

BIOMASSA-MENGSELS

Reductie van kosten en problemen bij CFB-vergassing door inzet van brandstofmengsels

A. van der Drift
C.M. van der Meijden

Revisies		
A		
B		
Opgesteld door: A. van der Drift	Geverifieerd/goedgekeurd/vrijgegeven door: H.J. Veringa	ECN Biomassa

Colofon

Project nummer: 2020-01-13-14-007

Het onderhavige rapport beschrijft de resultaten van een project ingediend door ECN en Essent en uitgevoerd bij ECN met financiële ondersteuning vanuit het programma Duurzame Energie Nederland (DEN). Het DEN-programma wordt uitgevoerd door NOVEM (het huidige SenterNovem) in opdracht van het ministerie van Economische Zaken:

SenterNovem
P.O. Box 8242
NL-3503 RE UTRECHT
Tel: (+31) 30 239 34 88
Contactpersoon DEN-programma: K. Kwant
E-mail: k.kwant@novem.nl
Internet: www.senternovem.nl.

Novem 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.

De projectcoördinatie berustte bij:

ECN
A. van der Drift
Postbus 1
1755 ZG Petten
tel: 0224-564515
vanderdrift@ecn.nl

Datum rapportage: juni 2004

SenterNovem
Catharijnesingel 59
P.O.Box 8242
NL-3503 RE Utrecht
the Netherlands

Verantwoording

Dit rapport beschrijft de resultaten van het project “kostenreductie en onderdrukking van technische knelpunten bij CFB-vergassing door inzet van brandstofmengsels” met subsidie van Novem. Het project heeft Novem-projectnummer 2020-01-13-14-007 en ECN-projectnummer 7.2284.

Trefwoorden

vergassen, agglomeratie, teer, koelen, vervuiling, conversie

Abstract

Gasification of biomass in a CFB-gasifier (circulating fluidised bed) is the most popular method nowadays for large-scale applications. However, it produces tar, shows incomplete conversion, and in some cases is prone to agglomeration. Furthermore, coolers generally are fouled by depositions. This project focuses on improvements on these four items by choosing the right fuel mix.

It appears that fuel size plays an important role in all four problems. Small particles are preferred. Primary measures to reduce tar by adding secondary fuels, appears to be effective only if the fuel particles are small. Furthermore, smaller particles show higher conversion and do not disturb the fluidisation behaviour (as large particles do) to such an extent that temperature peaks appear and agglomeration is activated. Finally, fouling is strongly related to the presence of tar and char in the gas and therefore also small fuel particles are preferred.

If small fuel particles are fed, the agglomeration mechanism in a CFB-gasifier seems to be similar to that observed in a lab-scale BFB-gasifier (bubbling fluidised bed): formation of a coating around bed material. Sewage sludge and paper sludge have proven to significantly reduce the agglomeration risk. This also is the case for dolomite, magnesite and kaolin. Addition of wood dust however appears to worsen the process. This also holds for the addition of chicken manure to both grass and clean wood, although chicken manure itself has a very low agglomeration tendency.

From the research it is concluded that agglomeration, tar problems and fouling with a CFB-gasifier can be reduced by choosing the right fuel mix. However, this only works well if the fuel particles are small. With large particles (i.e. >10 mm), mixing does not have any positive effect, and also the problems of agglomeration and incomplete conversion are worse compared to the situation where the fuel is reduced in size. The only case where large particles might be accepted is if the hot product gas is directly fired in e.g. a large coal-fired boiler. In this case conversion is not an issue and mixing with wet fuels may be sufficient to suppress agglomeration.

