

GASREIP

GASREINIGING EN PRIME MOVER DESIGN

Fase A:

Realisatie en beproeving van een basisconfiguratie
ten behoeve van biomassa warmte-kracht koppeling

L. Dinkelbach
C.M. van der Meijden
L.M. Brenneisen *
S.D. Strating *
M. Geleijn **
R. Wubbe **

* HoSt, Hengelo
** ABB, Aalsmeer



| Revisies | | |
|--------------------|--|--------------|
| A | concept eindrapport 25 augustus 2000 | |
| B | definitief eindrapport 21 september 2000 | |
| Opgesteld door: | Goedgekeurd door: | ECN-Biomassa |
| L. Dinkelbach | J. Prij | |
| Geverifieerd door: | Vrijgegeven door: | |
| J. Beesteheerde | H.J. Veringa | |

COLOFON EWAB-EINDRAPPORT

Projectnummer: 355298/2250

Dit onderzoek is uitgevoerd in het kader van het programma Energiewinning uit Afval en Biomassa (EWAB).

Beheer en coördinatie van het EWAB-programma berusten bij:

NOVEM B.V.

Nederlandse onderneming voor energie en milieu B.V.

Catharijnesingel 59

3511 GG UTRECHT

Postbus 8242

3503 RE UTRECHT

Telefoon: (030) 239 34 88 (Secretariaat EWAB)

Contactpersoon bij EWAB: K.W. Kwant

E-mail: k.w.kwant@novem.nl

EWAB geeft geen garantie voor de juistheid en/of volledigheid van gegevens, ontwerpen, constructies, producten of productiemethoden voorkomende of beschreven in dit rapport, noch voor de geschiktheid daarvan voor enige bijzondere toepassing.

Aan deze publicatie kunnen geen rechten worden ontleend.

Overname en publicatie van informatie uit dit rapport is toegestaan, op voorwaarde van bronvermelding.

Het onderzoek is uitgevoerd door:

naam contractant: Energieonderzoekcentrum Nederland (ECN)

adres: Westerduinweg 3

postbus: 1

postcode/woonplaats: 1755 ZG Petten

telefoon: 0224-564663

contactpersoon: Ludger Dinkelbach

datum rapportage: Augustus 2000

Exemplaren van dit rapport zijn schriftelijk aan te vragen en tegen betaling verkrijgbaar bij Novem Publicatiecentrum, Postbus 1305, 7301 BN APELDOORN, fax (055) 534 38 64,

E-mail publicatiecentrum@novem.nl

Het EWAB-programma wordt uitgevoerd door Novem in opdracht van het ministerie van Economische Zaken.

INHOUD

| | |
|--|----|
| SAMENVATTING | 5 |
| 1. INLEIDING | 7 |
| 1.1 Achtergrond | 7 |
| 1.2 Probleemstelling | 7 |
| 1.3 Doelstelling en werkwijze | 8 |
| 2. DE GASREIP BASISCONFIGURATIE | 9 |
| 2.1 Stookgasproductie | 9 |
| 2.1.1 Meestroom Glijdend Bed Vergasser (MGB) | 9 |
| 2.1.2 Circulerend Wervelbed Vergasser (BIVKIN) | 10 |
| 2.1.3 Uitbreiding van de bestaande installaties tot een integrale testopstelling | 10 |
| 2.2 Stookgasreiniging | 12 |
| 2.2.1 Scrubber | 13 |
| 2.2.2 Zaagselbedfilter | 13 |
| 2.2.3 Waterzuivering | 14 |
| 2.3 Stookgastoepassing | 14 |
| 2.3.1 Brandstof lucht-verhouding | 15 |
| 2.3.2 Compressieverhouding | 15 |
| 2.3.3 Ontstekingstijdstip | 15 |
| 2.3.4 Opgewekt elektrisch vermogen | 15 |
| 3. DE WERKING VAN DE GASREIP BASISCONFIGURATIE | 17 |
| 3.1 De werking van het systeem BIVKIN, gasreiniging en afvalwaterzuivering | 17 |
| 3.1.1 Gasreiniging | 18 |
| 3.1.2 Afvalwaterzuivering | 19 |
| 3.2 De werking van het systeem MGB, gasreiniging en gasmotor | 20 |
| 3.2.1 Gasreiniging | 21 |
| 3.2.2 Gasmotor | 23 |
| 3.3 Overige resultaten uit de test | 26 |
| 4. CONCLUSIES | 27 |
| 4.1 Algemeen | 27 |
| 4.2 Prestatie van de gasreiniging en de afvalwaterzuivering | 27 |
| 4.3 Prestatie van de gasmotor | 28 |
| 5. AANBEVELINGEN EN VOORUITZICHT OP FASE B | 29 |
| REFERENTIES | 31 |
| BIJLAGE A SCHEMA VAN DE INTEGRALE OPSTELLING GASREIP | 32 |

Verantwoording

Dit is het eindrapport van fase A van het project “GASREIP – GASREIniging en Prime mover design”, ECN projectnummer 7.2174. Dit project is uitgevoerd door ECN, HoSt en ABB en medegefinancierd door Novem, projectnummer 355298/2250.

Abstract

This is the final report of phase A of the project GASREIP. The overall objective of GASREIP is to develop and demonstrate apparatuses and concepts for the cleaning and application of producer gas from biomass gasification.

In phase A, a bench-scale test facility was designed, built and tested consisting of two biomass gasifiers (250 kW downdraft fixed bed and 500 kW circulating fluidised bed), cooler, scrubber, sawdust filter, booster, buffertank and gas engine as well as return pipes to the flares of the two gasifiers.

A test programme was carried out to determine the technical performance of the different apparatuses. The entire facility turned out to be suitable for test of several tens of hours. For longer test periods, the installation will have to be equipped with a removal system for dust and tar to avoid their accumulation in the gas cleaning section.

Gas cleaning efficiency (removal of tar, dust and NH_3) is sufficient for application of the producer gas in boilers. Tar removal is insufficient for long-duration application of the gas in engines. However, a short test (six hours of continuous operation) of the configuration downdraft gasifier, gas cleaning and gas engine was carried out successfully. The engine was operated without major problems.

Future activities making use of the test facility will have to focus on:

- more efficient tar removal to allow other gas applications (e.g. motor downstream the cfb gasifier, gas turbines, combined cycles, methane or Fischer-Tropsch reactor),
- regular/continuous removal of tar and dust from the gas cleaning section to avoid accumulation and hence to enable long duration tests, and
- modification of the gas engine to achieve a higher capacity, a higher efficiency and lower emissions.

Trefwoorden

biomassa, vergassing, gasreiniging, afvalwaterzuivering, gasmotor, gastoepassing, prime mover, warmte-kracht

SAMENVATTING

Dit is het eindrapport van fase A van het project “GASREIP – GASREIniging en Prime mover design”. De algemene doelstelling van het project GASREIP is het ontwikkelen, beproeven en demonstreren van apparaten en concepten voor de reiniging en toepassing van biomassa stookgasen bijvoorbeeld in prime movers (gasmotor, gasturbine, brandstofcel), STEG-systemen, methaniserings- of Fischer-Tropsch reactoren.

Fase A is gericht op onderzoek naar de toepassing van biomassa stookgas in gasgestookte ketels en gasmotoren. Er is een testopstelling ontworpen, gebouwd en in bedrijf gesteld bestaande uit twee vergassers (vastbed en wervelbed), gaskoeler, scrubber, zaagselbedfilter, booster, buffervat en gasmotor alsmede retourleidingen naar de fakkels van de vergassers.

Deze opstelling bleek geschikt voor het testen van gasreinigingsapparatuur achter de twee vergassingsinstallaties. Beide vergassers kunnen voldoende stabiel stookgas leveren als zij op houtpellets bedreven worden. De gasreinigingsinstallatie kan de relatief hoge concentraties van teer en stof uit BIVKIN stookgas gedurende enkele tientallen uren verwerken. Voor de uitvoering van langere duurtesten dient het gasreinigingssysteem te worden voorzien van een mogelijkheid om de in de gasreiniging opgevangen teren uit het systeem te verwijderen.

De volgende tests zijn uitgevoerd:

- Een functionele test van het systeem BIVKIN, gasreiniging en afvalwaterzuivering.
- Een functionele test van het systeem MGB en gasreiniging.
- Een functionele test (gedurende 6 uur) van het systeem MGB, gasreiniging en gasmotor.

Bij de testen is gebleken dat de voor de basisconfiguratie gekozen gasreiniging (koeler-scrubber-zaagselbedfilter) geschikt is voor korte bedrijfsperiodes van de toepassingen van stookgas in gasgestookte ketels alsmede voor de configuratie MGB-vastbedvergassing + gasmotor. Vanwege de onvoldoende verwijdering van teer uit stookgas afkomstig van wervelbedvergassing is de geteste gasreiniging niet zonder meer geschikt voor de combinatie wervelbedvergassing + gasmotor.

Gasreiniging

Zoals verwacht werd ammoniak goed verwijderd naar concentraties rond de 40 mg/m_n^3 . Stof wordt redelijk goed verwijderd, zowel bij lage als hoge stofbelastingen. Er is een verwijderingspercentage van 52-68 % voor teren bereikt. Dit is voldoende om de het stookgas uit de MGB vergasser na deze reiniging voor een korte periode te verstoken in een gasmotor. Maar het is onvoldoende indien stookgas uit de BIVKIN (hoge teerconcentratie in het stookgas) in een gasmotor verstoekt dient te worden. Om deze reden is besloten om de gasmotor achter de configuratie MGB-gasreiniging in bedrijf te nemen. Voor het verstoken van het gas op een stoomketel is de teerconcentratie van ondergeschikt belang.

Gasmotor

Na een opstartprocedure heeft de gasmotor gedurende 6 uur continu zonder problemen gedraaid. De fluctuaties in de stookgassamenstelling bleken geen problemen te veroorzaken. Echter bleek dat de geïnstalleerde gasstraat niet geschikt was voor toepassing met houtgas. Het gasdebiet was beperkt op max. ca. $100 \text{ m}^3/\text{h}$ hetgeen tot gevolg had dat het maximale vermogen met deze configuratie slechts 35 kW_{el} was. Dit kan aanzienlijk verhoogd worden door één of meerdere van de volgende maatregelen:

- Verlaging van het luchtovermaat λ naar ca. 1.1-1.2.
- Modificatie van de gasstraat t.b.v. een stookgasdebiet van ca. $160-180 \text{ m}_n^3/\text{h}$.
- Later stellen van het ontstekingsstijpstip.

Onder stabiele verbrandingscondities zijn 130-150 ppm C_xH_y , 900-1000 ppm CO en ca. 25 ppm NO_x gemeten. Bij een verdere verlaging van het verbrandingsluchtdebiet wordt de vlamtemperatuur verhoogd hetgeen tot betere verbranding en daarmee verlaging van de emissies van CO en C_xH_y in het rookgas leidt terwijl de NO_x -concentratie juist stijgt.

Aanbevelingen t.a.v. vervolg activiteiten

Naast de bovengenoemde modificaties van de gasmotor worden de volgende aanbevelingen gedaan:

- Verwarmingslint aanbrengen op de stookgas retourleiding om condensatie van water/teer te voorkomen.
- Modificatie van het systeem t.b.v. de toepassing van het volledige stookgasdebiet in de gasmotor i.p.v. het affakkelen van een deel van het stookgas.
- De stookgasleiding voor de motor dient voorzien te worden van een gasdebietmeter.
- Uitbreiding van de gasreiniging met een apparaat vóór de scrubber t.b.v. stofafvangst.
- Uitbreiding van de gasreiniging met een extra apparaat t.b.v. teerafvangst.
- De gasreiniging moet worden voorzien van een mogelijkheid om stof/teer uit het systeem af te voeren.

1. INLEIDING

1.1 Achtergrond

Biomassavergassing wordt beschouwd als een belangrijke optie voor het mede realiseren van overheidsdoelstellingen voor de opwekking van duurzame energie. In dergelijke systemen wordt biomassa in een vergassingsreactor omgezet in een stookgas. Vervolgens wordt dit stookgas gereinigd zodat het kan worden ingezet in gastoepeating zoals bijvoorbeeld een prime mover (gasmotor, gasturbine, brandstofcel), een STEG-systeem, een methaniserings- of Fischer-Tropsch reactor.

De gastoepeatingen stellen bepaalde eisen aan de zuiverheid van het stookgas. Daarnaast worden vanuit de emissieregelgeving eisen gesteld aan de zuiverheid van het rookgas, en daarmee aan de zuiverheid van het stookgas. Deze eisen zijn voor prime movers in het kader van een Novem-studie [1] in kaart gebracht. De informatie is echter nog niet volledig vanwege een gebrek aan praktijkervaring met het omzetten van stookgassen.

