¹⁶ Door hydrolyse van de acetylgroepen in hemicellulose. De acetylgroepen vormen onder meer de binding tussen hemicellulose en lignine.

gescheiden. Stoom en gassen worden in een condensor geleid waar water en andere condenseerbare verbindingen worden afgescheiden.

Figuur 14 – Stroomschema voor stoomexplosie voorbehandeling (200 kton/jaar) van stamhout met schors middels de Arbaflame-technologie



Het in de flashtank afgescheiden voorbehandelde houtstof wordt in een met stoomdroger gedroogd tot een vochtgehalte van ongeveer 12-15% en vervolgens gepelletiseerd.

Pelletiseren levert een product op dat gemakkelijk langere tijd kan worden opgeslagen – ook in de buitenlucht – en dat eventueel ook op andere markten kan worden afgezet, bijvoorbeeld de markt van brandstoffen voor particuliere huishoudens.

Condensaat van stoomexplosie voorbehandeling met gecondenseerde organische verbindingen wordt in een standalone configuratie vergist. Bij plaatsing naast de Centrale Rotterdam kan met oog op beperking van de investeringskosten ook worden overwogen om het condensaat, na eventuele concentratie met bijvoorbeeld ultrafiltratie of vallende film verdampers, te verbranden in de Centrale Rotterdam. In de beschouwde configuratie is uitgegaan van integrale verbranding.

Een deel van de biomassa komt tijdens het stoomexplosieproces als niet condenseerbare organische verbindingen vrij. Informatie over hoeveel materiaal en wat voor soort verbindingen dit betreft lijkt nog niet beschikbaar. De verbindingen zullen bij realisatie van een stoomexplosie voorbehandelingsinstallatie naast de Centrale Rotterdam in de centrale worden verbrand.

Assen lossen tijdens het proces gedeeltelijk op. Er is echter nog geen inzicht in welke mate, welke verbindingen het betreft en welke effecten dit heeft op het smeltgedrag van de as. Het smeltgedrag kan naar verluid door toevoeging van additieven tijdens het stoomexplosieproces worden beïnvloed.

Tijdens stoomexplosie voorbehandeling gevormde aldehyden en zuren remmen de productiviteit van enzymen bij eventuele verwaarding van het stoomexplosiecondensaat. Het concept is daardoor minder geschikt als voorbehandeling voor bioraffinage.

Stand der techniek

Arbaflame beschikt over een demonstratie-installatie in Grasmo, Zuid-Noorwegen. De demonstratie-installatie is al sinds 2003 in bedrijf.

De stoombehandeling vindt bij de demonstratie-installatie in Grasmo plaats in twee reactoren van 17 m³ inhoud. Verse processtoom wordt geproduceerd met een resthout (hog fuel) gestookte ketel met een vermogen van 6 MW.

Bij de huidige configuratie kan de installatie in tweeploegendienst zo'n 25 kton/jaar produceren. De jaarlijkse productie wordt momenteel afgezet als brandstofpellets voor de bebouwde omgeving.

De huidige productiecapaciteit is beperkt door het werken in twee ploegen, maar ook door de beperkte capaciteit van de stoomketel. De installatie zou bij voldoende stoomvermogen, continue productie en eventueel bijplaatsen van een additionele reactoren in principe maximaal 50 kton/jaar kunnen produceren.

Er zijn in Europa, maar ook in Noord-Amerika een aantal commerciële initiatieven in ontwikkeling op een schaalgrootte van 100-200 kton.

Het ruimtebeslag voor een installatie met schaalgrootte van 200 kton/jaar bedraagt ongeveer 1,15 ha.

5.3 Mogelijke verdere ontwikkelingen

5.3.1 Afscheiden van waardevolle componenten

Een momenteel verkende verdere ontwikkeling van het Arbaflame-concept is de terugwinning van waardevolle componenten uit het condensaat, met name furfural, azijnzuur en 5-HMF.

Op dit moment is nog niet duidelijk welke producten in welke concentraties in stoomexplosie-condensaat aanwezig zijn (zie ook Bijlage B) en hoe concentraties en verbindingen samenhangen met procescondities voor het stoomexplosieproces als temperatuur en blootstellingstijd.

Uitgaande van de in eerdere paragrafen beschreven algemene informatie zullen de in het condensaat aanwezige organische verbindingen vooral bestaan uit een mengsel van opgeloste monomere en oligomere suikers, met kleinere hoeveelheden azijnzuur, fenol en omzettingenproducten van suikers (HMF, furfural, mierenzuur, levulinezuur).

De totale hoeveelheid bedraagt afgaande op verliezen zoals genoemd door Arbaflame circa 110-175 kg per ton pellets. Gebruik van Stoomexplosie voorbehandeling zal bij deze massaverhouding.

Hoe waardevolle producten kunnen worden geïsoleerd uit het naar verwachting complexe mengsel staat nog te bezien. Enkele gedachtenlijnen zijn hieronder gegeven:

- Bekend is dat AVALON Industries AG 5-HMF produceert door hydrothermische verkoling van fructose. Afgaande op beschikbare informatie¹⁷ wordt 5-HMF uit water geïsoleerd door vloeistof-vloeistof extractie.
- Azijnzuur – marktprijs € 600/ton – kan in principe uit waterige oplossingen worden geïsoleerd met vloeistof-vloeistof extractie.

Een alternatieve of additionele route voor verwaarding van het stoomexplosiecondensaat kan fermentatie naar ethanol, xylitol, melkzuur of 2,3-butaandiol. Productie van deze verbindingen middels fermentatie van suiker vindt op commerciële basis plaats.

Een derde mogelijke route is omzetting van xylitol in furfural via cyclodehydratie.

¹⁷ Zie: p.8 referentie naar 'solvent switch' (Avalon Industries, 2017).

5.3.2 Optimalisatie van warmte-integratie

In de huidige demonstratie-installatie vindt afblazen plaats in één tank, waardoor de temperatuur van de teruggeproduceerde stoom relatief laag is. De bedoeling is om in een verder geoptimaliseerd ontwerp voor afblazen twee tanks te installeren, waardoor een deel van de af te blazen stoom op een hoger temperatuurniveau kan worden teruggeproduceerd en warmteterugwinning kan worden geoptimaliseerd.

5.4 Massa- en energiebalans

In de door Arbaflame verstrekte informatie wordt voor verwerken van naaldhout per eenheid droge stof een verlies aan massa van 10%, in extermis 15% aan verwerkte houtsnippers genoemd, omgerekend naar resulterende voorbehandeld materiaal 110-175 g/kg pellets. De omgezette biomassa wordt voor ongeveer 80% geconverteerd naar waterdamp en voor ongeveer 20% - ongeveer 20 kg/ton biomassa (d.s.). De hoeveelheid droge stof die in vluchtige componenten wordt omgezet is niet bekend.

Bij verwerking van loofhout en met name bij boomsoorten als eik en beuk is de in het stoomexplosie-proces omgezette hoeveelheid droge stof naar verluid aanzienlijk groter, evenals de productie aan organische verbindingen met een hoge marktwaarde.

Het specifieke energiegebruik van het voorbereidingsproces bedraagt bij verwerking van naaldhout 160 kWh_e en 770 kWh_{th} per ton geproduceerde pellets (stookwaarde 19,1 MJ/kg).

5.5 Kosten

In het kader van onderhandelingen met Engie over realisatie van een productie-installatie voor zwarte pellets met een verwerkingscapaciteit van 200 kton/jaar is door Arbaflame een begroting opgesteld. De investering is voor de specifieke configuratie naast de Centrale Rotterdam geschat op iets minder dan M€ 50. De specifieke productiekosten zijn bepaald op € 185/ton pellets bij een stookwaarde van 19,1 MJ/kg. De inhoud van de begroting is opgenomen in Bijlage B.3.