INHOUD

LIJST VAN TABELLEN	6
LIJST VAN FIGUREN	6
SAMENVATTING	7
1. INLEIDING	9
2. VERGASSERS EN CONDITIES	11
2.1 Pilot-schaal CFB-vergasser	11
2.2 Lab-schaal BFB-vergasser	11
2.3 Brandstoffen	12
3. AGGLOMERATIE	13
3.1 Maatregelen	13
3.2 Resultaten lab-schaal	13
3.3 Resultaten pilot-schaal	15
3.4 Conclusies	17
4. TEER	21
4.1 Maatregelen	21
4.2 Resultaten lab-schaal	22
4.3 Resultaten pilot-schaal	22
4.4 Conclusies	23
5. CONVERSIE	25
5.1 Maatregelen	25
5.2 Resultaten	25
5.3 Conclusies	26
6. DEPOSITIE	27
6.1 Maatregelen	27
6.2 Resultaten lab-schaal	27
6.3 Resultaten pilot-schaal	29
6.4 Conclusies	29
7. CONCLUSIES EN DISCUSSIE	31
8. REFERENTIES	35
BIJLAGE A PILOT-SCHAAL CFB-VERGASSER (BIVKIN)	38
BIJLAGE B LAB-SCHAAL BFB WERVELBEDVERGASSER (WOB)	40
BIJLAGE C BRANDSTOFFEN	43
BIJLAGE D MECHANISMEN VAN AGGLOMERATIE	44

LIJST VAN TABELLEN

Tabel 1.	<i>Gemeten agglomeratietemperatuur in standaardtest in lab-schaal BFB-vergasser</i>	14
Tabel 2.	<i>Teer van lab-schaal BFB-vergasser bij twee ER's en met beuk met 10 en 40% vocht, laatste kolom: test met wilg</i>	22
Tabel 3.	<i>Teer van pilot-schaal CFB-vergasser met diverse brandstofmengsels</i>	23
Tabel 4.	<i>Samenvatting resultaten conversiemetingen in pilot-schaal CFB-vergasser met diverse brandstofmengsels.....</i>	25

LIJST VAN FIGUREN

Figuur 1.	<i>Typisch beeld van geagglomereerd bed</i>	15
Figuur 2.	<i>Foto's van agglomeratiestructuur na afloop van vergassingstest met graspoeder (links) en graspellets (rechts) in de pilot-schaal CFB-reactor.....</i>	16
Figuur 3.	<i>Verloop van drukvallen dp8 en dp2 bij overschakeling van grote pellets naar fijn hout (twee maal); de verstoorde circulatie herstelt zich volledig.....</i>	17
Figuur 4.	<i>Schematische weergave van het gemeten effect van kippenmest op het agglomeratiegedrag in mengsels met gras en hout.....</i>	18
Figuur 5.	<i>Schematische weergave van het gemeten effect van kippenmest op teerconcentratie en teerdauwpunt in mengsels met hout.....</i>	24
Figuur 6.	<i>Schematische weergave van het gemeten effect van kippenmest op de koolstofconversie in mengsels met hout</i>	26
Figuur 7.	<i>Gemeten temperatuur in de depositieprobe (links) en schematische weergave van de depositie na afloop van de eerste test (rechts).....</i>	27
Figuur 8.	<i>Foto van depositieplaatje na afloop van een test, links: na afloop van de eerste test (lage ER), rechts: na afloop van de derde test (hoge ER, nat hout).....</i>	28
Figuur 9.	<i>Schematische weergave van het effect van het mengen van kippenmest op drie problemen: agglomeratie, teer en conversie</i>	32

SAMENVATTING

Vergassing biedt de optie om met een hoog rendement elektriciteit te maken en tevens kunnen via vergassing vloeibare en gasvormige brandstoffen en zelfs chemische producten worden geproduceerd. De momenteel meest populaire reactor voor toepassingen op grote schaal is de CFB-reactor (circulerend wervelbed) vanwege zijn grote flexibiliteit wat betreft brandstofsoort en brandstofgrootte. De CFB-vergasser produceert echter veel teer, heeft geen volledige conversie, vertoont agglomeratie in enkele gevallen en vaak is er sprake van een snelle vervuiling van de gaskoeler direct na de vergasser. Onderhavig project is gericht op de verbetering van de prestatie van CFB-vergassers op genoemde punten door het kiezen van de juiste brandstofmengsels.

