

**Stookgasreiniging,  
een overzicht van kennis en faciliteiten bij ECN**

J.P.A. Neeft

Revisies		
A		
B		
Opgesteld door:  J.P.A. Neeft	Goedgekeurd door:  J. Prij	ECN-Biomassa  Werkeenheid: Ontwikkeling en Toepassing
Geverifieerd door:  J. Beesteheerde	Vrijgegeven door:  H.J. Veringa	

## Verantwoording

Dit rapport is gemaakt als onderdeel van het ECN project "Onderzoek en ontwikkeling van pyrolyse voor de verwerking van specifieke reststromen" (projectnummer 7.2147). Dit project is door ECN uitgevoerd in de periode juli 1998 tot heden (verwachte einddatum juni 2000). Het rapport doet verslag van een onderdeel van dit project, namelijk onderdeel 8 uit de projectbeschrijving "Stookgasreiniging, overzicht kennis en faciliteiten ECN".

## Abstract

The cleaning of fuel gases from gasification of coal and biomass has been a major point of research at ECN (The Netherlands Energy Research Foundation) since 1990. In the early years (1990 - 1996) most of the work was performed within the ECN unit Fossil Fuels. In this period, the work was focussed on cleaning of fuel gases from gasification of coals. In more recent years (starting from 1995) research on fuel gas cleaning is also performed within the Biomass programme of ECN.

This report describes ECN's current (January 2000) knowledge and research facilities in the field of fuel gas cleaning. The knowledge of ECN relates to dehalogenation, desulphurisation and the removal of dust, alkali metals, tars and  $\text{NH}_3/\text{HCN}$  from coal and biomass derived fuel gases. The research facilities vary from laboratory scale ( $1 \text{ m}_n^3/\text{hour}$ ) to bench scale ( $200 \text{ m}_n^3/\text{hour}$ ) en can be fed with model gases as well as with the fuel gases from three biomass gasifiers.

# INHOUD

SAMENVATTING	4
INLEIDING	5
1. OVERZICHT VAN KENNIS OVER STOOKGASREINIGING BIJ ECN	5
1.1 Algemeen (biomassa)	5
1.2 Dehalogenering van stookgassen	6
1.3 Ontzwaveling van stookgassen	6
1.4 Ammoniakverwijdering uit stookgassen	6
1.5 Teerverwijdering uit stookgassen	7
2. OVERZICHT VAN TESTOPSTELLINGEN VOOR STOOKGASREINIGING BIJ ECN	9
2.1 Overzicht van ECN testopstellingen	9
2.1.1 ERECON-plant	10
2.1.2 HPG opstelling	10
2.1.3 De ROS plant	10
2.1.4 De PT reactor (riser reactor)	11
2.2 Het 'GASREIP' project	11
3. LITERATUUR	13
BIJLAGE 1 BESCHRIJVING VAN VERGASSINGS-, VERBRANDINGS- EN PYROLYSE-INSTALLATIES VAN ECN	15

## SAMENVATTING

Stookgasreiniging is sinds het begin van de jaren negentig een speerpunt binnen het vergassingsonderzoek bij ECN. In de beginfase (1990 - 1996) is het meeste werk verricht binnen de unit Fossiele Brandstoffen met als doel de reiniging van stookgassen uit kolenvergassing. De laatste jaren (vanaf 1995) is het werkterrein van ECN verbreed naar biomassavergassing en wordt ook in dit werkterrein aandacht besteed aan stookgasreiniging.

In dit rapport worden de kennis en onderzoeksinstallaties beschreven waarover ECN op dit moment (januari 2000) beschikt. De kennis heeft met name betrekking op dehalogenering, ontzwaveling, en verwijderen van stof, alkalimetalen, teren en  $\text{NH}_3/\text{HCN}$  uit de stookgassen die ontstaan bij het vergassen van biomassa en kolen. De onderzoeksinstallaties variëren in schaal van laboratoriumschaal ( $1 \text{ m}_n^3/\text{uur}$ ) tot bench-schaal ( $200 \text{ m}_n^3/\text{uur}$ ) en kunnen worden gevoed met zowel modelgassen als stookgassen uit een drietal biomassa vergassingsinstallaties.

## INLEIDING

Stookgasreiniging is sinds het begin van de jaren negentig een speerpunt binnen het vergassingsonderzoek bij ECN. In de beginfase (1990 - 1996) is het meeste werk verricht binnen de unit Fossiele Brandstoffen met als doel de reiniging van stookgassen uit een kolenvergassingsinstallatie. De laatste jaren (vanaf 1995) is ook binnen de werkeenheden Biomassa conversietechnologie onderzoek verricht naar stookgasreiniging.