Een vergelijking tussen bovengenoemde eisen en de samenstelling van stookgassen uit vastbed- en wervelbed- biomassavergassers leert dat reiniging van het stookgas onontkoombaar is. Afhankelijk van de gebruikte biomassa, het gekozen vergassingsproces en de beoogde gastoepeating dient het stookgas te worden gereinigd van tenminste enkele van de componenten stof, teer, $\text{NH}_3 + \text{HCN}$, $\text{H}_2\text{S} + \text{COS}$, HCl (+HF), alkalimetalen en zware metalen [1].

Apparaten voor de reiniging van deze componenten zijn deels bekend uit andere industrieën waar product- of rookgassen worden gereinigd. Voorbeelden zijn cyclonen, doeken-, kaarsen- en elektrostatische filters, scrubbers en absorptie-bedden (met calcium-, zink- of natriumhoudende absorbentia) die worden toegepast in kolenvergassing, de procesindustrie en bij de reiniging van rookgassen uit elektriciteitscentrales en afvalverbrandingsinstallaties. De efficiëntie waarmee deze apparaten de beoogde componenten verwijderen wordt echter beïnvloed door de specifieke samenstelling van biomassa stookgassen. Zo komen in biomassa-stookgassen bijvoorbeeld hoge concentraties teer en stof voor en bevat het stof een relatief grote fractie kleine deeltjes (1 μm of kleiner).

1.2 Probleemstelling

Omdat door gastoepeatingen voor een aantal componenten zoals stof en teer strenge eisen worden gesteld aan de zuiverheid van het stookgas, is van tevoren niet bekend in hoeverre deze eisen kunnen worden gehaald met één of enkele van boven genoemde apparaten. Deze onzekerheid wordt slechts ten dele weggenomen door modellen waarin de efficiëntie van in serie geschakelde apparaten wordt berekend op basis van bekende efficiënties voor de afzonderlijke apparaten, omdat deze efficiënties vaak niet zijn bepaald voor biomassa stookgassen.

Dit knelpunt kan alleen worden weggenomen indien de afzonderlijke apparaten of de in serie geschakelde apparaten worden beproefd in integrale systemen bestaande uit een biomassa vergasser, de gasreiniging en de gastoepeating. Om deze reden is er de behoefte aan beproeven van de gasreiniging en het demonstreren van het functioneren van de gasreiniging binnen een compleet systeem. Probleem is dat er binnen Nederland geen integrale testopstelling bestaat voor het onder reële vergassingscondities testen van bestaande en in ontwikkeling zijnde apparaten voor reiniging en toepassing van biomassa stookgassen.

1.3 Doelstelling en werkwijze

De algemene doelstelling van het project GASREIP is het ontwikkelen, beproeven en demonstreren van geschikte apparaten voor de reiniging en toepassing van biomassa stookgassen. De specifieke doelstelling van fase A is de realisatie en beproeving van een basisconfiguratie bestaande uit twee vergassers, gaskoeler, natte wasser, zaagselbedfilter en gasmotor.

Realisatie van de basisconfiguratie houdt in:

- Uitbreiding van de ECN infrastructuur. Bouw van een halfopen hal t.b.v. de gasreinigingsinstallatie en de gasmotor voorzien van spanning, verlichting, water, perslucht, stikstof en aardgas. Aanleg van stookgasleidingen van de twee reeds bestaande vergassers naar de gasreinigingsinstallatie alsmede retourleidingen naar de fakkels van de twee vergassers. Het stookgas moet in de aanvoerleiding voor de gasreiniging gekoeld worden naar ca. 250 °C. M.b.v. een booster wordt het stookgas door de gasreinigingsinstallatie getrokken en op de voor de gasmotor benodigde voordruk van minimaal 25 mbar gebracht. Het leidingsysteem wordt voorzien van bypass-leidingen om de vergassers onafhankelijk van de gasreiniging en de gasmotor te kunnen (blijven) bedienen. Door het stookgas voor de gasmotor in een vat te bufferen zullen schommelingen in de stookgassamenstelling en -druk gereduceerd worden. Voor de uitbreiding van de ECN infrastructuur is in eerste instantie ECN verantwoordelijk.
- Ontwerp en bouw van de gasreiniging inclusief afvalwaterzuivering. Ontwerp en bouw van een gasreinigingsinstallatie bestaande uit een natte wasser, een bezinkbak en een zaagselbedfilter alsmede een afvalwaterzuivering bestaande uit een actief koolfilter, een kaarsen filter en een stripper. Het in de vergassers geproduceerde stookgas dient in de gasreinigingsinstallatie ontdaan te worden van verontreinigingen als stof, teer en NH₃ zodat het gereinigde stookgas in de gasmotor toegepast kan worden. Bij het ontwerp van de gasreiniging moet rekening worden gehouden met de maximaal toelaatbare concentraties aan verontreinigingen. Deze dienen met de motorenleverancier ABB afgesproken te worden. Voor het ontwerp en de bouw van de gasreiniging inclusief afvalwaterzuivering is in eerste instantie HoSt verantwoordelijk.
- Aanpassing (aard)gasmotor t.b.v. bedrijf op biomassa stookgas. Een reeds bestaande (aard)gasmotor dient aangepast te worden om op biomassa stookgas bedreven te kunnen worden t.b.v. warmte-kracht koppeling. De aanpassingen hebben betrekking op de compressieverhouding, het ontstekingsstijdstip en de brandstof-lucht-verhouding. De tijdens bedrijf van de motor geproduceerde energie wordt m.b.v. een waterweerstand (elektriciteit) en een koeler (warmte) afgevoerd. Voor het aanpassen van de gasmotor t.b.v. bedrijf op biomassa stookgas is in eerste instantie ABB verantwoordelijk.

Beproeving van de basisconfiguratie houdt in:

- Een functionele test van het systeem BIVKIN (wervelbed vergassing) en gasreiniging.
- Een functionele test van het systeem MGB (vastbed vergassing) en gasreiniging.
- Een functionele test (gedurende minimaal 6 uur) van het hele systeem bestaande uit vergassing (BIVKIN of MGB), gasreiniging en gasmotor.
- Een operationele test van de afvalwaterzuivering inclusief terugstoken van afvalstromen.
- Een operationele test van het motorgedrag als functie van de gastemperatuur.

Bij elke test dient een meetprogramma uitgevoerd te worden om de belangrijkste procesparameters (met name de samenstellingen van het stookgas voor en na de reiniging) te bepalen en vervolgens een uitspraak over werking van het systeem te kunnen doen.

In het kader van vervolgfases zullen andere bestaande en nieuwe gasreinigingsapparatuur en gastoepassingen achter de bij ECN aanwezige vergassers beproefd en gedemonstreerd worden. De invulling van deze vervolgfases is onder meer afhankelijk van de resultaten van fase A en de belangen van de Nederlandse industrie.

2. DE GASREIP BASISCONFIGURATIE

Er zijn verschillende routes om biomassavergassing toe te passen voor de productie van elektriciteit, WKK of secundaire energiedragers. Elke conversieroute bestaat uit de stappen:

- stookgasproductie (zie paragraaf 2.1),
- stookgasreiniging (zie paragraaf 2.2) en
- stookgastoepassing (zie paragraaf 2.3).

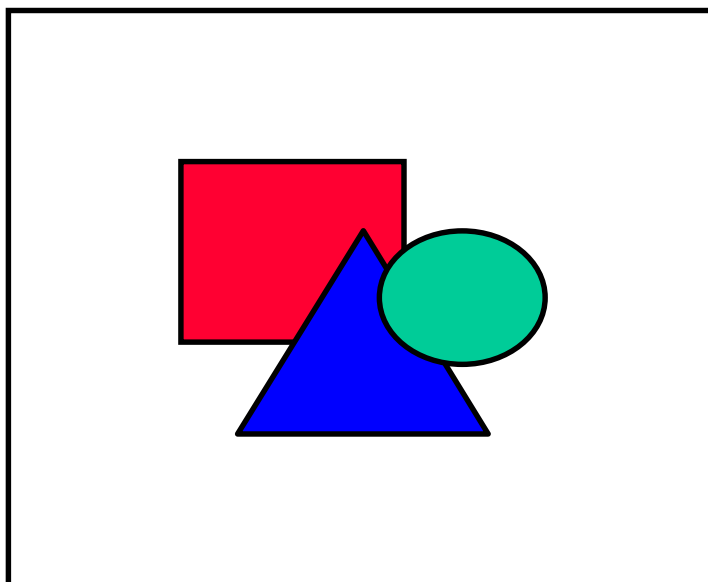
De geschiktheid van een bepaalde route (bijvoorbeeld vastbedvergassing met koude gasreiniging en een gasmotor of wervelbedvergassing met hete gasreiniging en een gasturbine) is afhankelijk van o.a. de gebruikte biomassa, de beoogde schaalgrootte van de installatie en het gewenste eindproduct (elektriciteit, WKK, secundaire energiedragers). De in het kader van het onderhavige project onderzochte conversieroutes worden hieronder nader toegelicht.

2.1 Stookgasproductie

Deze paragraaf bevat een korte beschrijving van de twee bij ECN aanwezige en in het onderhavige project gebruikte bench-scale biomassa vergassingsinstallaties alsmede de in het project uitgevoerde uitbreiding van de vergassers tot een integrale opstelling t.b.v. het testen van gasreinigingsinstallaties en gastoepassingen.

2.1.1 Meestroom Glijdend Bed Vergasser (MGB)

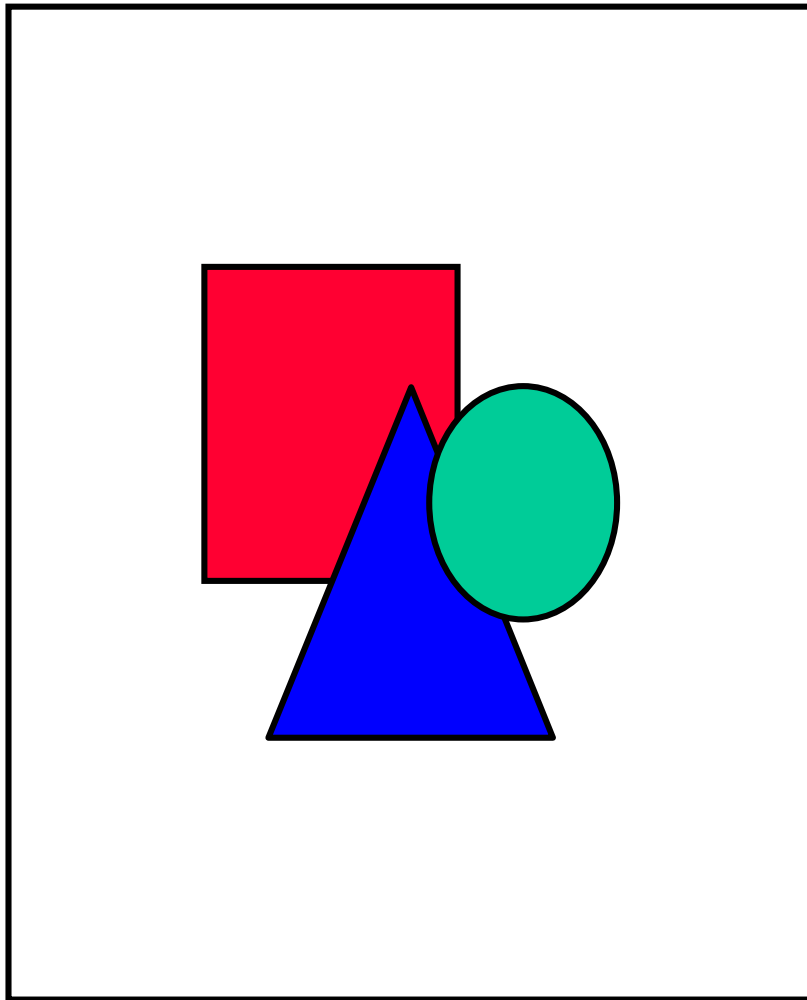
Meestroom glijdend bed vergassing wordt, in combinatie met een diesel- of gas motor, als één van de meest geschikte technologieën beschouwd voor biomassa warmte-kracht-koppeling tot een vermogen van ca. 5 MW_{th}. ECN beschikt over een 250 kW_{th} atmosferische meestroom glijdend bed vergasser (diameter ca. 35 cm, hoogte ca. 3 m), zie Figuur 2-1. De vergasser bestaat uit het brandstoftoevoersysteem (ca. 70 kg/h), luchtverhitter en luchttoevoer, het vergasservat met asafvoersysteem, een cycloon en een fakkel. In het verleden is de installatie getest met als brandstoffen steenkool, kolen/stro-mengsels, kolen/hout-mengsels, wilgenhout, park- en plantsoenafval en houtpellets. Voor meer informatie over de MGB zie [4], [5].