5.6 Milieubelasting gerelateerde aspecten

De stoomexplosie voorbehandelde pellets kunnen steenkool in een verhouding 1 MJ pellets : 1 MJ steenkool vervangen. Rekening houdend met verbruik van stoom en elektriciteit tijdens het stoom-explosieproces en pelletisering en met verlies aan energie in de chemische conversies is de verhouding hout : steenkool ongeveer 1,15 MJ : 1 MJ. De overeenkomstige CO₂-reductie bedraagt ongeveer 94,5 : 1,15 = 82 kg CO₂/GJ houtige biomassa.

Het proces zelf produceert nauwelijks emissies. Reststromen kunnen worden verbrand, mogelijk worden gescheiden in waardevolle chemicaliën en restmateriaal.

6 Een integraal concept

Om een indruk te geven van de totale jaarlijkse kosten en realiseerbare CO₂-emissie zijn de opties H₂-productie op basis van RDF, RWZI-verkoling en pulpproductie op basis van in een fictief scenario gecombineerd. Daarbij is uitgegaan van:

- levering van 130 kton/jaar aan waterstof uit ongeveer 2.900 kton RDF/jaar aan Neste;
- verwerking van alle in Nederland bij RWZI's vrijkomende zuiveringsslib (1.200 kton natte stof per jaar);
- productie van 500 kton pulp, 50 kton/jaar aan furfural en ongeveer 40 kton/jaar aan azijnzuur uit ongeveer 1.250 kton stro.

De beschouwde waterstofvracht is gebaseerd op de jaarvraag van Neste. De aangehouden hoeveelheid pulp is vergelijkbaar met de totale consumptie aan primaire pulp in de Nederlandse papier-industrie, terwijl de benodigde hoeveelheid stro ongeveer evenveel is als de gehele Nederlandse jaarproductie aan stro.

De hoeveelheden zijn vooral bedoeld om indruk te geven van de schaalgrootte van de met de Centrale Rotterdam te integreren installaties en de omvang van te contracteren biomassastromen.

Met dit palet aan opties kan ongeveer 35 PJ/jaar aan brandstof voor de Centrale Rotterdam worden geleverd. Vanwege CO₂-verwijdering uit synthesegas bij H₂-productie is er in principe 2 Mton/jaar beschikbaar voor CO₂-opslag.

Voor de conversieprocessen is aan de andere kant 1.070 GWh_e, 14 PJ lage druk stoom (ongeveer 160°C) en 3,0 PJ/jaar aan middendruk stoom (ongeveer 260°C) nodig. Gebruik van middendrukstoom is gerelateerd aan H₂-productie en hydrothermisch verkolen van RWZI-slib en betreft fataal gebruik (geen condensaat retour).

Eén en ander is hieronder geïllustreerd voor maximale elektriciteitsproductie van 2 TWh per jaar.

Tabel 12 – Illustratie van warmteproductie en elektriciteitsproductie bij combinatie van bioraffinage-concepten

	η _e netto	η _{th}	Bijstook- factor	MWmax.			Uur per jaar	TWh e	TWh th
				Biomassa	Elek.	Therm			
Maximale elektriciteitsproductie	46%	0		1.633	750		589	0,4	0,0
Industriële stoom, condensaat 100% retour	33%	58%	22%	1.633	544	950	4.073	2,2	3,9
Industriële stoom, fataal stoomgebruik	25%	47%	44%	1.633	410	768	1.133	0,5	0,9
Bruto								3,1	4,7
Eigen gebruik								1,1	4,7
Leverbaar aan extern								2,0	

A Bronnen

A.1 Bronnen bij Hoofdstuk 2, vergassing en H₂-productie

Bolhar-Nordenkamp, M. & Isaksson, J., 2016. Operating experiences of large scale CFB-gasification plants for the substitution of fossil fuels, Conference: 24th EUBC, At Amsterdam. Tampere, Valmet Technologies Oyj.

DOE/NETL, 2015. Cost and Performance Baseline for Fossil Energy Plants Volume 1b: Bituminous Coal (IGCC) to Electricity, Revision 2b – Year Dollar Update United States Department of Energy (DOE), National Energy Technology Laboratory (NETL). July 31, 2015

ECN, 2006. Production of Synthetic Natural Gas (SNG) from Biomass Development and operation of an integrated, Petten: ECN.

Hamelinck, C., 2004. Outlook for advanced biofuels, Utrecht: Universiteit Utrecht.

IEAGHG, 2017. Techno-Economic Evaluation of SMR-Based Standalone (Merchant) Plant with CCS, Cheltenham: IEAGHG.

Isaksson, J., 2017. State of art fluid bed gasifiers and boilers for biomass and wastes. Fluidized bed conversion of biomass and waste, IEA Bioenergy, p. 48.

Mühlenhoff, J. et al., 2017. Holzenergie in Deutschland: Status Quo und Potenziale. Renew (Agentur für Erneuerbare Energien e. V.), Issue Spezial 82, pp. 1-36.

Müller-Langer, F., 2011. Analyse und Bewertung ausgewählter zukünftiger Biokraftstoffoptionen auf der Basis fester Biomasse, Hamburg: Technischen Universität Hamburg-Harburg.

Palonen, J., 2012. Gasified Biomass for Biofuels Production : Foster Wheeler's Technology Developments for Large Scale Applications, presentation at Gasification Technologies Conference 2012 – Washington. sl, Foster Wheeler.

Saveyn, H. et al., 2016. Towards a better exploitation of the technical potential of waste-to-energy, Seville: European Commission.

Zubair, M. et al., 2017. Using wind energy to supply green hydrogen to refineries at the Port of Rotterdam : a Prefeasibility study, Rotterdam: Port of Rotterdam.

Internetbronnen:

Bronnen over gebruik van CO-rijk gas in gasmotoren:

- (GE Energy, 2008)
- (MWM, 2017)
- (MWM, sd)

Bronnen over gebruik van CO-rijk gas in gasturbines:

- (Siemens Industrial Turbomachinery , 2008)
- (100 ACRE FILMS, 2012)
- (General Electric Company, 2011)

A.2 Literatuur bij Hoofdstuk 3, HTC-proces

Antonietti, M., 2009. Hydrothermal carbonization: basics and recent progress HTC: Grundsätzliches und Fortschritte, Potsdam: Max Planck Institute of Colloids and Interfaces.

Erlach, B., Benjamin, W. & Tsatsaronis, G., 2011. Co-production of electricity, heat and biocoal pellets from biomass: a techno-economic comparison with wood pelletizing, Paper at the World Renewable Energy Congress 2011-Sweden, 8-13 May 2011, Linköping. Berlin, Technische Universität Berlin, Institute for Energy Engineering.

Hubschneider, H., 2014. Energetische und chemische Anwendungsszenarien aus HTC-Prozessen: Kohle, Aktivkohle und 5-HMF, HTP-Fachforum Biobasierte hydrothermale Prozesse –Technologien zur stofflichen und energetischen Nutzung 11-12 November 2014 Leipzig. Leipzig, DBFZ Deutsches Biomasseforschungszentrum gemeinnützige GmbH.

KIT, 2014. Biomasse zu Kunststoff : Innovationsprojekt. Research to Business : Newsletter Technologietransfer und Innovation, Issue 3, pp. 1-3.

Kläusli, T. M., 2015. Sugar Based Chemistry, PowerPoint-Presentation. MuttENZ, AVA-CO2.