Veel werk is verricht binnen een drietal grote studies naar hoge temperatuur stookgasreiniging. De eerste studie werd in de periode 1989-1990 in opdracht van Novem uitgevoerd door ECN, KEMA en TNO [1]. In deze Novem-studie is onderzoek verricht naar verwijdering van H<sub>2</sub>S/ COS [2], HCl/HF [3], alkali metalen en overige spore-elementen [4], stof [5] en NH<sub>3</sub>/HCN [6].

De tweede studie betrof de ontwikkeling en het testen van absorbentia voor hoge temperatuur ontzwaveling. Dit werk werd uitgevoerd in een Joule I project (EC-JOUF-0045) met KEMA, Foster Wheeler, GASTEC en Universiteit van Utrecht waarin kansrijke absorbentia op labschaal werden getest [7], en in een Joule II project met als doel het ontwikkelen van commerciële absorbentia, verbeterde reactorconcepten en opschaalregels [8].

De derde studie betrof de ontwikkeling en het testen van absorbentia voor hoge temperatuur dehalogenering. Dit werk is uitgevoerd in een APAS studie [9] en vervolgens een Joule II project (JOU2-CT93-0431), dat liep van eind 1992 tot 1996 in samenwerking met bijna 20 Europese partners [10]. Het ECN heeft in deze projecten onderzoek verricht naar hoge temperatuur dehalogenering met op Ca- en Na-gebaseerde absorbentia.

Het voorliggende rapport is gemaakt als onderdeel van het ECN project "Onderzoek en ontwikkeling van pyrolyse voor de verwerking van specifieke reststromen" (ECN projectnummer 7.2147) dat is uitgevoerd in de 1998, 1999 en 2000. Het rapport doet verslag van een onderdeel van dit project, namelijk onderdeel 8 uit de projectbeschrijving "Stookgasreiniging, overzicht kennis en faciliteiten ECN". Dit onderdeel van het project werd uitgevoerd met als doel om alle binnen ECN aanwezige kennis en experimentele faciliteiten rond stookgasreiniging in een document vast te leggen.

In het eerste hoofdstuk van dit rapport wordt een overzicht gegeven van de over de jaren opgebouwde kennis rond stookgasreiniging bij ECN. In hoofdstuk 2 worden de testopstellingen beschreven waarover ECN beschikt. De bij ECN aanwezige biomassa pyrolyse- en vergassingsinstallaties staan beknopt beschreven in Bijlage 1.

## 1. OVERZICHT VAN KENNIS OVER STOOKGASREINIGING BIJ ECN

In dit hoofdstuk 1 wordt een overzicht gegeven de in de afgelopen 10 jaar vergaarde kennis van ECN op het gebied van stookgasreiniging. Omdat veel van deze kennis in opdracht van het bedrijfsleven en/of als afstudeeropdracht is verricht, is geen openbare rapportage aanwezig. De geciteerde literatuur is daarom doorgaans niet opvraagbaar.

### 1.1 Algemeen (biomassa)

Recent is in opdracht van Novem een literatuurstudie verricht naar de stand van zaken op het gebied van stookgasreiniging voor stookgassen uit biomassa vergassing [11]. Deze studie kan bij Novem (via MHP, fax. 0343 - 44 19 36) worden aangevraagd.

## 1.2 Dehalogenering van stookgassen

In de periode 1990 - 1995 is bij ECN onderzoek verricht naar absorptieve HCl verwijdering uit stookgassen [9,10,12]. In 1992 is een zeer uitvoerige literatuurstudie verricht waarin ook de patentliteratuur is doorgespit. Een aantal absorbentia is uitvoerig getest, waaronder Na-houdende absorbentia in de ROS-plant (zie paragraaf 2.1.3) en in een vast bed reactor, en calcium houdende absorbentia in een vast bed reactor. Voor verdere procesontwikkeling van hoge temperatuur dehalogenering, gebaseerd op pneumatische injectie van kleine sorbentdeeltjes in een stookgas, zijn vervolgens bench-scale testen uitgevoerd in een riser-reactor van de ERECON-plant (zie paragraaf 2.1.1) [12]. De resultaten van deze testen zijn dat absorptie met bepaalde (Na-houdende) absorbentia snel (op seconde-schaal) plaats kan vinden. Hierdoor kan HCl absorptie in entrained reactoren mogelijk worden uitgevoerd zonder dat een separate reactor voor de absorptiestap nodig is.

Bij lage temperatuur kan HCl uit stookgassen worden verwijderd met natte gaswassing (scrubber). Binnen het GASREIP project (zie paragraaf 2.2) zal bij ECN in de eerste maanden van 2000 een scrubber worden getest en verder ontwikkeld voor verwijdering van HCl en NH<sub>3</sub> uit biomassa stookgassen.