Figuur 2-1 De ECN meestroom glijdend bed vergasser (MGB)

2.1.2 Circulerend Wervelbed Vergasser (BIVKIN)

De BIVKIN (Biomassa Vergassings Karakteriserings Installatie) is een atmosferisch circulerend wervelbed vergasser van ca. 500 kW_{th} (max. 100 kg/h), zie Figuur 2-2. De installatie bestaat uit meerdere voedingsbunkers (mogelijkheid tot mengen van verschillende brandstoffen), het reactorvat (6 m hoog, inwendige diameter 20 cm) met lucht en stoom toevoer, een circulatieloop met cycloon en loop-seal, een tweede cycloon voor asafvangst en een fakkel. Er zijn testen uitgevoerd met o.a. wilg, beuk, meranti, sloophout, groenhout, bermgras, verduurzaamd hout, plaatmateriaal, sloophout/rioolslib, sloophout/papier-residuslib, stro en kippenmest. Voor meer informatie over de BIVKIN zie [6], [7], [8], [9], [10].



Figuur 2-2 De ECN circulerend wervelbed vergasser (BIVKIN)

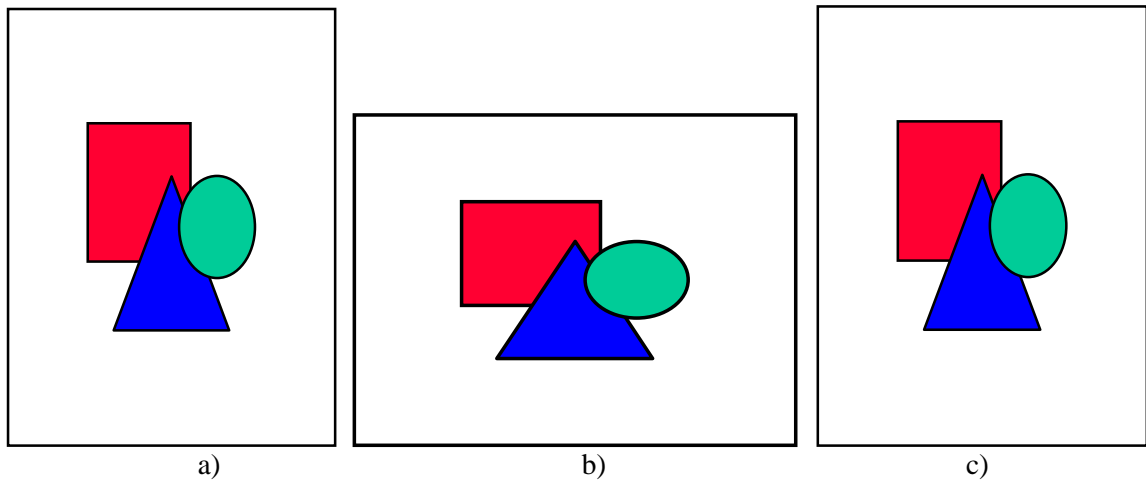
2.1.3 Uitbreiding van de bestaande installaties tot een integrale testopstelling

De twee hierboven beschreven vergassers zijn uitgebreid tot een integrale opstelling voor het testen van gasreinigingsinstallaties en gastoevoeringen. De integrale opstelling is in Bijlage A schematisch weergegeven.

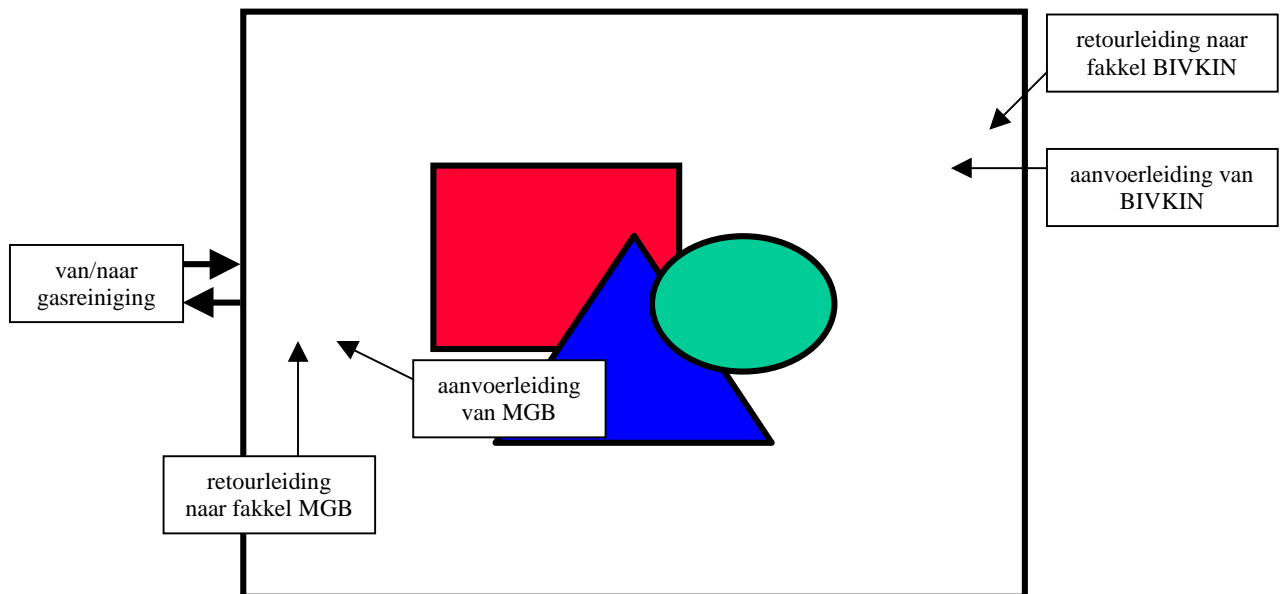
Er zijn van beide vergassers leidingen gelegd naar een halfopen gebouw waarin de gasreiniging (zie paragraaf 2.2, in Bijlage A gekenmerkt als black-box “HoSt”) en de gasmotor (zie paragraaf 2.3) geplaatst zijn. Het stookgas uit de BIVKIN wordt via een ca. 40 m lange leiding van 800 °C gekoeld naar 250 °C, zie Figuur 2-3 en Figuur 2-4. Het stookgas uit de MGB wordt via een ca. 10 m lange leiding van 400 °C gekoeld naar 250 °C, Figuur 2-4. De leidingen zijn gedeeltelijk voorzien van een verwarmingslint om de gastemperatuur aan de inlaat van de gasreiniging

enigszins te kunnen beïnvloeden. Net voor de inlaat van de gasreiniging is het systeem voorzien van een bypass om de vergassers onafhankelijk van de gasreiniging te kunnen (blijven) bedrijven, zie Figuur 2-5.

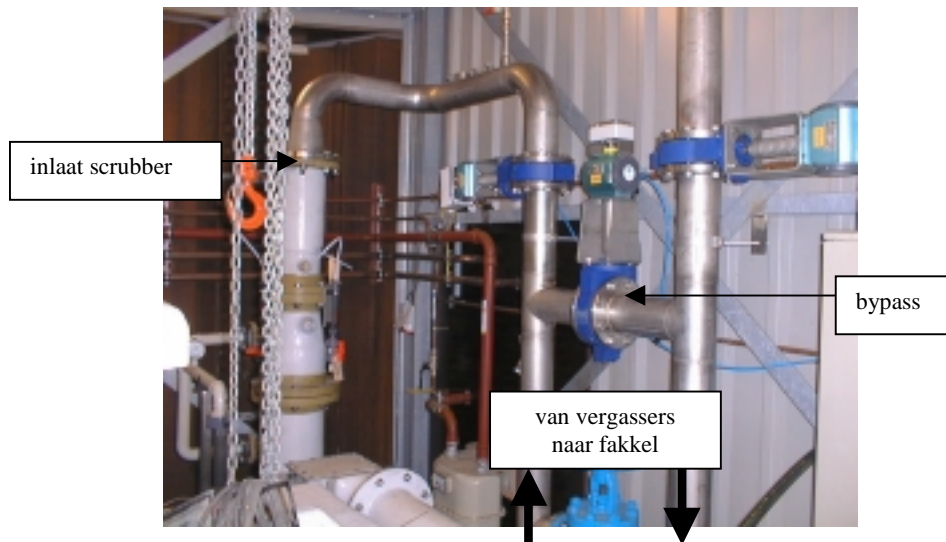
Achter de gasreiniging bevindt zich een booster (in Bijlage A gekenmerkt als P1, Figuur 2-6) om de drukval over het systeem te compenseren en het stookgas op de voor de gasmotor benodigde voordruk van minimaal 25 mbar overdruk te brengen. Door het stookgas voor de gasmotor in een vat (D3, Figuur 2-6) te bufferen worden schommelingen in de stookgassamenstelling gereduceerd. Als de gasmotor niet in bedrijf is wordt het gereinigde stookgas via een retourleiding terug gestuurd naar de fakkel van de in bedrijf zijnde vergasser.



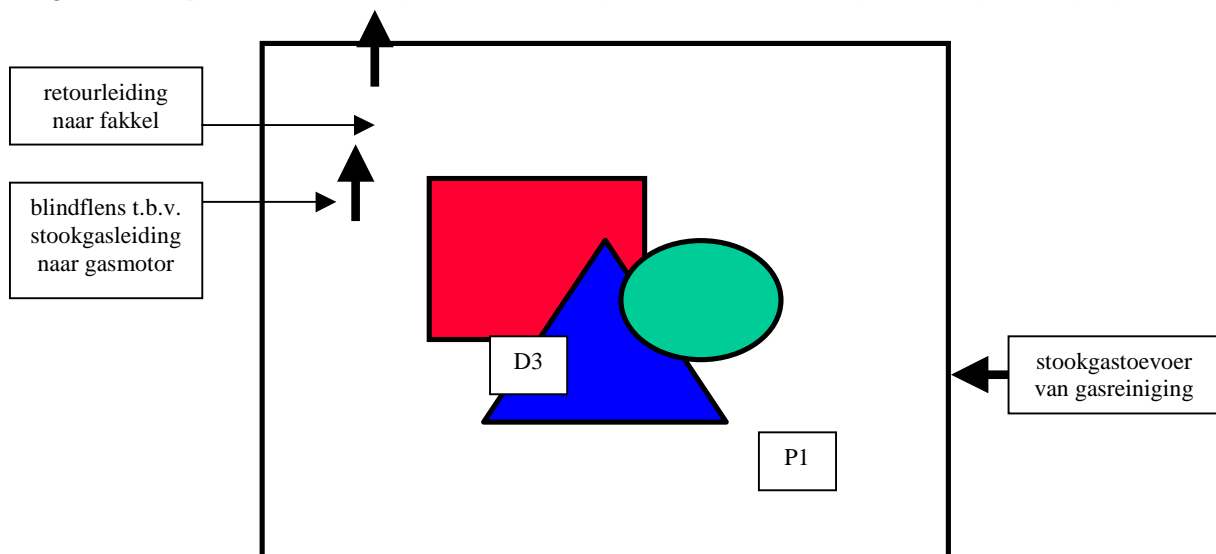
Figuur 2-3 Stookgasleiding en retourleiding van de BIVKIN-fakkel (a) via het dak (b) naar de achterkant (c) van de KCG-hal



Figuur 2-4 Verbinding van de stookgasleidingen afkomstig van de BIVKIN en de MGB



Figuur 2-5 Bypass van de stookgas toevoerleiding naar de retourleiding voor de gasreiniging