Gebleken is dat de brandstofgrootte een belangrijke rol speelt bij alle vier de genoemde problemen. Testen zijn uitgevoerd met twee uitersten: kleine biomassa van maximaal 2 mm en grote biomassa in de vorm van pellets. Vanwege de typische kenmerken van een pellet is gesteld dat de gebruikte pellets gezien kunnen worden als simulatie van houtdeeltjes met een dikte van minimaal 10 mm. Uit het onderzoek is geconcludeerd dat grote brandstof in het algemeen ongewenst is:

- **Conversie:** Grote brandstofdeeltjes zijn relatief weinig reactief waardoor de conversie laag is. Dit resulteert niet alleen in een laag rendement, maar ook de hoeveelheid af te voeren brandbaar residu (char ofwel houtskool) is relatief groot. Aangetoond is dat de conversie stijgt van 90-95% tot 97% als grote brandstof wordt verkleind tot circa 2 mm. Deze stijging is voldoende om het extra verbruik van elektriciteit voor het verkleinen van de brandstof te compenseren.
- **Agglomeratie:** Vanwege de slechte conversie van grote brandstof is er veel brandstof en char in de vergasser aanwezig. Aangetoond is dat dit leidt tot een verstoring van het fluïdisatiegedrag en daardoor een hoog risico op temperatuurpieken en dus agglomeratie. Gebleken is dat bij kleine brandstof agglomeratie plaatsvindt volgens een geheel ander mechanisme en verloopt op een wijze analoog aan dat in een lab-schaal BFB-vergasser: de opbouw van een coating rondom bedmateriaaldeeltjes. De opbouw van de coating kan worden gereduceerd door het aanbieden van extra oppervlak via de toevoeging van een asrijke brandstof. Met rioolslib en papierslib zijn in het verleden goede resultaten geboekt. Ook toevoeging van dolomiet, magnesiet en kaoliniet blijkt agglomeratie sterk te onderdrukken. Het in onderhavige studie gebruikte houtstof blijkt echter het probleem juist te vergroten. De toevoeging van kippenmest blijkt ook het agglomeratieprobleem te vergroten van zowel gras als schoon hout. Dit ondanks het feit dat zowel de gebruikte kippenmest als het gras en het hout in zuivere vorm niet tot agglomeratie leiden.
- **Teer:** Aangetoond is dat alleen met voldoende kleine brandstof de teerconcentratie, en ook het teerdauwpunt, kan worden verlaagd door de toevoeging van brandstoffen met katalytische activiteit voor teerafbraak. Gebleken is bijvoorbeeld dat met 20% kippenmest de teerconcentratie bij de vergassing van hout tot minder dan de helft zakt. Bij grote brandstof werkt dit niet.
- **Vervuiling:** Minder teer en minder char in het gas (hogere conversie) betekent ook een afname van de vervuiling van koelerooppervlak.

Geconcludeerd kan worden dat agglomeratie, teerproblemen en vervuiling in een CFB-vergasser kunnen worden onderdrukt door het gebruiken van de juiste brandstofmengsels. Aangetoond is echter dat dit alleen mogelijk is als de brandstofdeeltjes voldoende klein zijn. Bij grote brandstof (kleinste maat meer dan 10 mm) heeft mengen geen gunstig effect. Bovendien zijn bij het gebruik van grote brandstof agglomeratie- en conversieproblemen veel groter dan bij kleine brandstof. Er zijn dus goede redenen om grote brandstof vooraf te verkleinen. Voor

sommige toepassingen is verkleining niet noodzakelijk. Dat is het geval waarbij het hete gas uit een CFB-vergasser direct wordt bijgestookt op bijvoorbeeld een kolencentrale. Hierbij is conversie onbelangrijk en kunnen agglomeratieproblemen wellicht voldoende worden onderdrukt door de grote brandstof te mengen met een natte brandstof.

1. INLEIDING

Het vergassen van biomassa lijkt een grote toekomst te hebben als methode om duurzame energie te produceren. Op korte termijn wordt met name ingezet op de productie van elektriciteit (en warmte) uit biomassa. Voor de productie van elektriciteit is vergassing weliswaar geen vereiste stap, maar ten opzichte van de alternatieven kan een hoger elektrisch rendement worden gehaald. Op langere termijn zal ook de productie van vloeibare brandstoffen (zoals Fischer-Tropsch-diesel of methanol), SNG (synthetisch aardgas) en producten naar verwachting een grote rol gaan spelen. Hiervoor is vergassing een belangrijke stap.