## 1.3 Ontzwaveling van stookgassen

In de periode 1989 - 1995 is bij ECN onderzoek verricht naar regenererbare absorbentia voor hoge temperatuur stookgas-ontzwaveling. In de eerste fase van deze periode werden opstellingen gebouwd [13,14], werd een studie uitgevoerd naar thermodynamica van mogelijke absorbentie [15] en werd een literatuur en vervolgens een screenings- en exploratief onderzoek uitgevoerd naar potentiële absorbentia (actieve kool en gedragen Co-, Cr-, Fe-, Fe/Cr- (Nistelrode), Mn-, Mo en Zn-oxyden) [2,7].

In de tweede periode (het Joule II project) werden kansrijke absorbentia getest op grotere schaal met als doel het ontwikkelen van commerciële absorbentia [10,12,16].

In de ROS-opstelling is onderzoek gedaan naar de verwijdering van HCl en H<sub>2</sub>S uit de stookgassen van de MSGB (bedreven op een Poolse vlamkool). HCl en H<sub>2</sub>S werden geabsorbeerd op dolomiet (CaCO<sub>3</sub>MgCO<sub>3</sub>) en kalksteen (CaCO<sub>3</sub>). Dolomiet bleek een redelijk effectief en kalksteen een slecht absorbens voor HCl en H<sub>2</sub>S te zijn [16].

In de ERECON opstelling (zie paragraaf 2.1.1) zijn bench-scale testen uitgevoerd met een Fe-Mo-absorbens (batch D-033) die in een Joule II project [10] als zeer geschikt was bevonden [12]. De bereiding van de absorbens en de testen in de ERECON staan beschreven in rapport [12]. Zowel batch-gewijze als continue testen zijn uitgevoerd, met als voornaamste conclusie dat de absorbens zeer geschikt is voor verwijdering van H<sub>2</sub>S uit (Shell) synthesesgas. Voordat de absorbens daadwerkelijk op grote schaal kan worden toegepast is waarschijnlijk verdere optimalisatie nodig van de bereiding van de absorbens op grote schaal [12].

## 1.4 Ammoniakverwijdering uit stookgassen

In een deelstudie van de systeemstudie naar hoge temperatuur gasreiniging werd in 1989 geconcludeerd dat op het gebied van de verwijdering van ammoniak uit stookgassen nog weinig kennis voorhanden was en katalysatoren dienden te worden (verder) ontwikkeld [6]. Dit werk kreeg een vervolg met het grondig in kaart brengen van mogelijke verwijderingsroutes van NH<sub>3</sub> uit stookgassen [17]. In deze studie werd geconcludeerd dat selectieve katalytische oxydatie (SCO) meer perspectief heeft dan selectieve katalytische decompositie (SCD) als gevolg van deactivering van katalysatoren. Daarna zijn aan de Universiteit Utrecht, onder begeleiding van ECN, enkele absorbentia voor H<sub>2</sub>S alsmede een referentie katalysator getest op activiteit voor SCO van NH<sub>3</sub> [18]. Het Russische Boreskov Institute of Catalysis heeft toen een groot aantal katalysatoren voor SCO gescreend en vervolgens zijn bij ECN aanvullende testen met een aantal van de potentieel geschikte katalysatoren uitgevoerd [19]. Hoewel deze studies

interessante resultaten opleverden, is SCO voor ammonia niet verder ontwikkeld als gevolg van de teruglopende belangstelling voor kolenvergassing.

Bij lage temperatuur kan ammoniak uit stookgassen worden verwijderd met natte gaswassing (scrubber). Binnen het GASREIP project (zie paragraaf 2.2) zal bij ECN in de eerste maanden van 2000 een scrubber worden getest en verder ontwikkeld voor verwijdering van HCl en NH<sub>3</sub> uit biomassa stookgassen.

## **1.5 Teerverwijdering uit stookgassen**

De verwijdering van teren is voor kolenvergassing niet van belang omdat de temperaturen bij entrained flow kolenvergassing dermate hoog zijn dat teerverbindingen al in de reactor worden gekraakt. Om deze reden heeft teerverwijdering in het werk aan gasreiniging voor kolenvergassing geen aandacht gehad. Bij de vergassing van biomassa ontstaan grote hoeveelheden teren. In 1997 is daarom bij ECN onderzoek naar teerverwijdering gestart. De aanzet tot dit onderzoek is gegeven in de studie *'Stookgasreiniging bij vergassing van biomassa - State of the art'* [11], waaruit bleek dat teerverwijdering een zeer belangrijke, en verre van 'state of the art', stap is in de gasreiniging van biomassa vergassingsinstallaties. Vervolgens is bij ECN kennis rond biomassa teren opgebouwd [20] en zijn de bestaande en in ontwikkeling zijnde technieken voor teerverwijdering geïnteriseerd [21]. In 1999 heeft ECN ervaring opgedaan met een aantal technieken voor teerverwijdering, zoals katalytisch teer kraken [22], adsorptie van teren [23] en teer kraken in een plasma reactor (de 'GlidArc') [24]. Dit werk zal in de komende jaren worden voortgezet en uitgebreid, o.a. met verdere ontwikkeling van de plasma reactor, testen van een zaagselbed filter, thermisch kraken van teren (waarvoor een kraker wordt ingezet die samen door ECN en Gibros PEC achter een pyrolysetrommel -de 'Pyromaat'- is geplaatst), onderzoek naar teervorming en in-bed maatregelen om teerconcentraties te verlagen, vorming van aerosolen, en het verwerken van teerhoudend proceswater, o.a. door terugstoken van teren in de vergasser.