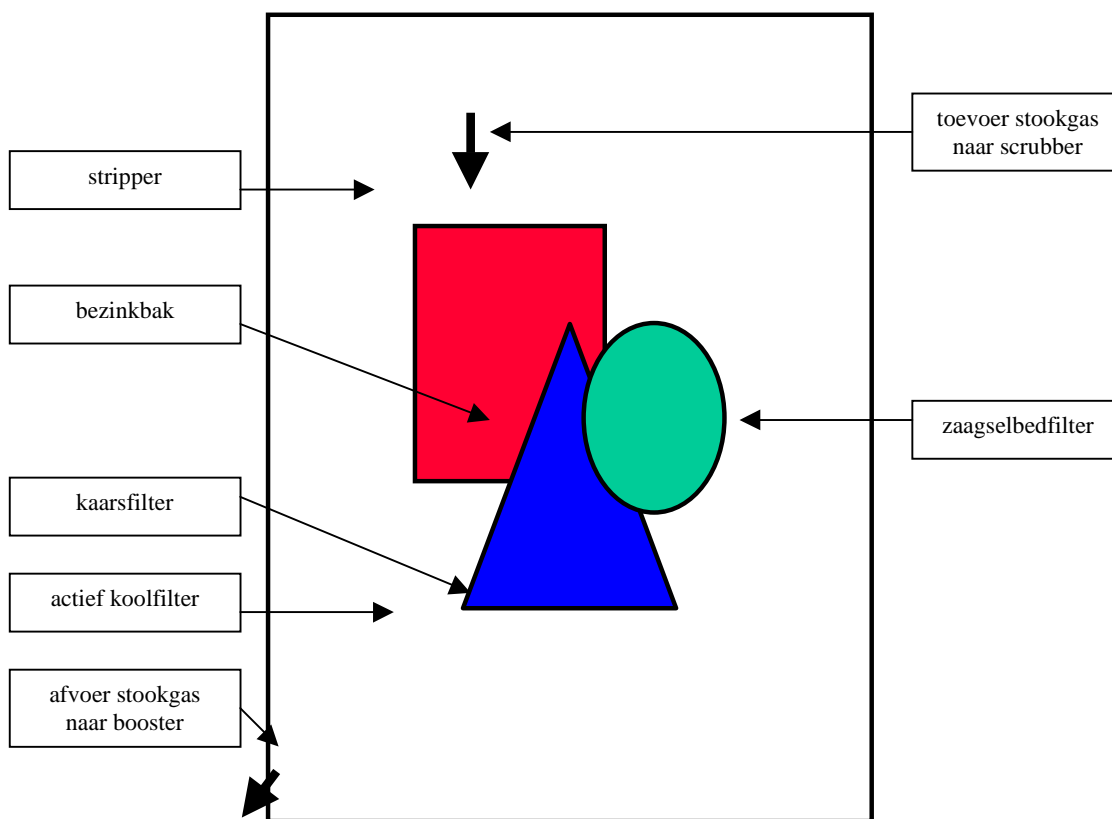
Figuur 2-6 Booster (P1) en buffervat (D3)

2.2 Stookgasreiniging

Om het stookgas uit de vergasser geschikt te maken voor verbranding in een gasmotor, zal het gereinigd moeten worden. Door middel van de gasreiniging worden de volgende componenten verwijderd:

- Ammoniak:
Ammoniak zorgt voor corrosie in de motor en in de leidingen. Tevens zal ammoniak verwijderd worden om aan de emissie-eisen te voldoen. In de motor wordt een deel van de ammoniak omgezet tot NO_x . De in het stookgas aanwezige ammoniak wordt verwijderd in een zure scrubber.
- Teren:
Onder teren vallen de hogere koolwaterstoffen vanaf xyleen. Doordat de temperatuur van het gas dat aan de gasmotor wordt geleverd lager is dan de condensatietemperatuur, kunnen problemen ontstaan in de gasmotor. De teren worden verwijderd in de scrubber en het zaagselbedfilter.
- Stof:
Een deel van het stof wordt niet afgevangen in de cyclonen van de vergasser. Het stof kan slijtage veroorzaken in de cilinders van de gasmotor. Het stof wordt verwijderd in de scrubber en het zaagselbedfilter.

Om ammoniak, teren en stof te verwijderen is de gasreiniging opgebouwd uit een gasscrubber en een zaagselbedfilter, inclusief afvalwaterzuivering. De hele gasreinigingsinstallatie is in Figuur 2-7 weergegeven.



Figuur 2-7 Stookgasreiniging inclusief afvalwaterzuivering

2.2.1 Scrubber

Een scrubber is een conventioneel apparaat in de gasreinigingstechnologie. Verontreinigingen zoals ammoniak, zoutzuur en waterstofsulfide worden op industriële schaal verwijderd door middel van scrubbers. In de scrubber wordt het stookgas gewassen door middel van versproeiing van water. Door het contact met het koude water wordt het stookgas afgekoeld. Hierdoor condenseren de teren uit het stookgas. De koeling is eveneens noodzakelijk om tegemoet te komen aan de maximaal toelaatbare inlaattemperatuur van het stookgas voor de gasmotor, namelijk 50 °C. Door aanzuring van het scrubberwater met zwavelzuur wordt ammoniak verwijderd uit het stookgas.

Een deel van het sproeiwater en het gecondenseerde water uit het stookgas wordt gerecirculeerd via een waterkoeler en een ander deel wordt naar de waterreiniging gebracht.

2.2.2 Zaagselbedfilter

Na de scrubber wordt het stookgas door een zaagselbed geleid. In het filter worden de gecondenseerde teren uit het stookgas aan de zaagseldeeltjes geadsorbeerd. Door de dichte pakking van het bed wordt stof eveneens uit het stookgas gefilterd.

2.2.3 Waterzuivering

Omdat de verontreinigde afvalwaterstroom uit de scrubber niet zonder meer geloosd mag worden wordt het waswater uit de scrubber eerst door middel van een pomp door een waterreinigingsstraat geleid, zie Figuur 2-7.

Vanuit de bezinkbak wordt het water naar een kaarsfilter gepompt. De organische verbindingen zoals benzeen, toluen, xyleen, fenolen en andere aromatische koolwaterstoffen worden verwijderd met een actief koolfilter. Naast de organische verbindingen is het filter ook in staat om kwik uit het water te absorberen. Vervolgens wordt het water naar een ammoniak stripper geleid. Met behulp van lucht en verhoging van de pH wordt de ammoniak uit het water gestript. De ammoniakhoudende lucht verlaat de stripper volledig verzadigd met water en wordt voorlopig geëmitteerd naar de omgeving. Na de stripper wordt het gereinigde water gespuid of teruggevoerd naar de scrubber.

Om geen afgifte van afvalstoffen naar de omgeving te hebben, worden de reinigings-residuen die in de waterstraat worden gevormd, afgevoerd naar een afvalverwerker (BFI).

2.3 Stookgastoepassing

Het gereinigde stookgas is in het kader van GASREIP fase A toegepast in een 6-cilinder gasmotor van het fabrikaat en type M.A.N. / E 2866 E. Deze motor wordt gewoonlijk op aardgas beredreven en levert als gasmotor-genset "Zantec 85" een elektrisch vermogen van 88 kW. In Tabel 2-1 is een aantal gegevens bij bedrijf op aardgas samengevat.



Figuur 2-8 De gasmotor M.A.N. / E 2866 E

Tabel 2-1 Gegevens gasmotor en generator bij bedrijf op aardgas

| | | |
|------------------|----------------------|--|
| Gasmotor | Fabrikaat / Type | M.A.N. / E 2866 E |
| | Aantal cilinders | 6 |
| | Toerental | 1500 min ⁻¹ |
| | λ | 1.45 |
| | Compressieverhouding | 12.5:1 |
| | Vermogen | opgenomen 271 kW _{in} asvermogen 95 kW _{mech} |
| | asrendement | 35.1 % |
| Generator | Fabrikaat / Type | Stamford / UC 274 E |
| | rendement bij 88 kW | 92.4 % |

Voor het bedrijven van een (aard)gasmotor op laag calorisch biomassa stookgas is een aantal modificaties noodzakelijk. Voor een gedetailleerde toelichting over de gevolgen van het bedrijven van (aard)gasmotoren op laag calorisch gas en mogelijk te nemen maatregelen zie bijvoorbeeld [11] of [12]. Hieronder volgt een korte toelichting van de belangrijkste in het kader van het onderhavige project door ABB genomen maatregelen.

2.3.1 Brandstof lucht-verhouding

De stoichiometrische luchtbehoefte van aardgas is ca. 8.5, d.w.z. voor de stoichiometrische verbranding van 1 m_n³ aardgas is ca. 8.5 m_n³ lucht nodig hetgeen leidt tot een calorische waarde van een (stoichiometrisch) aardgas lucht mengsel van 3.34 MJ/m_n³. De stoichiometrische luchtbehoefte van biomassa stookgas bedraagt ca. 1.35 (afhankelijk van de gassamenstelling). Bij een calorische waarde van biomassa stookgas van 5.5 MJ/m_n³ (LHV op droge basis) is de calorische waarde van een (stoichiometrisch) stookgas lucht-mengsel 2.34 MJ/m_n³. Bij een gelijke λ komt dit overeen met een daling van het vermogen met ca. 30 % t.o.v. bedrijf op aardgas. De M.A.N./ E 2866 E wordt gewoonlijk op aardgas bij $\lambda=1.45$ bedreven. De daling van het vermogen als gevolg van stookgas bedrijf kan (gedeeltelijk) gecompenseerd worden door het luchtvermaat te verlagen naar bijvoorbeeld $\lambda =1.1-1.2$ zodat de adiabatische vlamtemperatuur gelijk blijft.

Op basis van ervaring met middencalorisch biogas is ABB uitgegaan van een na te streven gehalte van (rest)zuurstof in het rookgas van 7.4 %. Dit komt overeen met een luchtvermaat van $\lambda=1.72$ en zou uitgaande van een verwerkbaar totaaldebiet (gas en lucht) van 413 m_n³/h tot debieten van 124 m_n³/h stookgas en 288 m_n³/h lucht moeten leiden. Als gevolg van een technische beperking was het stookgasdebiet in de gemodificeerde gasstraat echter beperkt op maximaal 115 m_n³/h. Hieruit resulteert een maximaal opgenomen vermogen van de motor van 176 kW hetgeen een verlaging is van 35 % t.o.v. de 271 kW bij bedrijf op aardgas.

2.3.2 Compressieverhouding

Het relatief hoge waterstofgehalte van biomassa stookgas (BIVKIN: 12 %, MGB: 22 %) leidt tot een laag methaangetal t.o.v. aardgas met als gevolg een sterkere neiging tot zelfontbranding (voortijdige ontsteking van het gas-lucht mengsel). Dit ongewenste verschijnsel kan worden voorkomen door de compressieverhouding te verlagen zodat de temperatuur tijdens compressie minder stijgt. Dit leidt echter tot verlaging van het motorrendement.

In het kader van het onderhavige project is de compressieverhouding niet veranderd.

2.3.3 Ontstekingstijdstip

Bij een gelijke luchtvermaat λ daalt de verbrandingstemperatuur en dus ook de verbrandingssnelheid bij verbranding van stookgas i.p.v. aardgas.

Het ontstekingstijdstip is vervroegd om te voorkomen dat een groter deel van het stookgas onvolledig of helemaal niet verbrand. Dit heeft echter tot gevolg dat de ontsteking voor het moment van maximale gascompressie plaats vindt hetgeen tot een daling van het rendement van de motor leidt.

2.3.4 Opgewekt elektrisch vermogen

De onder 2.3.1, 2.3.2 en 2.3.3 beschreven maatregelen, het feit dat het biomassa stookgas een relatief hoge temperatuur van 40-50 °C en een vochtgehalte van 2-3 % heeft (het gas neemt dus meer volume in) en de daling van het generatorrendement als gevolg van het lagere asvermogen (generator wordt buiten zijn ontwerpgebied gebruikt) zullen uiteindelijk tot nagenoeg een halvering van het opgewekte elektrische vermogen leiden (40-45 kW i.p.v. 88 kW bij bedrijf op

aardgas). De in de generator opgewekte elektriciteit wordt tijdens testen m.b.v. een waterweerstand vernietigd. De opgewekte warmte wordt m.b.v. een koeler vernietigd.