Het vergassen van biomassa kan op vele manieren. Het circulerend wervelbed (CFB) lijkt echter een aantrekkelijk optie voor vele toepassingen. Dit is met name te wijten aan de brandstofflexibiliteit en opschaalbaarheid. Op dit moment zijn de meeste grote biomassavergassers in de wereld CFB-vergassers [1]. Bij veel van deze vergassers wordt het geproduceerde gas (productgas genaamd) niet of nauwelijks gereinigd en bijgestookt in een grote kolenboiler of cementoven¹. Bij enkelen wordt het gas in meer of mindere mate gereinigd en gebruikt in een stoom- en gasturbine² (STEG).

In alle gevallen waarbij biomassa wordt ingezet voor de productie van energie(dragers) geldt dat de prijs van de biomassa in grote mate de prijs van het eindproduct bepaalt. In dit verband wordt verwezen naar een tweetal studies waarbij elektriciteit resp. Fischer-Tropsch diesel wordt gemaakt uit schoon en droog hout van 4 €/GJ: (1) de prijs van elektriciteit bij kleinschalige WKK-eenheden (ca. 3 MW_e) wordt voor ruim 50% bepaald door de prijs van de biomassa [2] en (2) de prijs van Fischer-Tropsch diesel bij grootschalige eenheden (ca. 6 GW_{diesel}) wordt voor 40% bepaald door de prijs van de biomassa [3]. De economie van een installatie kan derhalve in het algemeen sterk worden verbeterd door gebruik te maken van goedkope biomassa. Vaak echter is goedkope biomassa minder geschikt als brandstof. Het mengen van goedkope “slechte” brandstoffen met dure “goede” biomassabrandstoffen kan belangrijke financiële voordelen bieden³. Uit de vele experimenten⁴ met de CFB-vergasser bij ECN zijn zelfs in enkele gevallen synergetische effecten geconstateerd. Daar tegenover lijken sommige mengsels juist extra nadelen te introduceren.

Essent bezit de grootste en enige commercieel bedreven CFB-vergasser in Nederland. Het is een 85 MW_{th} installatie waarbij het gas wordt gekoeld tot circa 500°C, deels wordt ontstoft in een cycloon en wordt bijgestookt in de kolengestookte boiler Amer-9 in Geertruidenberg [4,5]. De vergasser wordt bedreven met sloophout. Momenteel (status medio 2004) worden enkele modificaties aangebracht waarmee de operationele problemen van de afgelopen jaren naar verwachting definitief zullen zijn opgelost.

Probleemstelling

Duurzame energie uit biomassa is duur. Goedkope brandstoffen zijn vaak onvoldoende geschikt. Mengsels kunnen wellicht zowel goedkoop als geschikt zijn. Er kunnen echter ook

¹ Voorbeelden hiervan staan in Rüdersdorf (D), Pöls (A), Zeltweg (A), Grève-in-Gianti (I), Lahti (SF), Ruien (B), Geertruidenberg (NL)

² Voorbeelden hiervan staan in Värnamo (S) en Yorkshire/ARBRE (GB)

³ In dit project wordt gesproken van menging als gelijktijdig meerdere soorten brandstof worden gebruikt. Een andere vorm van mengen is de variatie van brandstof in de tijd, bijvoorbeeld in de zomer de ene en in de winter de andere brandstof. Dit type mengen wordt in dit project niet beschouwd. Dit “tijd mengen” is in feite één van de uitgangspunten bij de keuze van de vergassingsreactor: een circulerend wervelbed biedt een maximale flexibiliteit wat betreft de soort brandstof.

⁴ In opdracht van onder meer Afvalzorg, EnergieNed, HoSt, EU en Novem

“verkeerde” mengsels worden gemaakt die problemen juist vergroten. Kennis over het vergassingsgedrag van concrete mengsels is beperkt.

Aanpak

In het project wordt een viertal problemen onderscheiden. Getracht zal worden deze problemen te reduceren door het kiezen van de juiste brandstofmengsels.