## 2. OVERZICHT VAN TESTOPSTELLINGEN VOOR STOOKGASREINIGING BIJ ECN

### 2.1 Overzicht van ECN testopstellingen

Vanwege de vele activiteiten op het gebied van stookgasreiniging binnen ECN is in de loop der jaren een groot aantal testopstellingen gebouwd om laboratorium- en bench schaal experimenten uit te voeren. In dit hoofdstuk worden deze faciliteiten besproken. Een overzicht van de beschikbare testopstellingen is gegeven in de onderstaande Tabel 1.

Tabel 1 *Overzicht van ECN testopstellingen voor onderzoek naar stookgasreiniging*

Naam reactor	Type reactor *	Grootte reactor-bed (lengte x diameter)	Condities (maximaal)	Gebruikt voor
ERECON-plant	BFB	500 (variabel) x 90 mm	700°C, 20 bar, 500 l/min	Testen absorbentia H <sub>2</sub> S-verwijdering uit stookgassen
	MB	1000 x 70 mm	700°C, 20 bar, 500 l/min	
HPG opstelling (High Pressure Gas clean-up)	VB	500 x 10 mm	600°C, 40 bar, 200 l/min	Testen absorbentia in stookgassen bij hoge temperatuur en druk
PT reactor (Pneumatisch Transport)		9000 x 50 mm	600°C, 1 bar, 200 l/min	Testen absorbentia HCl-verwijdering uit stookgassen
Riser reactor = PT reactor				
ROS plant (Regeneratieve Ontzwaveling Stookgas)	VB absorptie, VB regeneratie	1500 x 76 mm	800°C, 1 bar, 2 - 7 m <sub>n</sub> <sup>3</sup> /h	Testen absorbentia H <sub>2</sub> S-verwijdering uit stookgassen
Teerkraker katalytisch	VB	100 (variabel) x 40 mm	1000°C, 1 bar, 10 l/min	Testen teer kraak katalysatoren of adsorbentia voor teren in stookgas
Teerkraker pyromaas	**	**	1400°C, 1 bar, 250 l/min	Testen van teerkraak reacties bij hoge temperatuur

\* : BFB = Bubbling Fluidised Bed, MB = Moving Bed, VB = Vastbed

\*\* : Informatie over ontwerp is niet openbaar

De ERECON-plant, de ROS plant en de beide teerkrakers kunnen worden gekoppeld aan een of enkele van de vergassings- of pyrolyse-opstellingen. Deze opstellingen (BIVKIN, MSGB, Nargus, Pyromaas en WOB) worden om deze reden kort beschreven in Bijlage 1.

In de volgende paragrafen worden de in Tabel 1 genoemde testopstellingen beschreven. In een laatste paragraaf 2.2 zal tenslotte een korte omschrijving worden gegeven van apparaten voor

gasreiniging die op grotere schaal (100-200 m<sup>3</sup> stookgas per uur) worden beproefd binnen het project 'GASREIP' (GASREIniging en Prime mover).

### 2.1.1 ERECON-plant

De ERECON (Evaluation of REactor CONcepts) opstelling is gebouwd tijdens de looptijd van een EU-Joule II project [10] naar hoge temperatuur gasreiniging. De opstelling bestaat uit twee verschillende reactoren, een Moving Bed (MB) en een Bubbling Fluidised Bed (BFB) reactor. Beide reactoren kunnen bedreven worden bij een maximale temperatuur van 700°C en tot een druk van 20 bar. Het gasdebiet bedraagt maximaal 20 m<sup>3</sup><sub>n</sub>/uur. De reactoren zijn bedoeld voor het testen van absorbentia voor het verwijderen van H<sub>2</sub>S uit stookgas (synthetisch). De absorbentia, in de vorm van kleine korrelvormige deeltjes, kunnen continue worden aan- en afgevoerd.

#### BFB reactor:

De BFB reactor bestaat uit een geïsoleerde en extern verwarmde stalen pijp met een inwendige diameter van 90 mm. Onder in de pijp wordt via een gasverdeelplaat het fluïdisatie medium toegevoerd (stookgas of regeneratie gas). De absorbens wordt van bovenaf via een transportsluis en dipleg aan de reactor toegevoerd met een instelbaar debiet tussen 0,1 en 2,5 kg / uur. De reactor is voorzien van drie overlooppijpen op 69, 280 en 500 mm hoogte, zodat drie verschillende bedhoogten in te stellen zijn.