3. DE WERKING VAN DE GASREIP BASISCONFIGURATIE

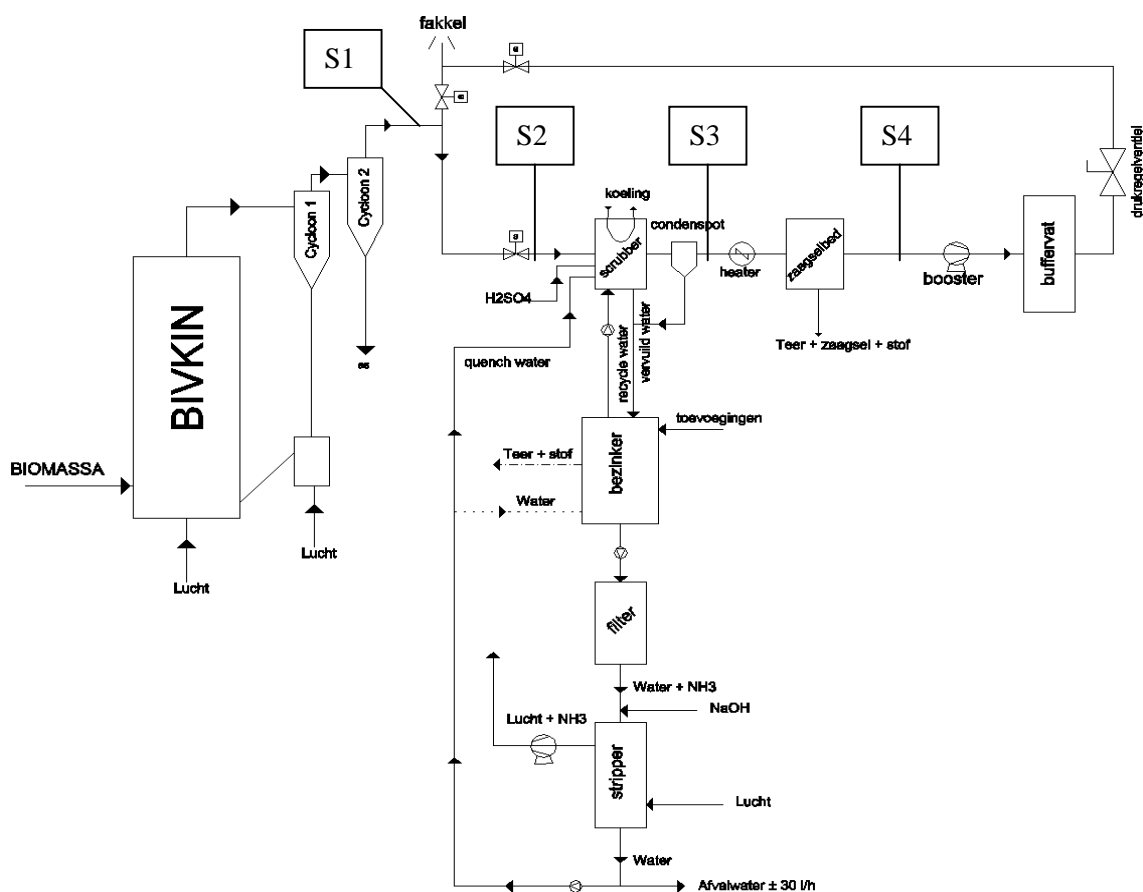
De gasreiniging bestaande uit koeler, scrubber en zaagselbedfilter is meerdere keren zowel achter de BIVKIN als achter de MGB getest (brandstof: houtpellets). De afvalwaterzuivering is bij alle testen bedreven. Metingen aan de afvalwaterzuivering zijn echter alleen uitgevoerd bij bedrijf van de BIVKIN. De gasmotor is gedurende een dag achter de MGB getest.

3.1 De werking van het systeem BIVKIN, gasreiniging en afvalwaterzuivering

In week 7 en week 9 zijn testen uitgevoerd met het systeem bestaande uit BIVKIN en gasreiniging inclusief afvalwaterzuivering echter nog zonder gasmotor. Doel was het testen van:

- de principiële werking van het integrale systeem bestaande uit toevoer van ruw BIVKIN stookgas naar de gasreinigingsinstallatie, reiniging van het ruwe stookgas en afvoer van het gereinigde stookgas naar de BIVKIN-fakkel,
- de prestatie van de gasreiniging (verwijdering van NH_3 , stof en teer uit het stookgas) en
- de prestatie van de afvalwaterzuivering.

Het geteste systeem is in Figuur 3-1 schematisch weergegeven.



Figuur 3-1 Het systeem BIVKIN en gasreiniging inclusief afvalwaterzuivering

3.1.1 Gasreiniging

Tijdens de testen zijn de concentraties van HCl, NH₃, stof en teren zowel voor (meetpunt S2) als na (S4) de gasreiniging gemeten. De hoofdcomponenten zijn alleen achter de tweede cycloon (S1) gemeten. De belangrijkste meetresultaten zijn samengevat in Tabel 3-1.

Tabel 3-1 *Overzicht meetresultaten BIVKIN-testen in week 7 en week 9 (“-“ = niet bepaald)*

| Proef | | BIVKIN 16 februari | | | BIVKIN 1 maart | | |
|--------------------------------|------------------------------------|--------------------|------|------|----------------|------|------|
| | | S1 | S2 | S4 | S1 | S2 | S4 |
| Meetpunt stookgassamenstelling | | | | | | | |
| CO | [vol% dr.] | 14.3 | - | - | 14.9 | - | - |
| H2 | [vol% dr.] | 12.4 | - | - | 11.5 | - | - |
| CO2 | [vol% dr.] | 16.5 | - | - | 15.9 | - | - |
| O2 -> 0 vol % | [vol% dr.] | 0.2 | - | - | 0.2 | - | - |
| CH4 | [vol% dr.] | 4.3 | - | - | 4.2 | - | - |
| C2H4 | [vol% dr.] | 1.4 | - | - | 1.2 | - | - |
| C2H6 | [vol% dr.] | 0.1 | - | - | 0.1 | - | - |
| C6H6 (globaal) | [Vppm dr.] | - | - | - | 3555 | - | - |
| Tolueen | [Vppm dr.] | - | - | - | 1175 | - | - |
| N2 + Ar (rest) | [vol% dr.] | - | - | - | 51.8 | - | - |
| N2 (gemeten) | [vol% dr.] | 49.8 | - | - | - | - | - |
| NH3 | [Vppm dr.] | - | 1987 | 35 | - | 1758 | 35 |
| Cl | [mg/m _n ³] | - | - | - | - | 111 | 3 |
| H2S | [Vppm dr.] | - | - | - | - | - | - |
| COS | [Vppm dr.] | - | - | - | - | - | - |
| | | | | | | | |
| HHV (droog) (berekend) | [MJ/ m _n ³] | - | - | - | 6.6 | - | - |
| LHV (droog) (berekend) | [MJ/m _n ³] | - | - | - | 6.1 | - | - |
| H2O (berekend) | [vol% nat] | - | - | - | 17 | | 3 |
| | | | | | | | |
| Stof totaal | [mg/m _n ³] | - | 4000 | 25 | - | - | 214 |
| Stof gloeirest | [mg/m _n ³] | - | 1000 | <10 | - | - | <10 |
| | | | | | | | |
| Teer SPA (vanaf xyleen) | [mg/m _n ³] | - | 2400 | 1170 | 6100 | 5425 | 2335 |

Teerverwijdering. In zowel de scrubber als het zaagselbedfilter worden teren verwijderd. De teren vanaf xyleen zijn volgens de SPA methode gemeten. Tijdens de testen zijn de volgende gemiddelde concentraties gemeten:

BIVKIN Test van 16 februari:

Gemiddelde teerconcentratie voor reiniging (S2): 2400 mg/m_n³

Gemiddelde teerconcentratie na reiniging (S4): 1170 mg/m_n³

BIVKIN Test van 1 maart:

Gemiddelde teerconcentratie voor reiniging (S2): 5425 mg/m_n³

Gemiddelde teerconcentratie na reiniging (S4): 2335 mg/m_n³

Ten eerste valt op dat ondanks de vrijwel identieke procescondities de gemeten teerconcentratie op 1 maart veel hoger was dan op 16 februari. Oorzaak was het achterblijven van een deel van de teren in de nieuwe 35 m lange stookgasleiding (zie Figuur 2-3) van de BIVKIN naar de gasreiniging. Om de invloed hiervan beter te kunnen beoordelen is op 1 maart een aanvullende teermeting direct achter de BIVKIN cycloon (meetpunt S1) uitgevoerd. Een vergelijking van de concentraties S1 en S2 laat zien dat de teerconcentratie langs de stookgasleiding inderdaad daalt. Dit effect zal echter dalen en uiteindelijk ophouden omdat de teerlaag een isolerende werking heeft hetgeen tot gevolg heeft dat het temperatuurverschil tussen stookgas en leidingwand daalt en dus minder teer op de wandoppervlakte condenseert.

De bereikte teerverwijdering ligt tussen 51 en 57 %. Om het gas te verstoken op een stoomketel is de teerconcentratie van ondergeschikt belang. Voor toepassing in een gasmotor zoals aangestreeft in GASREIP zijn aanvullende reinigingsstappen noodzakelijk.

Stofverwijdering. In zowel de scrubber als het zaagselbedfilter wordt stof verwijderd. Tijdens de testen zijn de volgende gemiddelde concentraties gemeten:

BIVKIN Test van 16 februari:

| | |
|---|-------------------------------------|
| Gemiddelde stofconcentratie voor reiniging: | 4000 mg/m _n ³ |
| Gemiddelde stofconcentratie na reiniging: | 25 mg/m _n ³ |

BIVKIN Test van 1 maart:

| | |
|---|------------------------------------|
| Gemiddelde stofconcentratie voor reiniging: | niet gemeten |
| Gemiddelde stofconcentratie na reiniging: | 217 mg/m _n ³ |

Tijdens de test van 16 februari is een stofconcentratie van 25 mg/m_n³ bereikt hetgeen overeenkomt met een stofverwijdering van 99,4 %. Een stofconcentratie van 25 tot 5 mg/m_n³ is voldoende om aan de eisen van de gasmotor te voldoen en aan de emissie-eisen voor afvalverbrandingsinstallaties. De op 1 maart bereikte stofconcentratie van 217 mg/m_n³ is dus onvoldoende.

Ammoniakverwijdering. In de scrubber wordt ammoniak verwijderd door aanzuring van het recirculatiewater. Tijdens de testen zijn de volgende gemiddelde concentraties gemeten:

BIVKIN Test van 16 februari:

| | |
|---|-----------|
| Gemiddelde ammoniakconcentratie voor reiniging: | 1987 Vppm |
| Gemiddelde ammoniakconcentratie na reiniging: | 35 Vppm |

BIVKIN Test van 1 maart:

| | |
|---|-----------|
| Gemiddelde ammoniakconcentratie voor reiniging: | 1758 Vppm |
| Gemiddelde ammoniakconcentratie na reiniging: | 35 Vppm |

Dit betekent een ammoniakverwijdering van > 98 %. Een ammoniakconcentratie van 35 Vppm is ruim voldoende om aan de eisen van de gasmotor te voldoen en aan de emissie-eisen voor afvalverbrandingsinstallaties.

3.1.2 Afvalwaterzuivering

Teer. De teer worden in een actief koolfilter verwijderd uit het water. Tijdens de testen zijn de volgende concentraties gemeten:

| | |
|--|------------|
| Gemiddelde teerconcentratie in water voor reiniging: | 1071 mg/kg |
| Gemiddelde teerconcentratie in water na reiniging: | <0,1 mg/kg |

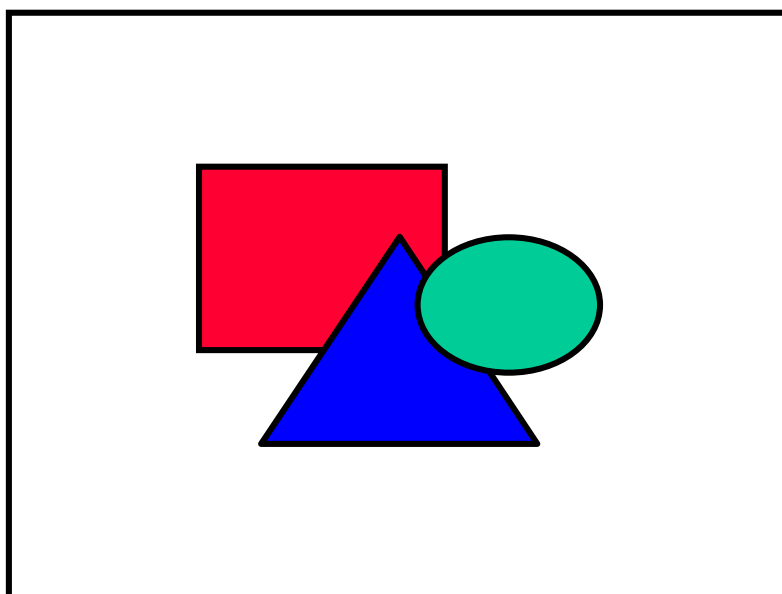
Dit betekent een verwijderingrendement van 99,99 %. Het lozen in het riool zal geen problemen opleveren met de milieuvergunningen.

Stof. Het stof wordt in een filter verwijderd uit het water. Tijdens de testen zijn de volgende concentraties gemeten:

| | |
|--|-----------|
| Gemiddelde stofconcentratie in water voor reiniging: | 594 mg/kg |
| Gemiddelde stofconcentratie in water na reiniging: | 42 mg/kg |

Dit betekent een verwijderingrendement van 92,9 %. Voor lozing op het riool zal een verdere verlaging naar 30 mg/kg nodig zijn.

Ammoniak. De metingen die zijn verricht naar ammoniak zijn niet representatief voor het strippen van ammoniak uit water. De testen zijn bij een pH van 7 tot 8 uitgevoerd, terwijl een pH van 11 benodigd is om een verwijderingrendement van circa 99 % te bewerkstelligen. Het strippen van ammoniak uit water naar lucht is een conventionele techniek, zodat verwacht wordt dat, indien de pH beter geregeld wordt, een ammoniakverwijdering van 95 % bewerkstelligd kan worden.