Lesjean, B. et al., 2014. Energie- und CO2-Bilanz von HTC im Vergleich zu konventionellen Verfahren der Klärschlammbehandlung, Veranstaltung des Bundesverbands HTC at IFAT Trade Fair for Water, Sewage, Waste and Raw Materials Management. Munich. Germany. 5-9 May 2014, Berlin: Kompetenz Zentrum Wasser.

Neumann, S., 2015a. HTC-Klärschlammverwertung inkl. Phosphorrückgewinnung, AVA-CO2 Schweiz AG, Symposium zur Klärschlammverwertung, INTERREG IV B NWE, BioenNW, April 2015, Zug (CH): AVA-CO2.com.

Neumann, S., 2015b. LAV Fachtagung. Planung und Vision Klärschlammverwertung ab LAV Landwirtschaftliches Verarbeitungszentrum Markranstädt GmbH. sl, AVA-CO2 Schweiz AG.

Ramke, H.-G., Blöhse, D., Lehmann, H.-J. & Fettig, J., 2009. Hydrothermal Carbonization of Organic Waste, paper at the Sardinia 2009: Twelfth International Waste Management. Hoexter (DE), University of Applied Sciences Ostwestfalen-Lippe.

Schuhmann, R., 2012. Tagungsband zum ersten Karlsruher Workshop Folgenutzung von Deponien“ auf dem Windmühlenberg Karlsruhe, 21. Mai 2012, Karlsruhe: CMM, Karlsruher Institut für Technologie.

Weiner, B., Baskyr, I., Pörschmann, J. & Kopinke, F.-D., 2012. HTC-Prozesswasser: Verwertung oder Entsorgung? : Wissensstand und Lösungsansätze, presentation 73. Symposium des ANS, Berlin, 19.-20.9.2012, Leipzig: Helmholtz Centre for Environmental Research UFZ.

A.3 Literatuur bij Hoofdstuk 4, FormicoFib-proces

E4tech (UK) Ltd; RE-CORD: WUR, 2015. From the Sugar Platform to biofuels and biochemicals, Final report for the European Commission Directorate-General Energy, Brussels: European Union.

Gusakova, A., 2016. The Competitive Analysis of Selected Biorefineries in Finland, Lappeenranta (FI): Lappeenranta University of Technology.

IFC, 2006. International Finance Corporation (IFC) in China: Technical Assistance for the Sustainable Development of the Non-Wood Pulp and Paper Industry, Helsinki: Savcor Indufor Oy.

IFC, 2013. Producing Cellulose from Straw : Opportunities in Ukraine, Kyiv (Ukraine): International Finance Corporation (IFC) World Bank Group.

Kolin, C., 2016. Supplement No. 1 dated November 30, 2016 to Preliminary Limited Offering Memorandum dated October 28, 2016 \$130,000,000 Washington Economic Development Finance Authority's Environmental Facilities Revenue Bonds, Series 2016A (Columbia Pulp I, LLC Project). Greenberg Traurig, LLP: Chicago.

Leponiemi, A., 2011. Fibres and energy from wheat straw by simple practice, Espoo: VTT Technical Research Centre of Finland.

Rousu, P., 2015. The future is Biorefining : Biorefinery concepts for non-wood raw materials, Oulu: Chempolis.

Snelders, J. et al., 2014. Biorefining of wheat straw using an acetic and formic acid based organosolv fractionation process. Bioresource Technology, 156(March), pp. 275-282.

Bezochte websites:

- (CCM, data & Business Intelligence, 2016)
- (ICS, 2013)
- (Wakatsuki, 2015)

A.4 Literatuur bij Hoofdstuk, Arbaflame proces

ARBACORE PRODUCTION TECHNICAL OVERVIEW¹⁸
OCTOBER 2016

A.5 Overige Literatuur

100 ACRE FILMS, 2012. Solar Turbines Coke Oven Gas Video. [Online]
Available at: www.100acrefilms.com/solar-turbines-coke-oven-gas-video/,
www.gepower.com/content/dam/gepower-pgdp/global/en_US/documents/technical/ger/ger-4601b-addressing-gas-turbine-fuel-flexibility-version-b.pdf
[Geopend 2018].

A.K. Sharma, M. R. S. K., sd Modelling product composition in slow pyrolysis of wood. [Online].
Avalon Industries, 2017. PEF- The next generation polymer. [Online]
Available at: www.meetingpack.com/wp-content/uploads/2017/06/1-5-AVALON_MeetingPack_2017.pdf
[Geopend 2018].

Avalon Industries, 2018. Homepage : Welcome to the future of bio-based chemistry. [Online]
Available at: <http://www.avalon-industries.com/web/pages/en/home.php?lang=EN>
[Geopend 2018].

¹⁸ Geen document van beschikbaar.



Boerderij.nl, 2018. Prijs voor hooi en stro gaat omhoog. [Online]
Available at: <https://www.boerderij.nl/Rundveehouderij/Achtergrond/2018/3/Prijs-voor-hooi-en-stro-gaat-omhoog-262677E/>
[Accessed 2018].

CCM, data & Business Intelligence, 2016. CCM: China's market price of furfural bounces back in April. [Online]
Available at: <http://www.cnchemicals.com/Press/86385-CCM:%20Chinas%20market%20price%20of%20furfural%20bounces%20back%20in%20April.html>
[Accessed 2018].

GE Energy, 2008. Jenbacher gas engines : Profusa/Coke Factory, Bilbao, Spain. [Online]
Available at: www.gepower.com/content/dam/gepower-pgdp/global/en_US/distributed-power-downloads/documents/2008_ge_ref_cokegas_profusa_e.pdf

General Electric Company, 2011. Addressing Gas Turbine Fuel Flexibility : GER4601 (05/11) revB. [Online]
Available at: - https://www.gepower.com/content/dam/gepower-pgdp/global/en_US/documents/technical/ger/ger-4601b-addressing-gas-turbine-fuel-flexibility-version-b.pdf
[Geopend 2018].

Holubcik, M., Jandacka, J. & Malcho, M., 2015. Ash melting temperature prediction from chemical composition of biomass ash. The Holistic Approach to Environment, 5(3), pp. 119-125.
ICS, 2013. Price and market trends: Europe acetone prices firm. [Online]
Available at: <https://www.icis.com/resources/news/2013/02/22/9643472/price-and-market-trends-europe-acetone-prices-firm/>
[Geopend 2018].

Kaasalainen, J., Kallio-Könnö, M. & Isaksson, J., 2018. 12th International Conference on Fluidized Bed Technology. sl, sn, pp. 1119-1127.

Kläusli, T. M., 2015. Sugar Based Chemistry, PowerPoint-Presentation. Muttenez, AVA-CO2.
L. Mancuso, F. R., 2015. Biomass gasification for the production of SNG: a practical route through available and new technologies. sl, ANIMP, p. 27.

MWM, 2017. Efficiency on a new level : For natural gas and biogas with an output from 3,300 to 4,500 kWel. [Online]
Available at:
http://www.mwm.net/files/upload/mwm/issuu/MWM14015_LBro_2017_TCG2032B_210x297mm_EN_RGB_3_0_RZ_sl_screen.pdf

MWM, sd Italiana Coke, Italia. [Online]
Available at: <https://www.mwm.net/mwm-chp-gas-engines-gensets-cogeneration/gas-applications/references/steel-and-chemical-industry-syngas-coking-gas/italiana-coke-italia/>
[Geopend 2018].