#### MB reactor:

De Moving Bed reactor bestaat uit een geïsoleerde en externe verwarmde stalen pijp met een diameter van ongeveer 60 mm en een lengte van maximaal 0,85 meter. De absorbens wordt bovenin toegevoerd en onderin afgevoerd. Het debiet van de absorbens ligt tussen 0,1 en 2.5 kg / uur.

Aan beide reactoren kunnen de gassen N<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub>, CO, H<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>S, en SO<sub>2</sub> of CH<sub>4</sub> gevoed worden. Ook bestaat de mogelijkheid om stookgas uit de MSGB aan de reactoren te voeden. De analysesectie bestaat uit gasmonitoren voor de continue detectie van H<sub>2</sub>S, SO<sub>2</sub>, O<sub>2</sub>, CO, CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, en H<sub>2</sub>.

Een zeer uitvoerige beschrijving van de ERECON opstelling is opgenomen in rapport [12].

### 2.1.2 HPG opstelling

De High Pressure Gas clean-up (HPG) opstelling is bedoeld voor het testen van absorbentia, in een vast bed, bij hoge druk (40 bar, mogelijk 50 bar) en temperatuur (max. 600°C). De opstelling bestaat uit een kleine reactor met een inwendig diameter van 10 mm en een lengte van ongeveer 0.5 m (verwarmde lengte). De reactor kan tot ca. 600°C verwarmd worden (klapoven). De volgende gassen kunnen aan de reactor toegevoerd worden: N<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>, CO, CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>S, HCl, H<sub>2</sub>S, H<sub>2</sub>O, O<sub>2</sub>, en SO<sub>2</sub>.

### 2.1.3 ROS plant

De ROS plant (Regeneratieve Ontzweveling Stookgas) is bedoeld voor het testen van absorbentia voor de verwijdering van H<sub>2</sub>S uit stookgas (synthetisch of uit de MSGB vergasser). De opstelling bestaat uit twee gepakt bed reactoren, die om en om voor acceptatie en regeneratie gebruikt kunnen worden. De ROS plant wordt in principe gevoed met stookgas uit de MSGB vergasser, dat d.m.v. een heater weer opgewarmd kan worden. Het systeem is uitgelegd voor een stookgas debiet van 2 - 7 m<sup>3</sup><sub>n</sub>/h.

Het stookgas uit de MSGB vergasser wordt eerst door twee kaarsen-filters (stof verwijdering) geleid, voordat het over de leidingbrug naar de ROS opstelling gaat.

Het was de bedoeling dat het stookgas naar de ROS plant door één filter geleid zou worden, terwijl de andere gespoeld werd met stikstof (voor continu bedrijf). In de praktijk bleek dat de

capaciteit van één kaarsenfilter niet toereikend was, waardoor de twee filters parallel bedreven moesten worden. Hierdoor is het niet mogelijk continu stookgas aan de ROS plant te voeden. Het onzwevelde stookgas kan weer terug gevoerd worden naar de fakkel van de MSGB vergasser, hiervoor is een blower voor de reactoren geplaatst.

De opstelling is al meerdere jaren niet meer gebruikt, de verwachting is dat de verschillende componenten zwaar zijn aangetast door zwavel. Voor een eventuele inzet van de ROS plant zal geïnventariseerd moeten worden wat de mogelijkheden tot reparatie van de opstelling zijn.

#### 2.1.4 De PT reactor (riser reactor)

De Pneumatisch Transport (PT) reactor, ook wel Riser reactor genoemd, bestaat uit een kwartsglazen buis met een lengte van 8 meter en een inwendige diameter van 50 mm. De reactor is bedoeld voor het testen van absorbentia voor dehalogenering van stookgassen (HCl verwijdering). De reactor kan elektrisch verwarmd worden tot 600°C en moet op atmosferische druk bedreven worden. Onder in de reactor kan, via een verdeelplaat, N<sub>2</sub> (max. 200 l<sub>n</sub>/min) en HCl (max. 1000 ml<sub>n</sub>/min) toegevoerd worden. De gassen kunnen worden voorverwarmd d.m.v. een elektrische heater.

Voor het toevoeren van de absorbentia (diameter 10-50 µm) is een deeltjesvoeder beschikbaar die de poeder pneumatisch naar de reactor transporteert. De gebruikte absorbentia worden, na de reactor en een koeler, op een filter afgevangen. Een HCl-detector wordt gebruikt voor analyse van het reactor gas.

De PT reactor is ondertussen, bij het verschijnen van dit rapport (begin 2000) gedemonteerd.

Een meer gedetailleerde beschrijving van de PT reactor is te vinden in rapport [12].