Figuur 3-3 Opstart van de gasmotor op 27 juni 2000

3.2.1 Gasreiniging

Tijdens de testen zijn de concentraties van HCl, NH₃, stof en teren zowel voor (meetpunt S1/S2) als na (S4/S5) de gasreiniging gemeten. De hoofdcomponenten zijn alleen voor de gasreiniging (S1/S2) gemeten. De belangrijkste meetresultaten zijn samengevat in Tabel 3-2.

Tabel 3-2 Overzicht meetresultaten MGB-testen in week 26 (“-“ = niet bepaald)

| proef | | MGB 26 juni | | MGB 27 juni | |
|-------------------------|-----------------------------------|-------------|-------|-------------|-------|
| | | S1/S2 | S4/S5 | S1/S2 | S4/S5 |
| Stookgas meetpunt | | | | | |
| CO | [vol% dr.] | 17.3 | - | 17.7 | - |
| H2 | [vol% dr.] | 23.0 | - | 23.2 | - |
| CO2 | [vol% dr.] | 15.3 | - | 15.4 | - |
| O2 -> 0 vol % | [vol% dr.] | - | - | - | - |
| CH4 | [vol% dr.] | 2.0 | - | 2.2 | - |
| C2H4 | [vol% dr.] | 0.1 | - | 0.2 | - |
| C2H6 | [vol% dr.] | 0.0 | - | 0.0 | - |
| C6H6 (globaal) | [Vppm dr.] | 620 | - | 738 | - |
| Tolueen | [Vppm dr.] | 139 | - | 181 | - |
| N2 + Ar (rest) | [vol% dr.] | 42.3 | - | 41.2 | - |
| N2 (gemeten) | [vol% dr.] | - | - | - | - |
| NH3 | [Vppm dr.] | 1901 | 43 | 1890 | 35 |
| Cl | [mg/m _n ³] | 69 | 77 | 23 | 5 |
| H2S | [Vppm dr.] | 30 | - | 25 | - |
| COS | [Vppm dr.] | 28 | - | 24 | - |
| | | | | | |
| HHV (droog) (berekend) | [MJ/m _n ³] | 6.11 | - | 6.36 | - |
| LHV (droog) (berekend) | [MJ/m _n ³] | 5.57 | - | 5.8 | - |
| H2O (berekend) | [vol% nat] | - | | 6 | 2 |
| | | | | | |
| Stof totaal | [mg/m _n ³] | 69 | <5 | 73 | <5 |
| Stof gloeirest | [mg/m _n ³] | 21 | <5 | 26 | <5 |
| | | | | | |
| Teer SPA (vanaf xyleen) | [mg/m _n ³] | 640 | 200 | 450 | 220 |

Teerverwijdering. In zowel de scrubber als het zaagselbedfilter worden teren verwijderd. De teren vanaf xyleen zijn volgens de SPA methode gemeten. Tijdens de testen zijn de volgende gemiddelde concentraties gemeten:

MGB Test van 26 juni

Gemiddelde teerconcentratie voor reiniging: 640 mg/m_n³

Gemiddelde teerconcentratie na reiniging: 200 mg/m_n³

MGB Test van 27 juni

Gemiddelde teerconcentratie voor reiniging: 450 mg/m_n³

Gemiddelde teerconcentratie na reiniging: 220 mg/m_n³

De teerconcentratie in het stookgas geproduceerd met de MGB is ongeveer een factor 10 lager dan de teerconcentratie in het stookgas geproduceerd met de BIVKIN. Er is een teerverwijdering tussen 51 % en 68 % bereikt. Dampvormige teren worden in deze gasreiniging niet afgevangen. Het feit dat nog 200 tot 220 mg/m_n³ teren in het stookgas aanwezig zijn, wil nog niet zeggen dat deze teren problemen veroorzaken in de gasmotor, omdat de teren in dampfase aanwezig kunnen zijn.

Stofverwijdering. In zowel de scrubber als het zaagselbedfilter wordt stof verwijderd. Tijdens de testen zijn de volgende gemiddelde concentraties gemeten:

MGB Test van 26 juni

Gemiddelde stofconcentratie voor reiniging: 69 mg/nm³

Gemiddelde stofconcentratie na reiniging: <5 mg/nm³

MGB Test van 27 juni

Gemiddelde stofconcentratie voor reiniging: 73 mg/nm³

Gemiddelde stofconcentratie na reiniging: <5 mg/nm³

De stofconcentratie in het stookgas geproduceerd met de MGB is ongeveer een factor 50 lager dan de stofconcentratie in het stookgas geproduceerd met de BIVKIN. De gemeten stofconcentratie na de reiniging van < 5 mg/m_n³ is voldoende om aan de eisen van de gasmotor te voldoen en aan de emissie-eisen voor afvalverbrandingsinstallaties.

Ammoniakverwijdering. In de scrubber wordt ammoniak verwijderd door aanzuring van het recirculatiewater. Tijdens de testen zijn de volgende gemiddelde concentraties gemeten:

MGB Test van 26 juni

Gemiddelde ammoniakconcentratie voor reiniging: 1901 Vppm

Gemiddelde ammoniakconcentratie na reiniging: 43 Vppm

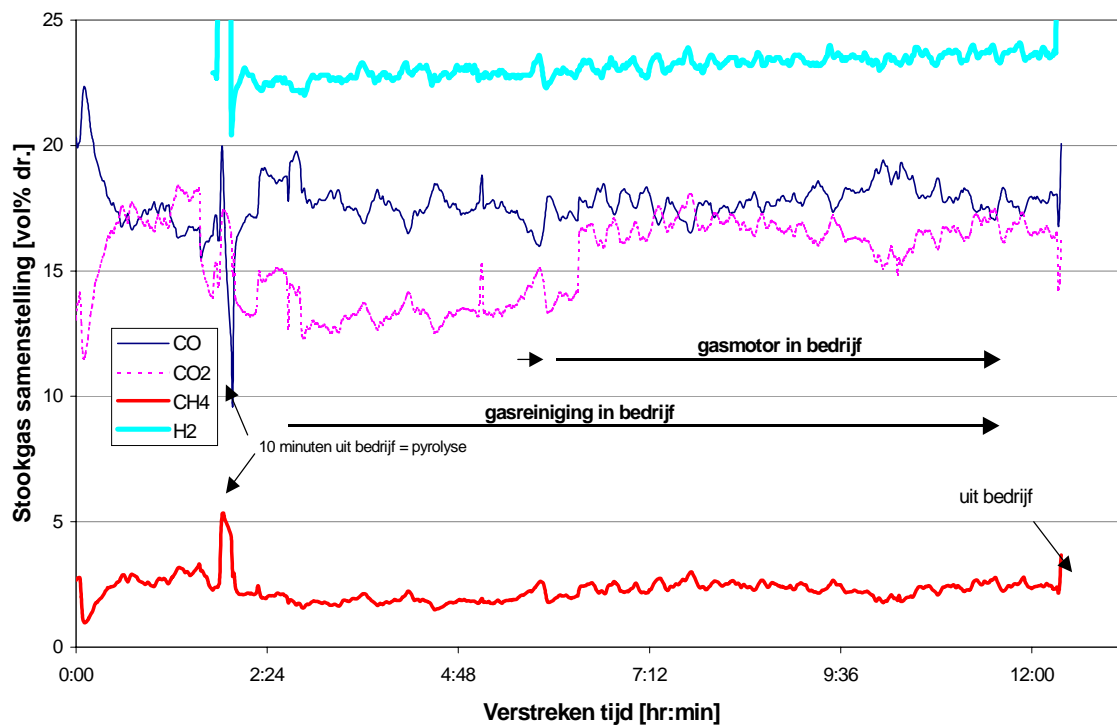
MGB Test van 27 juni

Gemiddelde ammoniakconcentratie voor reiniging: 1890 Vppm

Gemiddelde ammoniakconcentratie na reiniging: 35 Vppm

Dit betekent een ammoniakverwijdering van 97.7 tot 98.2%. Een ammoniakconcentratie van 35 tot 43 Vppm is voldoende om aan de eisen van de gasmotor te voldoen en aan de emissie-eisen voor afvalverbrandingsinstallaties.

Afvalwaterzuivering. Tijdens de testen achter de MGB is de afvalwaterzuivering weliswaar bedreven, vanwege de hoge kosten zijn echter geen metingen uitgevoerd. Vanwege de veel lagere concentraties van teer en stof in MGB stookgas t.o.v. BIVKIN stookgas is te verwachten dat het gereinigde water bij bedrijf achter de MGB minder verontreinigingen bevat dan het bij bedrijf van de BIVKIN geproduceerde stookgas. Het laatste is beschreven in paragraaf 3.1.2.



Figuur 3-4 Stookgassamenstelling (hoofdcomponenten) tijdens bedrijf van de gasmotor

3.2.2 Gasmotor

Op 27 juni is voor het eerst de gasmotor bedreven. Er is voor bedrijf achter de MGB gekozen omdat het MGB stookgas een relatief lage teerconcentratie van ca. 400-700 mg/m³ bevat. Na een opstartperiode heeft de gasmotor gedurende 6 uur continu zonder problemen gedraaid.

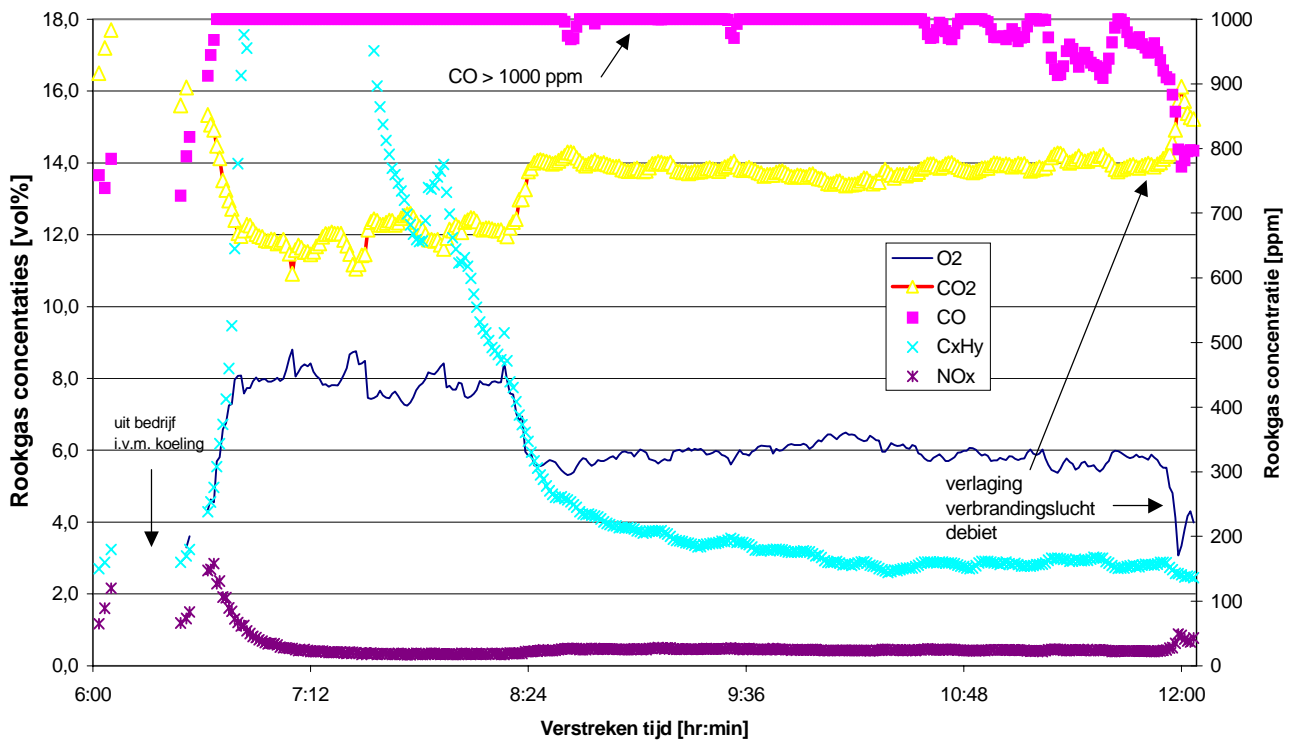
Stookgassamenstelling. In Figuur 3-4 zijn de concentraties van de hoofdcomponenten CO, CO₂, CH₄ en H₂ in het stookgas weergegeven. De gemiddelde calorische waarde van het gas was 5.8 MJ/m³ (LHV droog).