Pulp & Paper Canada, 2018. Taking sustainability to a new level : With its new facility, Columbia Pulp joins the roster of firms delving into wheat straw pulp production. [Online]
Available at: <https://www.pulpandpapercanada.com/innovation/taking-sustainability-to-a-new-level-1100000964>



Rofouie, P., Moshkelani, M., Perrier, M. & Paris, J., 2014. A modified thermodynamic equilibrium model for woody biomass gasification. The Canadian Journal of Chemical Engineering, 92(4), pp. 593 - 602.

Siemens Industrial Turbomachinery , 2008. Fuel-Flexible Gas-Turbine Cogeneration, paper at th Power-Gen Asia , Kuala Lumpur. [Online]
Available at: <http://m.energy.siemens.com/US/pool/hq/energy-topics/pdfs/en/gas-turbines-power-plants/Fuel-Flexible-Gas-Turbine-Cogeneration.pdf>
[Geopend 2018].

Snelders, J. et al., 2014. Biorefining of wheat straw using an acetic and formic acid based organosolv fractionation process. Bioresource Technology, 156(March), pp. 275-282.
STORK, sd Syngas Fired Steam Boiler : for a speciality- Waste melting Plant. [Online]
Available at: <https://www.stork.com/en/markets-references/references/syngas-fired-steam-boiler>
[Geopend 2018].

The Associated Press, 2015. Kimberly-Clark Makes Bet on Bamboo and Straw. [Online]
Available at: https://www.nytimes.com/2015/04/13/business/international/kimberly-clark-makes-bet-on-bamboo-and-straw.html?_r=0
The Guardian, 2015. Sprint to switch to wheat straw paper in two-month sustainability trial. [Online]
Available at: <https://www.theguardian.com/sustainable-business/2015/jun/04/sprint-telecom-sustainable-paper-production>

Wakatsuki, K., 2015. Acetyls Chain – World Market Overview, presentation at Chemicals Committee Meeting at APIC 2015 Seoul. [Online]
Available at: <https://www.slideshare.net/TecnonOrbichem/apic2015-keiji-wakatsuki>
[Geopend 2018].

XEBEC, sd H2X SOLUTIONS® - PSA-H3200-G2/3/4. [Online]
Available at: <http://www.xebecinc.com/hydrogen-purification-h3200.php>
[Geopend 2018].

B Arbaflame stoomexplosie

B.1 Essentie van het stoomexplosieproces

Bij stoomexplosie voorbehandeling wordt voorgedroogd houtige biomassa gedurende 5-10 minuten blootgesteld aan hoge druk verzadigde stoom (160-250°C), met of zonder de toevoeging van een zure (bijvoorbeeld zwavelzuur) of alkalische katalysator. Het mengsel wordt daarna abrupt van druk afgelaten, waardoor de stoom explosief wordt geflasht en de snippers houtige biomassa worden 'opgeblazen' tot kleinere deeltjes.

Tijdens het proces wordt azijnzuur gevormd door reactie van stoom met hemicellulose¹⁹.

De gevormde hoeveelheid azijnzuur is afhankelijk van de samenstelling van de biomassa; naaldhout produceert relatief weinig azijnzuur, loofhout relatief veel. Het gevormde azijnzuur hydrolyseert vervolgens de hemicellulose tot enkelvoudige opgeloste suikers.

Bij extremere procescondities (langere verblijftijd, hogere temperatuur) zal een deel van de gevormde monomere C5 en C6 suikers verder worden afgebroken tot 2-furaldehyde (of furfural) en 5-hydroxymethyl-2-furaldehyde (of HMF) en tot organische zuren (levulinezuur en mierenzuur). Suikers, azijnzuur en eventueel uit suikers gevormde aldehyden en zuren gaan in oplossing en komen terecht in het stoomexplosiecondensaat.

Lignine wordt zeer beperkt afgebroken, waarbij fenolen ontstaan, die in stoomexplosiecondensaat terechtkomen.

Vergaande afbraak van lignine is met oog op de kwaliteit van de te produceren pellets niet wenselijk omdat de lignine na de stoomexplosie als bindmiddel en lijm fungeert:

- De aanwezige lignine smelt deels. Daarnaast vindt herpolymerisatie van gedegradeerde lignine plaats, al dan niet na reactie met (HMF).
- De gesmolten lignine en via herpolymerisatie gevormde pseudolignine worden tijdens het stoomexplosieproces verdeeld over de biomassa.
- Beide fracties harden bij afkoelen van de pellets uit, waardoor een harde en brosse en waterafstotende pellet ontstaat.

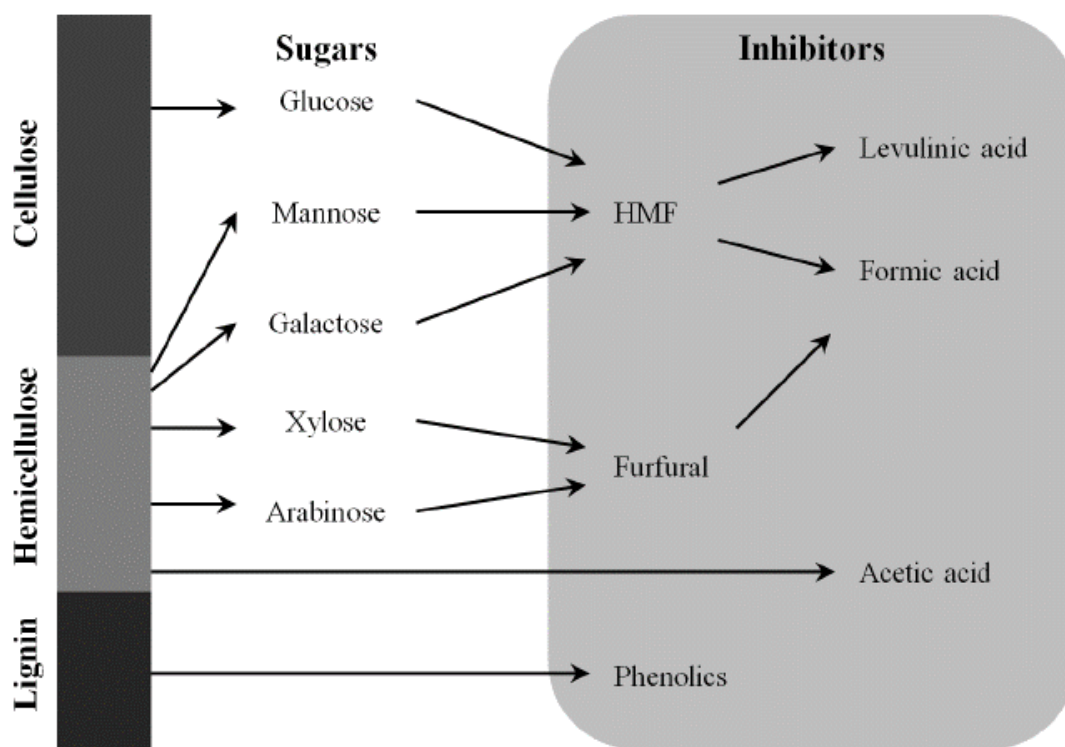
Cellulose is zeer kristallijn in structuur en is minder vatbaar voor hydrolyse door hoge druk verzadigde stoom in vergelijking met hemicellulose.

Inhoudsstoffen²⁰ en in water en zuur oplosbare mineralen eindigen in het stoomexplosiecondensaat.

¹⁹ Door hydrolyse van de acetylgroepen in hemicellulose. De acetylgroepen vormen onder meer de binding tussen hemicellulose en lignine.

²⁰ Dit kunnen looistoffen, vluchtige oliën, vetten, harsen, wassen, gommen en zetmeel zijn.