## 2.2 Het 'GASREIP' project

Naast de in Tabel 1 in paragraaf 2.1 genoemde testopstellingen beschikt ECN sinds eind 1999 ook over een testopstelling met de naam 'GASREIP' (GASREIniging en Prime mover). Deze opstelling bestaat uit een aantal gasreinigingsapparaten die achter de BIVKIN en de MSGB biomassa vergassers zijn geplaatst. Op dit moment zijn in deze opstelling een scrubber en een zaagselbedfilter geïnstalleerd voor verwijdering van stof, HCl, NH<sub>3</sub> en teer uit biomassa stookgassen. Binnenkort wordt achter deze gasreiniging een gasmotor geplaatst.

Het stookgas vanuit BIVKIN en MSGB wordt via een lange, geïsoleerde leiding naar de opstelling getransporteerd. Het laatste deel van de leiding is voorzien van een verwarmingsmantel zodat de temperatuur van het stookgas enigszins kan worden gevarieerd.

De opstelling en testhal zijn zo ontworpen dat relatief eenvoudig andere apparaten voor gasreiniging kunnen worden bijgeplaatst. Zo wordt in 2000 een test voorzien met de roterende deeltjesscheider (RDS) voor verwijdering van stof en teren.



### 3. LITERATUUR

1. P.T.Alderliesten, A.Brunia, G.D.Enoch, D.Jansen, H.Klein Teeselink, A.G.Melman, J.L.Raas, D.Schmal, J.F.Tummers, M.J.E.Verschoor and N.Woudstra: *Systeemstudie hoge temperatuur gasreiniging bij KV-STEG- installaties*, Utrecht (The Netherlands), Novem, 90310/8725-21421/500, 122 p. (1990).
2. D.Jansen: *Systeemstudie hoge temperatuur gasreiniging; deelstudie 2.1 - H<sub>2</sub>S/COS-verwijdering*, Petten, ECN, ECN-C--90-050, 101 p. (1990).
3. A.Brunia and D.Schmal: *Systeemstudie hoge temperatuur gasreiniging; deelstudie 2.2 - HCl/HF verwijdering*, Delft, TNO, TNO R 89/431a, 47 p. (1990).
4. P.T.Alderliesten: *Systeemstudie hoge temperatuur gasreiniging; deelstudie 2.3 - Alkali metalen en overige spore-elementen*, Petten, ECN, ECN-C--90-051, 50 p. (1990).
5. H.Klein Teeselink and P.T.Alderliesten: *Systeemstudie hoge temperatuur gasreiniging; deelstudie 2.4 - Stofverwijdering*, Petten, ECN, ECN-C--90-052 (1990).
6. F.J.J.G.Janssen: *Systeemstudie "hoge temperatuur gasreiniging". Deelstudie NH<sub>3</sub>/HCN-verwijdering*, Arnhem, KEMA, 9113-SO 89-3042, 10 p. (1989).
7. J.H.A.Kiel, A.Bos, E.P.Schenk and P.J.de Wild : *High temperature fuel gas desulphurisation process for IGCC concepts. ECN achievements in the EC-JOUF-0045 project (confidential)*, Petten, ECN, ECN-CX--95-092, 63 p. (1995).
8. J.H.A.Kiel and P.J.de Wild: *Development and testing of a HT-HP regenerative and continuous desulphurisation process for IGCC concepts. CEC project JOU2-CT92-0157. With contributions from R. Meijer, H.M. Weijers and F.J.J.G. Janssen (KEMA), N. Eckersley and R. Sambrook (DYCAT), G.L. Farina (Foster Wheeler), R. van Yperen, M.D.A. Lamers and J.W. Geus (University of Utrecht), F. Perales, J. Navarro and L. Puigjaner (Universitat Polytècnica de Catalunya) and P.J. de Wild, E. Schenk and J.H.A. Kiel (ECN)*, Petten, ECN (1994).
9. J.H.A.Kiel, A.Bos, H.den Uil and J.M.Plaum: *Coal/biomass cogasification and high temperature gas cleaning*. In: Proc. Third international conference on combustion technologies for a clean environment, Lisbon (Portugal), 3-6 July 1995, pp. 1-33, ECN, Petten (1995).
10. J.H.A.Kiel, A.Bos, P.J.de Wild, H.den Uil and M.Bracht: *Dry halogen removal process for IGCC concepts and techno-economic studies on integrated HTGC systems. Final report of the ECN contribution to the EU-Joule II project "Integrated hot fuel gas cleaning for advanced gasification combined cycle processes" (JOU2-CT93-0431)*, Petten, ECN, 26 p. (1997).
11. E.P.Schenk, S.D.Ytsma, L.P.M.Rijkema, S.van Loo and J.H.A.Kiel: *Stookgasreiniging bij vergassing van biomassa - State of the art -*, Energy from Waste and Biomass, Novem-EWAB no.9829, 72 p. (1998).
12. J.H.A.Kiel and E.P.Schenk: *Bench-scale testing of HT fuel gas cleaning concepts*, Petten, ECN, ECN-C--98-078, 51 p. (1998).
13. D.Jansen: *Regeneratieve verwijdering van H<sub>2</sub>S uit stookgas bij hoge temperatuur*, Petten, ECN, ECN-C--90-025, 39 p. (1990).
14. J.H.A.Kiel: *Hoge temperatuur stookgasontzwaveling; reactorkeuze en voorstel tot bench-scale onderzoek (vertrouwelijk)*, Petten, ECN, ECN-CX--93-117, 92 p. (1993).