Zoals te zien in Figuur 3-4 schommelde de samenstelling van het stookgas nogal. De korte termijn schommelingen worden gedeeltelijk gecompenseerd door het stookgas in een vat van 200 l te bufferen (zie Figuur 2-6). Fluctuaties op de langere tijdschaal zoals de langzame toename van de H₂-concentratie worden daarentegen niet gecompenseerd. Ondanks deze fluctuaties draaide de motor gedurende 6 uur rustig en regelmatig.

Ondanks het relatief hoge waterstofgehalte van 22-24 % is tijdens de test geen ongewenste zelfontbranding geconstateerd. Hieruit kan geconcludeerd worden dat de compressieverhouding mogelijk verhoogd kan worden hetgeen een verhoging van het motorrendement tot gevolg heeft.

Opgewekt vermogen. Omdat de stookgasleiding naar de motor niet was voorzien van een debietmeter kon het door de motor aangezogen stookgasdebiet en daarmee het motorrendement niet bepaald worden. Uit het feit dat de fakkel van de MGB tijdens de test nooit geheel doofde is geconcludeerd dat de motor niet het volledige stookgasdebiet aangezogen heeft. Een deelstroom ging altijd via de retourleiding naar de fakkel.

Het in de generator opgewekte elektrische vermogen is bepaald door spanning en stroom in het kabel naar de waterweerstand te meten. Het maximaal opgewekte elektrische vermogen was 35 kW. De belangrijkste reden hiervoor was een beperking van de gasstraat op een stookgasdebiet van max. 100 m³/h. (N.B.: Had de gasstraat meer stookgas kunnen verwerken dan had het vermogen van de MGB een beperking opgelegd).



Figuur 3-5 Rookgasemissies achter de gasmotor (CO, C_xH_y, NO_x rechterschaal; CO₂, O₂ links)

Het in de gasmotor-genset opgewekte elektrische vermogen kan aanzienlijk verhoogd worden door een aantal maatregelen te nemen:

- Voorschakelen van een vergasser die meer stookgas produceert (160-180 m³/h).
- Aanpassing van de gasstraat zodat een stookgasdebiet van ca. 160-180 m³/h verwerkt kan worden en de motor met een luchtvermaat λ van ca. 1.1-1.2 bedreven kan worden.
- Eventueel het later stellen van het ontstekingstijdstip voor zover dit niet leidt tot onvolledige verbranding en daarmee hogere emissies van CO en C_xH_y.
- Gebruik van een generator die ontworpen is voor het asvermogen dat de motor bij bedrijf op stookgas opwekt.

Rookgasemissies. De tijdens de test achter de gasmotor gemeten rookgasemissies zijn in Figuur 3-5 weergegeven. In het begin van de test was het rookgas een zwarte pluim. Deze was veroorzaakt door resten van bij de laatste motorrevisie achter gebleven (smeer)olie die bij de inbedrijfname van de motor slecht/onvolledig verbrandde en tot hoge emissies van C_xH_y en CO geleid hebben, zie Figuur 3-5. Na ca. 1 uur daalden de C_xH_y-emissies sterk en was het rookgas visueel schoon.

Na ca. 2 uur is de verbrandingslucht geknepen naar een restzuurstofgehalte in het rookgas van 6%. Onder deze condities en nadat de 'overtollige' smeerolie t.g.v. de motorrevisie (naar verwachting) volledig verdwenen was, zijn 130-150 ppm C_xH_y, 900-1000 ppm CO en ca. 25 ppm NO_x gemeten.

Bij een verdere verlaging van het verbrandingsluchtdebiet wordt de vlamtemperatuur verhoogd hetgeen tot betere verbranding en daarmee verlaging van de emissies van CO en C_xH_y in het rookgas leidt terwijl de NO_x-concentratie juist stijgt. Het t.a.v. de rookgasemissies optimale werkgebied van de motor zal in het kader van een meer uitgebreid testprogramma bepaald moeten worden.

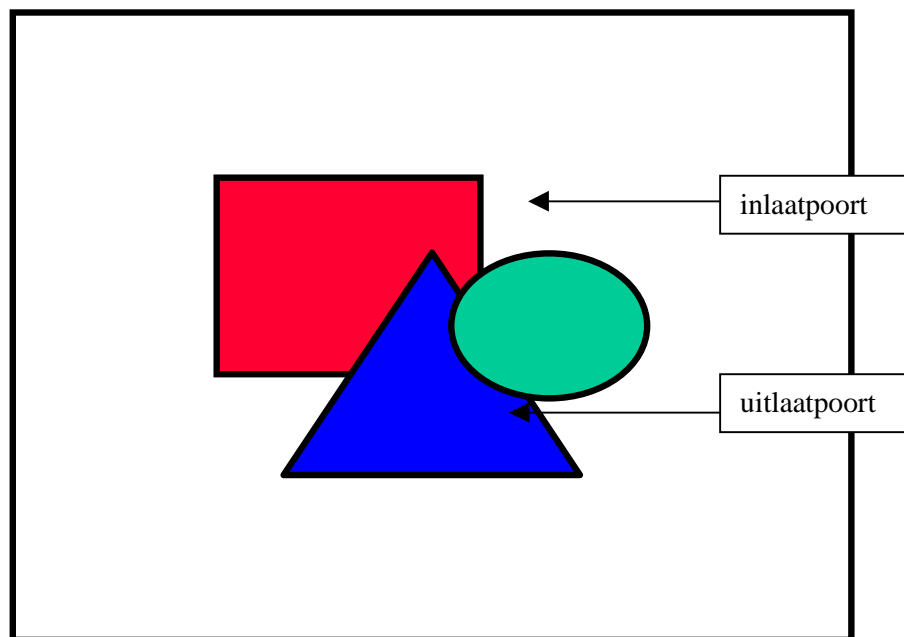
Motorinspectie. Na afloop van de test is de motor door ABB geïnspecteerd. Ten eerste zijn alle bougies gedemonteerd en bekeken. Tevens is de klepspelings bepaald. Voor de test was de klepspelings van de inlaat 0.35 mm en van de uitlaat 0.50 mm. De klepspelings na de test is in Tabel 3-3 weergegeven. De kolom 'compressie' geeft de einddruk in de cilinders. Een afwijkende lagere druk geeft aan dat een klep niet goed sluit. In dit geval is dit echter niet aan de orde.

Tabel 3-3 *Klepspelings na de test*

| Cilinder Nr. | Inlaat | Uitlaat | Compressie |
|--------------|---------|---------|------------|
| 1 | 0.30 mm | 0.50 mm | 18.0 |
| 2 | 0.30 mm | 0.45 mm | 18.0 |
| 3 | 0.37 mm | 0.50 mm | 18.5 |
| 4 | 0.30 mm | 0.50 mm | 19.5 |
| 5 | 0.35 mm | 0.50 mm | 18.0 |
| 6 | 0.32 mm | 0.50 mm | 18.5 |

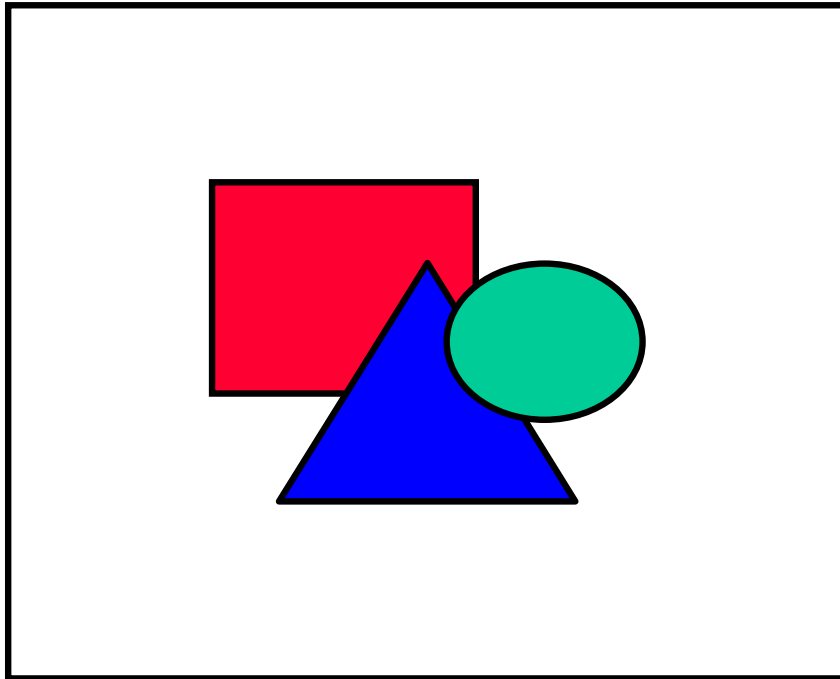
Hierna is met een endoscoop in de motor gekeken om de kleppen en zittingen te controleren. Hier was geen slijtage te zien, wel zat er in elke uitlaatpoort veel aanslag.

Vervolgens zijn de cilinderkoppen van cilinder 2 en 5 gedemonteerd om foto's te maken van de voering, de bovenkant van de zuigers en de onderkant van de koppen. Tevens zijn de kleppen uit de cilinderkoppen gedemonteerd en ook hiervan zijn foto's gemaakt. Ook hier werd, maar veel duidelijker, aanslag in de uitlaatpoort geconstateerd. In de inlaatpoort was daarentegen nauwelijks aanslag te zien, zie Figuur 3-6.



Figuur 3-6 Aanslag op de inlaatpoort en uitlaatpoort van cilinder Nr. 2

Bij de inspectie bleek het gasfilter in de gasstraat zeer vervuild te zijn met roet/teer. Dit zou een ernstige belemmering kunnen worden bij duurzaam bedrijf van de installatie onder dezelfde bedrijfscondities. Bedrijf gedurende enkele tientallen uren lijkt echter mogelijk.



Figuur 3-7 *Met teer vervuild gasfilter uit de gasstraat*

3.3 Overige resultaten uit de test

- In bypass-bedrijf wordt het stookgas langs de lange leiding gekoeld en net voor de reiniging teruggeleid naar de fakkels (zie Figuur 2-5). Dit heeft ongewenste condensatie in de retourleidingen naar de fakkels tot gevolg. Door de retourleiding te voorzien van een verwarmingslint kan condensatie worden voorkomen.
- Het vervangen van het zaagsel uit het zaagselbedfilter blijkt een vrij omslachtige procedure te zijn die in een commerciële installatie tot hoge operationele kosten zou leiden.

4. CONCLUSIES

4.1 Algemeen

De algemene doelstelling van het project GASREIP is het ontwikkelen, beproeven en demonstreren van apparaten en concepten voor de reiniging en toepassing van biomassa stookgassen. Daarbij valt aan de volgende toepassingen te denken:

1. vastbedvergassing + gasmotor
2. wervelbedvergassing + gasgestookte ketel
3. wervelbedvergassing + gasmotor
4. wervelbedvergassing + methanisering
5. wervelbedvergassing + STEG
6. vergassing + brandstofcel
7. vergassing + Fischer-Tropsch-synthese

Fase A was in eerste instantie gericht op de toepassingen 1. t/m 3. Er is een testopstelling ontworpen, gebouwd en in bedrijf gesteld bestaande uit twee vergasser (vastbed en wervelbed), gaskoeler, scrubber, zaagselbedfilter, booster, buffervat en gasmotor alsmede retourleidingen naar de fakkels van de vergassers.

Deze opstelling bleek geschikt voor het testen van gasreinigingsapparatuur achter de twee vergassingsinstallaties. Beide vergassers kunnen voldoende stabiel stookgas leveren als zij op houtpellets bedreven worden. De gasreinigingsinstallatie kan de relatief hoge concentraties van teer en stof uit BIVKIN stookgas gedurende enkele tientallen uren verwerken. Voor de uitvoering van langere duurtesten dient het gasreinigingssysteem te worden voorzien van een mogelijkheid om de in de gasreiniging opgevangen teren uit het systeem af te voeren.

De volgende tests zijn uitgevoerd:

- Een functionele test van het systeem BIVKIN, gasreiniging en afvalwaterzuivering.
- Een functionele test van het systeem MGB en gasreiniging.
- Een functionele test (gedurende 6 uur) van het systeem MGB, gasreiniging en gasmotor.

De eveneens geplande operationele testen van de afvalwaterzuivering zullen pas in het kader van fase B van het project worden uitgevoerd. De test van het motorgedrag als functie van de gastemperatuur is i.o.m. Novem komen te vervallen.

Bij de testen is gebleken dat de gekozen basisconfiguratie (koeler-scrubber-zaagselbedfilter) geschikt is voor korte bedrijfsperiodes van de bovengenoemde toepassingen 1. (vastbedvergassing + gasmotor) en 2. (wervelbedvergassing + gasgestookte ketel). Vanwege de onvoldoende verwijdering van teer uit stookgas afkomstig van wervelbedvergassing is de basisconfiguratie niet zonder meer geschikt voor de bovengenoemde toepassingen 3. t/m 7.