Figuur 15 – Afbraakmechanismen en afbraakproducten



Tabel 13 – Overzicht van reactieroutes bij stoomexplosie

$(\text{Cellulose})_n + n \text{ H}_2\text{O} \rightarrow n \text{ glucose}$ $(\text{Cellulose})_n + n \text{ H}_2\text{O} \rightarrow n \text{ Glucose Oligomeer}$ $(\text{Cellulose})_n \rightarrow n \text{ HMF} + 2n \text{ H}_2\text{O}$ $\text{Sucrose} \rightarrow \text{HMF} + \text{Glucose} + 2\text{H}_2\text{O}$ $(\text{Hemicellulose})_n + n \text{ H}_2\text{O} \rightarrow n \text{ Xylose}$ $(\text{Hemicellulose})_n + m \text{ H}_2\text{O} \rightarrow m \text{ Xylose Oligomeer}$ $(\text{Hemicellulose})_n \rightarrow n \text{ Furfural} + 2n \text{ H}_2\text{O}$ $\text{Acetaat} \rightarrow \text{azijnzuur}$	$\text{Galactan} \rightarrow \text{Galactose}$ $\text{Galactose} \rightarrow \text{HMF}$ $\text{Lignine (HMW)} \rightarrow \text{Lignine (LMW)} \rightarrow \text{Lignine (gecondenseerd)}$ $\text{Lignine (LMW)} + \text{HMF} \rightarrow \text{Lignine (gecondenseerd)}$ $(\text{Lignine})_n \rightarrow n \text{ Oplosbare Lignine}$
--	---

Een deel van de biomassa ontwijkt tijdens het stoomexplosieproces als emissies van vluchtige verbindingen naar lucht. Informatie over hoeveel materiaal en wat voor soort verbindingen dit betreft lijkt nog niet beschikbaar.

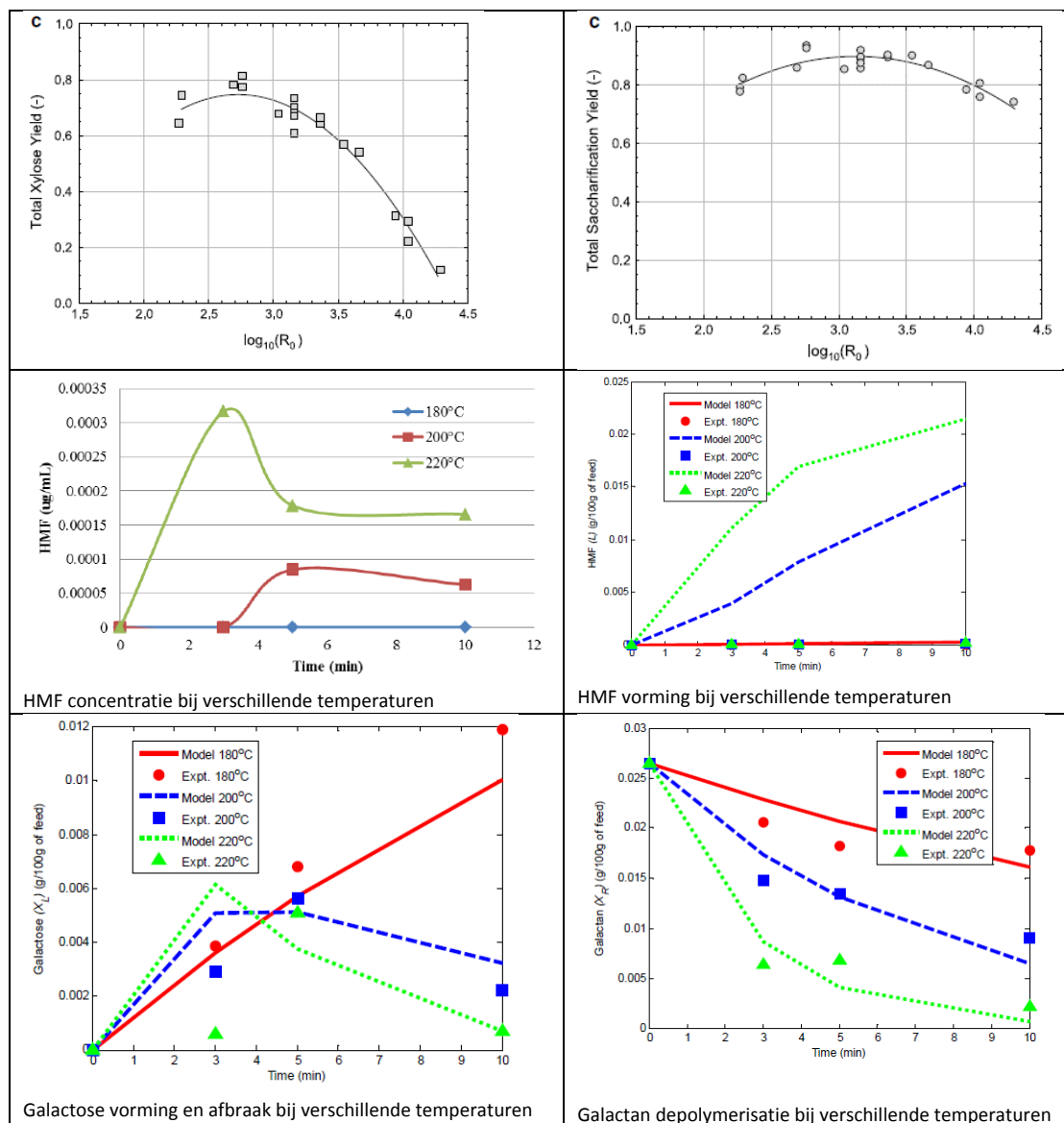
Gevormde aldehyden en zuren remmen de productiviteit van enzymen bij eventuele verwaarding van het stoomexplosiecondensaat.

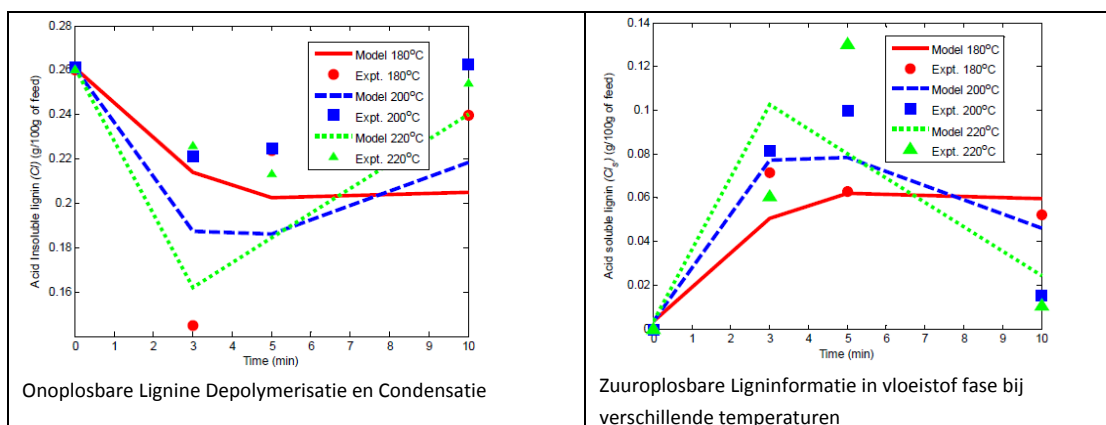
B.2 Indicatie van effect van procescondities

Om een indicatie te geven van de gekozen tijdsduur van blootstelling en de gekozen temperatuur is hieronder een aantal figuren uit geraadpleegde literatuur ingevoegd. Severity is daarbij gedefinieerd

als $R_0 = t \cdot e^{\frac{T-100}{14.75}}$ waarin t tijdsduur (in minuten) en T de temperatuur (in °C) zijn. De constante 14.75 representeert een Arrhenius constante gerelateerd aan reactiesnelheid.