15. A.Bos and R.J.M.Konings: *Thermodynamische berekeningen aan overgangsmetaal-componenten voor regeneratieve stookgas-ontzwaveling (vertrouwelijk)*, Petten, ECN, ECN-CX--92-014, 49 p. (1992).
16. E.P.Schenk and J.H.A.Kiel: *High temperature fuel gas desulphurisation. Bench-scale testing in a bubbling fluidised bed reactor*, Petten, ECN, ECN-C--94-022, 36 p. (1994).
17. R.B.J.Tabor and M.J.F.M.Verhaak: *The catalytic removal of ammonia from fuel gas (confidential)*, Petten, ECN, ECN-CX--93-145, 49 p. (1993).
18. R.B.J.Tabor and M.J.F.M.Verhaak: *The selective oxidation of ammonia (confidential)*, Petten, ECN, ECN--2358-GR 2, 21 p. (1994).
19. D.F.Bakker and A.Bos: *Selectieve katalytische oxydatie (SCO) van NH<sub>3</sub> in heet kolengas (vertrouwelijk)*, Petten, ECN, MEMO--2697-GR 1, 29 p. (1995).
20. J.P.A.Neeft: *Teren uit thermische conversie van biomassa en reststromen. 1. Definities, vorming, eigenschappen, en bemonstering en analyse*, Petten, ECN, ECN-C--99-102, 58 p. (1999).
21. J.P.A.Neeft, H.E.M.Knoef and P.Ojani: *Behaviour of tar in biomass gasification systems. Tar related problems and their solutions*, Energy from Waste and Biomass, Enschede/Petten, BTG/ECN, Novem-EWAB no.9919, 74 p. (1999).
22. M.Brendel: *Teerkraken met dolomiet als katalysator. Onderzoek naar het in-bed toepassen van dolomiet (vertrouwelijk)*, Petten, ECN, ECN 7.2150-99 GR 1, 44 p. (1999).
23. J.P.A.Neeft: *Teervrij biomassa stookgas. Experimentele resultaten 1999 (vertrouwelijk)*, Petten, ECN, ECN-CX--99-133 (2000).
24. S.V.B.van Paasen and J.P.A.Neeft: *GlidArc reactor as plasma enhanced tar cracker. Concept reporting "Proof of Principle" tests. 25<sup>th</sup> and 26<sup>th</sup> of November 1999 (confidential)*, Petten, ECN, Memo 72153-99 / GR 1 (1999).

## **BIJLAGE 1 BESCHRIJVING VAN VERGASSINGS-, VERBRANDINGS- EN PYROLYSE-INSTALLATIES VAN ECN**

### BIVKIN

De BIVKIN is een circulerende wervelbed reactor met een inwendige diameter van 20 cm en een hoogte van 6 meter. De binnenwand van de reactor bestaat uit een hitte bestendige beton laag en een isolatielaag. Het reactorvat is daardoor bestand tegen 1100°C. Aangezien het terugvoersysteem voor het circulerende zand niet voorzien is van een hitte bestendige beton laag, bedraagt de maximale bedrijfstemperatuur van de installatie 950°C. De reactor en de cyclonen zijn ontworpen voor bedrijf onder druk (max. 5 bar overdruk).

Het voedingssysteem voor de brandstof is geschikt voor het voeden van o.a. pellets, korrels en houtachtige stromen met een deeltjes grootte kleiner dan 2,5 cm. Brandstoffen dienen vooraf getest te worden, het brandstof voedingssysteem moet vaak aangepast worden aan de brandstof.

De primaire lucht naar de vergasser wordt onder aan de reactor toegevoerd (max. 250 nm<sup>3</sup>/uur) en de secundaire lucht via 4 poorten op 0,9 of 1,5 meter boven de primaire lucht (max 50 nm<sup>3</sup>/uur). De lucht kan voorverwarmd worden tot ongeveer 400 °C.

De BIVKIN heeft een thermisch vermogen van ca. 500 kW<sub>th</sub> oftewel een brandstofdebiet van maximaal 100 kg biomassa / uur.