4.2 Prestatie van de gasreiniging en de afvalwaterzuivering

Teerverwijdering. De gasreiniging is in staat om relatief grote hoeveelheden teer (2400 tot 6100 mg/m_n³) te verwerken. Er zijn geen verstoppingen in de sproeiers of in de pompen opgetreden. Er is een verwijderingspercentage van 51-68 % voor teren bereikt. Dit is onvoldoende indien stookgas uit de BIVKIN (hoge teerconcentratie in het stookgas) in een gasmotor verstoekt dient te worden. Om deze reden is besloten om de gasmotor achter de configuratie MGB-gasreiniging in bedrijf te nemen. Voor het verstoken van het gas op een stoomketel is de teerconcentratie van ondergeschikt belang. Om ophoping van teer in de scrubber te voorkomen zal de installatie voor continu bedrijf voorzien moeten worden van een verwijderingssysteem voor teer/stof uit de scrubber.

Ammoniakverwijdering. Zoals verwacht werd ammoniak goed verwijderd naar concentraties rond de 40 mg/m_n^3 . Dit komt overeen met een verwijderingspercentage van 97.2-98.2 % en is ruim voldoende om aan de eisen van de gasmotor en de voor afvalverbrandingsinstallaties toegepaste emissie-eisen te voldoen.

Stofverwijdering. Stof wordt redelijk goed verwijderd, zowel bij lage als hoge stofbelastingen. Desondanks is het wenselijk om zoveel mogelijk stof uit het stookgas te verwijderen voordat het stookgas de scrubber ingaat om stof en teer grotendeels gescheiden op te kunnen vangen. Het afvoeren van teer uit de scrubber m.b.v. een (nog te bouwen) verwijderingsysteem wordt door aanwezigheid van stof belemmerd.

Afvalwaterzuivering. De afvalwaterreiniging functioneerde zonder verstoppingen. Om aan de lozingseisen te voldoen, zal waarschijnlijk een efficiënter stoffilter vereist zijn om de stofconcentratie te kunnen verlagen van 42 naar 30 mg/kg . Tevens wordt een geautomatiseerde pH-regeling op de stripper aangeraden, zodat de pH in de stripper op 11 ingesteld kan worden. De afvalwaterreiniging met betrekking tot teerverwijdering functioneert goed. Een rendement van 99.99 % is gemeten. Met betrekking tot lozing van water zal in alle gevallen overleg met de wetgevende instantie gepleegd worden. De toegestane belastingen verschillen per lozingsput.

Conclusie t.a.v. de eisen van de gasmotor. Met uitzondering van de verwijdering van teren, voldoet de gasreiniging aan de eisen van de gasmotor. De teerconcentratie na gasreiniging achter de MGB was 200 mg/m_n^3 hetgeen te hoog lijkt voor duurzaam bedrijf van de motor maar wel voldoende laag is om de gasmotor gedurende een aantal uren te bedienen. Bij duurtesten zal het filter voor de gasmotor af en toe gereinigd moeten worden om verstoppingsproblemen te voorkomen. Langere testen kunnen uitwijzen hoe vaak een filter vervangen moet worden.

4.3 Prestatie van de gasmotor

Na een opstartprocedure heeft de gasmotor gedurende 6 uur continu zonder problemen gedraaid. De fluctuaties in de stookgassamenstelling bleken geen problemen te veroorzaken.

Rookgasemissies. Onder stabiele verbrandingscondities zijn 130-150 ppm C_xH_y , 900-1000 ppm CO en ca. 25 ppm NO_x gemeten. Bij een verdere verlaging van het verbrandingsluchtdebiet wordt de vlamtemperatuur verhoogd hetgeen tot betere verbranding en daarmee verlaging van de emissies van CO en C_xH_y in het rookgas leidt terwijl de NO_x -concentratie juist stijgt. Het t.a.v. de rookgasemissies optimale werkgebied van de motor zal in het kader van een meer uitgebreid testprogramma bepaald moeten worden.

Opgewekt vermogen. De geïnstalleerde gasstraat bleek ongeschikt voor toepassing met houtgas. Het gasdebiet was beperkt op max. ca. $100 \text{ m}^3/\text{h}$ hetgeen en maximale vermogen met deze configuratie van 35 kW_{el} tot gevolg had. Dit kan aanzienlijk verhoogd worden door:

- Aanpassing van de gasstraat zodat een stookgasdebiet van ca. $160\text{-}180 \text{ m}_n^3/\text{h}$ verwerkt kan worden en de motor met een luchtvermaat λ van ca. 1.1-1.2 bedreven kan worden.
- Eventueel het later stellen van het ontstekingsstijdstip voor zover dit niet leidt tot onvolledige verbranding en daarmee hogere emissies van CO en C_xH_y .
- Gebruik van een generator die ontworpen is voor het asvermogen dat de motor bij bedrijf op stookgas opwekt.

Motorinspectie. Uit de inspectie van de motor bleek aanslag op de uitlaatpoorten van de cilinders. Slijtage is niet geconstateerd. Tevens bleek het gasfilter in de gasstraat zeer vuil te zijn van roet/teer. Dit zou een ernstige belemmering kunnen worden bij duurzaam bedrijf van de installatie onder dezelfde bedrijfscondities. Echter om hierover een gefundeerde conclusie te trekken zal de motor langdurig getest moeten worden.

5. AANBEVELINGEN EN VOORUITZICHT OP FASE B

In het kader van fase B van het project GASREIP zal de bestaande installatie uitgebreid worden t.b.v. andere dan in fase A geteste gastoeepassingen. Tevens zullen de geconstateerde knelpunten m.b.t. de reeds geteste toepassingen opgelost worden en zal het systeem dusdanig gemodificeerd worden dat de hele installatie ingezet kan worden voor duurtesten van bijvoorbeeld 1-2 weken. Gebaseerd op de in het kader van fase A getrokken conclusies worden hieronder een aantal aanbevelingen gedaan.

Modificaties in het systeem:

- De stookgas retourleidingen naar de fakkels dienen voorzien te worden van een verwarmingslint om condensatie van water en teer in bypass-bedrijf te voorkomen. In bypass-bedrijf wordt het stookgas wel langs de lange leiding gekoeld echter net voor de reiniging teruggeleid naar de fakkel. Bypass-bedrijf is belangrijk voor het opstarten van de installatie alsmede bij een storing in de gasreiniging.
- Het GASREIP systeem is zo uitgelegd dat slechts een gedeelte van het stookgas na de gasreiniging wordt benut door de gasmotor, de rest gaat naar de fakkel. Dit maakt het hele systeem flexibel, de gasmotor kan ongestraft aan en uitgeschakeld worden. Voor een commercieel systeem is het gedeeltelijk affakkelen van stookgas niet aanvaardbaar. Voor toekomstige testen is het wenselijk om een systeem te testen zonder restgas, zodat mogelijk regelproblemen ontstaan (beveiliging om te voorkomen dat de motor bij een te klein stookgasdebiet vacuüm trekt).
- Om het vermogen van de motor te kunnen bepalen dient de gasstraat voor de motor te worden voorzien van een gasdebietmeter.

Modificaties in de gasreiniging:

- Voor alle in het kader van GASREIP beoogde toepassingen is het wenselijk zoveel mogelijk stof voor de scrubber uit het stookgas te verwijderen zodat stof en teer grotendeels gescheiden opgevangen kunnen worden i.p.v. als mengsel in de scrubber/bezinkbak. De installatie dient uitgebreid te worden met een (in fase B te kiezen) apparaat t.b.v. stofafvangst voor de scrubber.
- Voor alle in het kader van GASREIP beoogde toepassingen is het wenselijk het zaagselbedfilter vanwege de relatief hoge operationele kosten te vervangen door een goedkoper te bedienen apparaat t.b.v. de verwijdering van restant stof en teer. (Het vervangen van het bedmateriaal is een vrij omslachtige procedure en kan niet tijdens bedrijf gebeuren.)
- Voor alle in het kader van GASREIP beoogde toepassingen anders dan gasgestookte ketels is een verdere verlaging van de teerconcentratie noodzakelijk. De installatie dient uitgebreid te worden met een (in fase B te kiezen) extra apparaat t.b.v. teerverwijdering.
- Voor geavanceerde toepassing van het stookgas bijvoorbeeld in STEG-systemen, methaniserings- of Fischer-Tropsch reactoren is teerverwijdering noodzakelijk in een thermische of katalytische kraakreactor. De geschiktheid van de verschillende op dit moment bekende apparaten en concepten is o.a. afhankelijk van de gewenste gastoeepassing, de schaalgrootte van de reactor en het beoogde type biomassa en dient nog nader bepaald te worden.

Modificatie voor duurbedrijf van de GASREIP-installatie

- Om ophoping van teer en stof in het systeem te voorkomen dient de gasreiniging te worden voorzien van een mogelijkheid om stof en teer gescheiden uit het systeem te verwijderen en vervolgens af te voeren of te verbranden.
- Door zoveel mogelijk stof voor de inlaat van de scrubber (zie ook modificaties in de gasreiniging hierboven) te verwijderen dient voorkomen te worden dat in de

scrubber/bezinkbak een stof/teer-mengsel ontstaat dat niet m.b.v. een pomp uit het systeem afgevoerd kan worden.

Modificatie van de gasmotor

- Verlaging van de luchtvermaat λ naar ca. 1.1-1.2 zodat een adiabatische vlamtemperatuur bereikt wordt die gelijk is aan die bij verbranding van aardgas.
- Modificatie van de gasstraat zodat een stookgasdebiet van ca. 160-180 m_n³/h door de motor aangezogen kan worden.
- Later stellen van het ontstekingsstijdstip voor zover dit niet tot onvolledige verbranding en daarmee tot hoge emissies van CO en koolwaterstoffen leidt.
- Uitvoering van een duurttest om gevolgen voor de motor zoals slijtage en vervuiling van zuigers en kleppen bij toepassing van biomassa stookgas beter te kunnen beoordelen.

REFERENTIES

- [1] S.D. Ytsma, L.P.M. Rijpkema, S. van Loo, E.P. Schenk and J.H.A. Kiel: *Stookgasreiniging bij vergassing van biomassa - State of the art*. Petten, ECN, Novem-EWAB no.9829, 72 p., 1998.
- [2] BTG: *Development of standard procedures for gas quality in biomass gasifier/power generation systems. A complementary study to "Joule" biomass gasifier projects*, Enschede, BTG, Novem-EWAB no.9608, 1996.
- [3] A. Brown and E. J. M. T. van den Heuvel: *Producer gas quality requirements for IGCC gas turbine use. A state-of-the-art overview*. Enschede, BTG, Novem-EWAB no.9603, 1996.
- [4] E.P. Schenk, J. van Doorn and J. H. A. Kiel: *Biomass gasification research in fixed bed and fluidized bed reactors*. Proc. Biomass Gasification and Pyrolysis, Stuttgart (Germany), April 1997.
- [5] L. Dinkelbach, H. Klein Teeselink, C.M. van der Meijden, J.P.A. Neeft, E.P. Schenk and S.D. Ytsma: *Gasification of wood waste from public gardens for CHP production*. Proc. 10th European conference and technology exhibition: Biomass for energy and industry. Würzburg (Germany), June 1998.
- [6] E.P. Schenk, J. van Doorn, M. Bodegom: *Operationele testen circulerend wervelbed vergasser voor biomassa*. Rapport ECN-98—075, September 1998.
- [7] J.W. Vermeulen, A. van der Drift: *Brandstoffen uit reststromen voor circulerend wervelbedvergassing*. Rapportage fase 2. Rapport NV Afvalzorg NH, September 1998.
- [8] http://www.ecn.nl/unit_fb/bivkin/index.html
- [9] http://www.ecn.nl/unit_fb/bivkin/afvalzorg/index.html
- [10] A. van der Drift; J. van Doorn: *Effect of type of fuel, moisture content and particle size on the carbon conversion and fuel gas quality for circulating fluidized bed gasification of biomass*. Proc. 1st world conference and exhibition on biomass for energy and industry. Sevilla (Spain), June 2000.
- [11] L.P.L.M. Rabou: *Laag-calorisch gas in gasmotoren en gasturbines*. Rapport ECN-CX—00-012, Petten, Februari 2000.
- [12] H.E.M. Stassen; H.J. Koele: *The use of LCV-gas from biomass gasifiers in internal combustion engines*. Proc. Biomass Gasification and Pyrolysis, Stuttgart (Germany), April 1997.

Bijlage A Schema van de integrale opstelling GASREIP