Figuur 16 – Voorbeelden van effecten van reactiecondities op productvorming en vorming van afbraakproducten





Zoals geïllustreerd is het gehalte aan xylose in oplossing bij een severity van ongeveer 3 maximaal. Bij langere verblijftijden en hogere temperaturen neemt de xyloseconcentratie af, terwijl vorming van stoorstoffen toeneemt.

HMF bijvoorbeeld wordt pas gevormd bij temperaturen boven de 200°C, terwijl bij temperaturen boven de 220°C binding in lignine en afbraak tot zuren plaatsvindt.

B.3 Begroting voor een 200 ktpy-installatie

Een kopie van de door Arbaflame opgestelde begroting voor een installatie met een productiecapaciteit van 200 kton/jaar aan pellets uit stoomexplosie voorbehandeld houtig materiaal is hieronder ingevoegd.

COLOR CODES: RED: Input for Arbafl; BLUE: Input for Project Owner to update BLACK: Formulas					
SUMMARY					
OVERVIEW					
Plant name	Template	Project financials			
Country	Template	Gross investment inc. W/C	EURm	48	
Delivered to	Template	Net investment (after grant)	-	36	
Technology	Arbacore	EBITDA	-	5	
Plant capacity (tpy)	200.000	Project IRR 15 YR	%	9	
Currency	EUR	Equity IRR 15 YR	%	17	
		Production summary		EUR/MWh	EUR/pellet tonne
		S-Price CIF		40	210
		Overseas	0	0	
		S-Price FOB	40	210	
		Port and inland Transport	0	0	
		S-Price ex-works	40	210	
		Ex-works costs	35	184	
PLANT OPEX & CAPEX					
GENERAL PROPERTIES					
Pellets production	tonnes/year	200.000			
Pellets volume	m3/year	256.410			
Moisture content pellets	%	6%			
Energy value pellets	MWh/bdt	5,70	20,52		
Energy value pellets	MWh/tonne	5,30	19,1424	19,08	2427,77778
Density factor - pellets	mt/m3	0,78			
Production hours	pellet tonnes/hour	26,7			
Production hours	pellet bdt/hour	25,1			
Production hours	hours	7.500			
Tax rate	%	30%			

FEEDSTOCK							
Needed dry feedstock	tpy		212.911				
Moisture content (NAR)	%	50%					
Wet Feedstock	tpy		425.821				
Weighted average yield loss	%	12 %					
m3/dry tonne solid	x	2.2					
m3/dry tonne loose	x	6.6					
Logs	yes/no	yes	1				
	EUR/m3 dry loose	EUR/m3 dry solid	EUR/tonne wet	EUR/bdt	EURm	EUR/pellet tonne	
Wet Feedstock price	22	65	72.5		145	30.9	154.4
Transport into plant	-	-	-		-	-	-
Handling into plant	-	-	-		-	-	-
Sawdust preparation (e.g. debarking)	1	2	2		4	1	4
Total Feedstock cost	23	67	75		149	32	159

ENERGY USE							
Net boiler load	MW	20.5					
Net steam need	GWh		154				
Power cost	EUR/MWhe	35.0					
Steam, net unit price (incl. Bark if applicable)	EUR/MWhe	7.0					
Methane production effect	MW	0.0					
Methane production	GWh	0.0					
Methane price	EUR/MWhe	44.9					
		kWh/tonne pellets	GWh	EUR/MWh	EURm	EUR/pellet tonne	
Energy for steam need			770	154	7	1.1	5.4
Electricity use from external			160	32	35	1.1	5.6
Methane (internal sales)			-	-	45	-	-
Total Energy costs			930	186	87	2	11

LABOR							
Manpower	# FTEs		8				
Sosial	%	20%					
	Number	Rate		Sosial	EURm	EUR/pellet tonne	
Manpower	8	53.878	EUR/YR	20%	0.5		3
Adm (acct, office, travel, legal, misc) cost	1	300.000	EUR/YR			0.3	2
Local - lease area			EUR/YR			-	0
Ops services/maintenance	36	1.5 %	of CAPEX			0.5	3
Local property taxes etc	36	0.0 %	of CAPEX			-	-
Ops & adm cost - semi fixed					1.4	6.8	

OTHER							
Supplies & barking - variable	EUR/tonne				EURm	EUR/pellet tonne	
Mill supplies, consumables, ash disposal etc.	2.5					0.5	2.5
Total	2.5				0.5		2.5
Sales & Licensing cost	Number	Rate			EURm	EUR/pellet tonne	
Royalty per ton		200.000	5.0	EUR/tonne		1.00	5
Total					1.0	5.0	

TRANSPORT							
Overseas							
				EUR/MWh	EURm	EUR/pellet tonne	
Transport to port				-	-	0	
Port - storage & loading				-	-	0	
Overseas w/empty return				-	-	0	
Export taxes				-	-	0	
Transport, Port & Overseas				-	0.0	0	

OPEX SUMMARY							
Cash OPEX		EUR/MWh		EURm		EUR/pellet tonne	
Feedstock				30		32	159
Energy				2		2	11
Labor				1	1.4	7	
Other				1	1.5	8	
Ex works costs				35		37	184
Port & Inland transport				-		-	
FOB costs				35		37	184
Overseas				-		-	
CIF Template				35		37	184

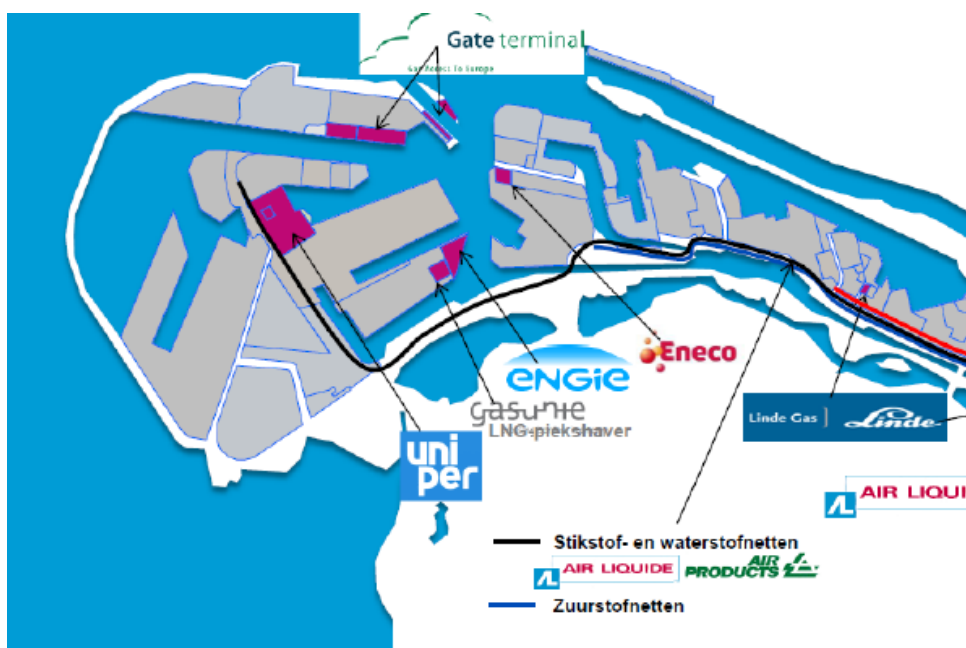
CAPEX						
Summary						
Equipment incl install	EURm		29			
Eng. Land & Civil	"		17			
Contingency	"		-	0%		
CAPEX Plant	"		45			
Working Capital, interest & Start-up	"		2			
Gross investment	"		48			
Grants	"		11	25%		
Net Investment	"		36			
Equipment incl install						
Boiler	"					
Debarker	"	3.0			If logs as input under "Feedstock" section	
Downsizer	"	1.8			If required	
Pre dryer	"	3.0				
Arbakit	"	10.0				
Post dryer	"	4.3				
Pelletizing	"	3.2				
WWT	"	0.0				
Silos and Conveyors	"	3.6			Reduced 40% due to limited storage need	
Sum Equipment incl install	"		28.9			
Eng. Land & Civil						
BoP	EURm		3.0			
El/Scada	"		3.0			
Civil	"		5.5			
Project execution	"		5.0			
Sum Eng. Land & Civil	"		16.5			
Working Capital, interest & Start-up						
Constr Interest & insur/duty	EURm		-			
Pre dvp sunk cost	"		-			
Start-up cost 2 mths	"		0.5			
WC, Receiv & Storage (30d)	"		1.8			
Sum Working Capital, interest & Start-up	"		2.3			
Exchange rates						
Updated 31/7/2016						
From/To	NOK	EUR	USD	AUD	CAD	Exchange rate
NOK	1.00	0.11	0.12	0.17	0.15	0.11
EUR	9.31	1.00	1.11	1.58	1.43	1.00
USD	8.36	0.90	1.00	1.42	1.29	0.90
AUD	5.88	0.63	0.70	1.00	0.90	0.63
CAD	6.50	0.70	0.78	1.11	1.00	0.70