### MSGB vergasser

De MeeStroom Glijdend Bed Vergasser is een vat met een inwendige diameter van boven 35 cm en onder 40 cm. De binnenwand van de reactor bestaat uit een hitte bestendige beton laag en een isolatielaag.

Het voedingssysteem bestaat uit een lopende band en twee voedingskleppen die als sluis systeem fungeren. Een extra doseergoot is aanwezig om brandstoffen te kunnen mengen. De brandstof wordt boven in de reactor toegevoerd. De overblijvende char wordt met een as-afvoerkegel onder in de reactor afgevoerd.

Het thermisch vermogen van de MSGB is ca. 300 kW<sub>th</sub> bij een brandstofdebiet van 70 kg biomassa per uur.

### Nargus

Nargus is een atmosferische wervelbedverbrandings-installatie. De installatie bestaat uit een wervelbed met een nominaal vermogen van 350 kW<sub>th</sub> en een bed doorsnede van 0,45 m x 0,45 m. De totale hoogte van bed en freeboard bedraagt 5,1 meter. In het bed bevindt zich een demontabele warmtewisselaar. De verbrandingslucht kan voorgewarmd worden tot 250°C.

Brandstofdosering en -voeding van vaste brandstoffen vindt plaats met een roterende sluis en een watergekoelde schroefvoeder (hetzelfde systeem als bij de BIVKIN installatie). De brandstoffen kunnen in of boven het bed gevoed worden. Olie en slurry achtige brandstoffen kunnen met diversen pompen via een persleiding gevoed worden.

De rookgassen passeren na het freeboard een warmtewisselaar. Na deze koeler passeren de rookgassen een cycloon, waarin het grootste deel van de meegevoerde stof wordt afgescheiden. Na de cycloon is een doekenfilter geplaatst.

De rookgascomponenten O<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub>, CO, NO, NO<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub>, C<sub>x</sub>H<sub>y</sub> kunnen continu gemeten worden. De stofstromen kunnen bemonsterd worden bij de cycloon en het doekfilter.

## Pyromaat

De pyromaat is een 25 kW<sub>th</sub> pyrolyse karakteriserings-opstelling voor vaste brandstoffen (o.a. shredder residu, bruingoed, elektronica afval, kabelafval en hout). Omdat een hoge temperatuur gaskraker is geïnstalleerd kan de pyromaat worden gezien als een tweetrapsvergasser.

De pyromaat bestaat uit een voedingssysteem (1-10 kg/h), een lage temperatuur pyrolyse reactor, een hoge temperatuur vergasser, een gasreinigingsunit en een naverbrander. De pyrolyse reactor is een verwarmde reactorbuis waar met een voedingsschroef vaste brandstoffen doorgevoerd worden. De oven is in temperatuur instelbaar van kamertemperatuur tot ongeveer 600°C. De draaisnelheid van de brandstofschoef is instelbaar, waardoor verblijftijd en voedingsdebiet gevarieerd kunnen worden. Bij een verblijftijd van 5 minuten bedraagt het voedingsdebiet ongeveer 2,5 kg/uur (afhankelijk van soortelijke massa van de brandstof).

De reactor wordt doorstroomd met een inert (N<sub>2</sub> of Ar) gas voor het transport van de gasvormige pyrolyse componenten en het creëren van een overdruk in het voedingssysteem. De installatie is voorzien van instrumentatie voor het meten en registreren van de gassenstelling (H<sub>2</sub>, CO, CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, C<sub>x</sub>H<sub>y</sub>, teer en stof).

Na de pyrolyse reactor wordt de char afgescheiden en opgevangen in een vat, de gasvormige componenten worden naar een gaskraker oftewel hoge temperatuur vergasser geleid. Tot voor kort was dat een U-vormige verwarmde pijp (tot 900°C), sinds eind 1999 is de pyromaat opnieuw gebouwd en is een gaskraker geïnstalleerd die bij hogere temperatuur (1400°C) kan worden bedreven. De gasvormige producten worden via een naverbrander afgevoerd.

## WOB

De Wervelbed Opstelling Biomassa (WOB) is een kleine BFB biomassa vergassingsinstallatie. De WOB wordt ingezet voor onderzoek naar het agglomeratie gedrag van het zand en as tijdens het vergassen van verschillende biomassastromen en naar vorming en verwijdering van teren tijdens vergassingsreacties. De opstelling is uitgelegd voor een brandstof input van ongeveer 1 kg/uur.

Het warmteverlies van de WOB is sterk beperkt door het toepassen van externe verwarming die het vat opwarmt tot de procestemperatuur (ongeveer 850°C). Hierdoor is het mogelijk om proeven uit te voeren bij lucht - brandstof verhoudingen die vergelijkbaar zijn met een grote (commerciële) installatie.

Het thermisch vermogen van de WOB is ca. 5 kW<sub>th</sub> bij een brandstofdebiet van circa 1 kg biomassa per uur.