C Terrein Centrale Rotterdam



Het door Engie zelf benutte terrein beschikt over een kade geschikt voor aanleg van Panamax-schepen. Er is een gasaansluiting op het HTL-aardgasnetwerk, riool, koelwater en drinkwater.

Er is geen directe aansluiting op pijpleidingnetwerken voor waterstof, zuurstof, stikstof of CO₂, maar deze liggen wel in de buurt. De zuurstofleiding loopt tot aan BP aan de overkant van het Beergat, de waterstofleiding loopt naar Neste aan de Antarcticaweg op de Maasvlakte II.



D Bibliografie

- 100 ACRE FILMS, 2012. *Solar Turbines Coke Oven Gas Video*. [Online]
Available at: www.100acrefilms.com/solar-turbines-coke-oven-gas-video/,
www.gepower.com/content/dam/gepower-pgdp/global/en_US/documents/technical/ger/ger-4601b-addressing-gas-turbine-fuel-flexibility-version-b.pdf
[Geopend 2018].
- A.K. Sharma, M. R. S. K., *sd Modelling product composition in slow pyrolysis of wood*. [Online].
- Anonymus, 2006. *China: Technical Assistance for the Sustainable Development of the Non-Wood Pulp and Paper Industry*, Helsinki: Savcor Indufor Oy.
- Antonietti, M., 2009. *Hydrothermal carbonization: basics and recent progress HTC: Grundsätzliches und Fortschritte*, Potsdam: Max Planck Institute of Colloids and Interfaces.
- Avalon Industries, 2017. *PEF- The next generation polymer*. [Online]
Available at: www.meetingpack.com/wp-content/uploads/2017/06/1-5-AVALON_MeetingPack_2017.pdf
[Geopend 2018].
- Avalon Industries, 2018. *Homepage : Welcome to the future of bio-based chemistry*. [Online]
Available at: <http://www.avalon-industries.com/web/pages/en/home.php?lang=EN>
[Geopend 2018].
- Boerderij.nl, 2018. *Prijs voor hooi en stro gaat omhoog*. [Online]
Available at: <https://www.boerderij.nl/Rundveehouderij/Achtergrond/2018/3/Prijs-voor-hooi-en-stro-gaat-omhoog-262677E/>
[Accessed 2018].
- Bolhar-Nordenkamp, M. & Isaksson, J., 2016. *Operating experiences of large scale CFB-gasification plants for the substitution of fossil fuels*, Conference: 24th EUBC, At Amsterdam. Tampere, Valmet Technologies Oyj.
- CCM, data & Business Intelligence, 2016. *CCM: China's market price of furfural bounces back in April*. [Online]
Available at: <http://www.cnchemicals.com/Press/86385-CCM:%20Chinas%20market%20price%20of%20furfural%20bounces%20back%20in%20April.html>
[Accessed 2018].
- Chempolis, 2017. *The future is Non-Wood Papermaking*, Oulu: Chempolis.
- DOE/NETL, 2015. *Cost and Performance Baseline for Fossil Energy Plants : Volume 1b: Bituminous Coal (IGCC) to Electricity, Revision 2b – Year Dollar Update*, Pittsburgh et al.: United States Department of Energy (DOE), National Energy Technology Laboratory (NETL)C.
- E4tech (UK) Ltd; RE-CORD: WUR, 2015. *From the Sugar Platform to biofuels and biochemicals, Final report for the European Commission Directorate-General Energy*, Brussels: European Union.
- ECN, 2006. *Production of Synthetic Natural Gas (SNG) from Biomass Development and operation of an integrated*, Petten: ECN.
- Erlach, B., Benjamin, W. & Tsatsaronis, G., 2011. *Co-production of electricity, heat and biocoal pellets from biomass: a techno-economic comparison with wood pelletizing*, Paper at the World Renewable Energy Congress 2011-Sweden, 8-13 May 2011, Linköping. Berlin, Technische Universität Berlin, Institute for Energy Engineering.
- GE Energy, 2008. *Jenbacher gas engines : Profusa/Coke Factory, Bilbao, Spain*. [Online]
Available at: www.gepower.com/content/dam/gepower-pgdp/global/en_US/distributed-power-downloads/documents/2008_ge_ref_cokegas_profusa_e.pdf
- General Electric Company, 2011. *Addressing Gas Turbine Fuel Flexibility : GER4601 (05/11) revB*. [Online]
Available at: <https://www.gepower.com/content/dam/gepower->

[pgdp/global/en_US/documents/technical/ger/ger-4601b-addressing-gas-turbine-fuel-flexibility-version-b.pdf](#)

[Geopend 2018].

Gusakova, A., 2016. *The Competitive Analysis of Selected Biorefineries in Finland*, Lappeenranta (FI): Lappeenranta University of Technology.

Hamelinck, C., 2004. *Outlook for advanced biofuels*, Utrecht: Universiteit Utrecht.

Holubcik, M., Jandacka, J. & Malcho, M., 2015. Ash melting temperature prediction from chemical composition of biomass ash. *The Holistic Approach to Environment*, 5(3), pp. 119-125.

Hubschneider, H., 2014. *Energetische und chemische Anwendungsszenarien aus HTC-Prozessen: Kohle, Aktivkohle und 5-HMF, HTP-Fachforum Biobasierte hydrothermale Prozesse –Technologien zur stofflichen und energetischen Nutzung 11-12 November 2014 Leipzig*. Leipzig, DBFZ Deutsches Biomasseforschungszentrum gemeinnützige GmbH.

ICS, 2013. *Price and market trends: Europe acetone prices firm*. [Online]

Available at: <https://www.icis.com/resources/news/2013/02/22/9643472/price-and-market-trends-europe-acetone-prices-firm/>

[Geopend 2018].

IEAGHG, 2017. *Techno-Economic Evaluation of SMR-Based Standalone (Merchant) Plant with CCS*, Cheltenham: IEAGHG.

IFC, 2006. *International Finance Corporation (IFC) in China: Technical Assistance for the Sustainable Development of the Non-Wood Pulp and Paper Industry*, Helsinki: Savcor Indufor Oy.

IFC, 2013. *Producing Cellulose from Straw : Opportunities in Ukraine*, Kyiv (Ukraine): International Finance Corporation (IFC) World Bank Group.

Isaksson, J., 2017. *State of art fluid bed gasifiers and boilers for biomass and wastes*. Fluidized bed conversion of biomass and waste, IEA Bioenergy, p. 48.

Kaasalainen, J., Kallio-Könnö, M. & Isaksson, J., 2018. *12th International Conference on Fluidized Bed Technology*. sl, sn, pp. 1119-1127.

KIT, 2014. Biomasse zu Kunststoff : Innovationsprojekt. *Research to Business : Newsletter Technologietransfer und Innovation*, Issue 3, pp. 1-3.

Kläusli, T., 2014. *HYDROTHERMALE CARBONISATION FOR WASTE WATER SEWAGE SLUDGE A SOLUTION FOR THE NETHERLANDS?*. Zug: AVA-CO2.

Kläusli, T. M., 2015. *Sugar Based Chemistry*, PowerPoint-Presentation. Muttentz, AVA-CO2.

Kolin, C., 2016. *Supplement No. 1 dated November 30, 2016 to Preliminary Limited Offering Memorandum dated October 28, 2016 \$130,000,000 Washington Economic Development Finance Authority's Environmental Facilities Revenue Bonds, Series 2016A (Columbia Pulp I, LLC Project)*. Greenberg Traurig, LLP: Chicago.

L. Mancuso, F. R., 2015. *Biomass gasification for the production of SNG: a practical route through available and new technologies*. sl, ANIMP, p. 27.

Leponiemi, A., 2011. *Fibres and energy from wheat straw by simple practice*, Espoo: VTT Technical Research Centre of Finland.

Lesjean, B. et al., 2014. *Energie- und CO2-Bilanz von HTC im Vergleich zu konventionellen Verfahren der Klärschlammbehandlung, Veranstaltung des Bundesverbands HTC at IFAT Trade Fair for Water, Sewage, Waste and Raw Materials Management. Munich. Germany. 5-9 May 2014*, Berlin: Kompetenz Zentrum Wasser.

Mühlenhoff, J. et al., 2017. Holzenergie in Deutschland: Status Quo und Potenziale. *Renews (Agentur für Erneuerbare Energien e. V.)*, Issue Spezial 82, pp. 1-36.

Müller-Langer, F., 2011. *Analyse und Bewertung ausgewählter zukünftiger Biokraftstoffoptionen auf der Basis fester Biomasse*, Hamburg: Technischen Universität Hamburg-Harburg.

MWM, 2017. *Efficiency on a new level : For natural gas and biogas with an output from 3,300 to 4,500 kWel*. [Online]

Available at:

http://www.mwm.net/files/upload/mwm/issuu/MWM14015_LBro_2017_TCG2032B_210x297mm_E N RGB 3 0 RZ_sl_screen.pdf

MWM, sd *Italiana Coke, Italia*. [Online]
 Available at: <https://www.mwm.net/mwm-chp-gas-engines-gensets-cogeneration/gas-applications/references/steel-and-chemical-industry-syngas-coking-gas/italiana-coke-italia/>
 [Geopend 2018].

Neumann, S., 2015a. *HTC-Klärschlammverwertung inkl. Phosphorrückgewinnung*, AVA-CO2 Schweiz AG, *Symposium zur Klärschlammverwertung, INTERREG IV B NWE, BioenNW, April 2015*, Zug (CH): AVA-CO2.com.

Neumann, S., 2015b. *LAV Fachtagung. Planung und Vision Klärschlammverwertung ab LAV Landwirtschaftliches Verarbeitungszentrum Markranstädt GmbH*. sl, AVA-CO2 Schweiz AG.

Palonen, J., 2012. *Gasified Biomass for Biofuels Production : Foster Wheeler's Technology Developments for Large Scale Applications*, presentation at *Gasification Technologies Conference 2012 – Washington*. sl, Foster Wheeler.

Pulp & Paper Canada, 2018. *Taking sustainability to a new level : With its new facility, Columbia Pulp joins the roster of firms delving into wheat straw pulp production*. [Online]
 Available at: <https://www.pulpandpapercanada.com/innovation/taking-sustainability-to-a-new-level-1100000964>

Ramke, H.-G., Blöhse, D., Lehmann, H.-J. & Fettig, J., 2009. *Hydrothermal Carbonization of Organic Waste, paper at the Sardinia 2009: Twelfth International Waste Management*. Hoexter (DE), University of Applied Sciences Ostwestfalen-Lippe.

Rofouie, P., Moshkelani, M., Perrier, M. & Paris, J., 2014. A modified thermodynamic equilibrium model for woody biomass gasification. *The Canadian Journal of Chemical Engineering*, 92(4), pp. 593 - 602.

Rousu, P., 2015. *The future is Biorefining : Biorefinery concepts for non-wood raw materials*, Oulu: Chempolis.

Saveyn, H. et al., 2016. *Towards a better exploitation of the technical potential of waste-to-energy*, Seville: European Commission.

Schuhmann, R., 2012. *Tagungsband zum ersten Karlsruher Workshop Folgenutzung von Deponien“ auf dem Windmühlenberg Karlsruhe, 21. Mai 2012*, Karlsruhe: CMM, Karlsruher Institut für Technologie.

Siemens Industrial Turbomachinery , 2008. *Fuel-Flexible Gas-Turbine Cogeneration, paper at th Power-Gen Asia , Kuala Lumpur*. [Online]
 Available at: <http://m.energy.siemens.com/US/pool/hq/energy-topics/pdfs/en/gas-turbines-power-plants/Fuel-Flexible-Gas-Turbine-Cogeneration.pdf>
 [Geopend 2018].

Snelders, J. et al., 2014. Biorefining of wheat straw using an acetic and formic acid based organosolv fractionation process. *Bioresource Technology*, 156(March), pp. 275-282.

STORK, sd *Syngas Fired Steam Boiler : for a speciality- Waste melting Plant*. [Online]
 Available at: <https://www.stork.com/en/markets-references/references/syngas-fired-steam-boiler>
 [Geopend 2018].

The Associated Press, 2015. *Kimberly-Clark Makes Bet on Bamboo and Straw*. [Online]
 Available at: https://www.nytimes.com/2015/04/13/business/international/kimberly-clark-makes-bet-on-bamboo-and-straw.html?_r=0

The Guardian, 2015. *Sprint to switch to wheat straw paper in two-month sustainability trial*. [Online]
 Available at: <https://www.theguardian.com/sustainable-business/2015/jun/04/sprint-telecom-sustainable-paper-production>

Wakatsuki, K., 2015. *Acetyls Chain – World Market Overview, presentation at Chemicals Committee Meeting at APIC 2015 Seoul*. [Online]
 Available at: <https://www.slideshare.net/TecnonOrbichem/apic2015-keiji-wakatsuki>
 [Geopend 2018].

Weiner, B., Baskyr, I., Pörschmann, J. & Kopinke, F.-D., 2012. *HTC-Prozesswasser: Verwertung oder Entsorgung? : Wissensstand und Lösungsansätze, presentation 73. Symposium des ANS, Berlin, 19.-20.9.2012*, Leipzig: Helmholtz Centre for Environmental Research UFZ.



XEBEC, sd H2X SOLUTIONS® - PSA-H3200-G2/3/4. [Online]

Available at: <http://www.xebecinc.com/hydrogen-purification-h3200.php>

[Geopend 2018].

Zubair, M. et al., 2017. *Using wind energy to supply green hydrogen to refineries at the Port of Rotterdam : a Prefeasibility study*, Rotterdam: Port of Rotterdam.