1. agglomeratie
2. teervorming
3. onvolledige conversie
4. depositie (vervuiling van koeler)

In de Hoofdstukken 3 t/m 6 wordt elk van deze negatieve effecten nader besproken. Opgemerkt dient te worden dat de problemen niet volledig onafhankelijk zijn. Voor de duidelijkheid zal elk probleem echter als zodanig worden besproken. In de discussie zullen eventueel bestaande relaties worden aangegeven.

2. VERGASSERS EN CONDITIES

In het project wordt gebruik gemaakt van een tweetal bij ECN aanwezige wervelbedvergassers: een 0.5 MW_{th} pilot-schaal circulerend wervelbedvergasser (CFB⁵) en een 5 kW_{th} lab-schaal bubbling wervelbedvergasser (BFB⁶).

2.1 Pilot-schaal CFB-vergasser

De 0.5 MW_{th} CFB-vergasser van ECN, genaamd BIVKIN, is beschreven in Bijlage A. De vergasser bestaat uit een reactor van ruim 6 meter lengte en 20 cm doorsnede en wordt normaliter bedreven met circa 100 kg/uur droge biomassa. De brandstof is maximaal enkele centimeters groot. Het circulatiesysteem bestaat uit een cycloon, downcomer/valpijp en sealpot. De sealpot fungeert als sifon en bestaat uit een wervelbed bedreven met lucht en/of stikstof.

Koeler en koelprobe

Het geproduceerde gas wordt via een tweede cycloon geleid naar een koeler die het gas afkoelt tot circa 300°C middels een lange passief gekoelde⁷ pijp. Hierna wordt het gas verder ontstof in een (derde) cycloon en daarna gekoeld en gereinigd. Direct na de tweede cycloon is een zogenaamde koelprobe ingebracht waarmee het mogelijk is het vervuilinggedrag te kwantificeren. De probe wordt gekoeld met lucht en het luchtdebiet dat nodig is om de oppervlaktetemperatuur van de stalen probe constant te houden is een maat voor de vervuiling van de probe. Uit eerdere testen is een mechanisme afgeleid voor de vervuiling van koude oppervlakken en beschreven in [6,7]. Eind 2003 is de passieve koeler vervangen door een actieve koeler. In de actieve koeler wordt lucht gebruikt als koelmedium waarbij de hete lucht wordt gebruikt als verbrandingslucht in de naverbrander. Op diverse plaatsen in de nieuwe actieve koeler zijn koelprobes ingebracht om het vervuilinggedrag te kunnen meten. De nieuwe koeler wordt uitgebreid beschreven in [7].

Gasreiniging en gastoepassing

Het tot circa 300°C gekoelde gas kan op verschillende manieren worden gereinigd. Belangrijke onderdelen hiervoor zijn: hoge temperatuur filter, op olie gebaseerde gaswasser OLGA [8], op water gebaseerde gaswasser [9], elektrostatisch filter ESP [10]. Het gereinigde gas wordt standaard verbrand in een low-NO_x naverbrander die wordt bedreven met de hete lucht uit de koeler [11].

2.2 Lab-schaal BFB-vergasser

De 5 kW_{th} laboratorium opstelling, genaamd WOB, bestaat uit een zone met een diameter van 74 mm en circa 50 cm hoogte. Hierna verbreedt de vergasser zich tot 108 mm teneinde het verlies van bedmateriaal te reduceren. Bijlage B toont de maten en meetpunten van de WOB.

Standaard wordt de vergasser bedreven met 1 kg bedmateriaal. De bedhoogte tijdens fluïdisatie is circa 25 cm. Het brandstofdebiet is normaliter 1 kg/uur en de brandstof is meestal gezeefd tot een fractie van 0.7-2 mm. De vergasser wordt op temperatuur gehouden middels elektrische

⁵ CFB: circulating fluidised bed

⁶ BFB: bubbling fluidised bed

⁷ Passief gekoeld betekent hier dat de leiding niet wordt gekoeld met lucht, water of een ander medium, maar eenvoudigweg door warmteverlies naar de omgeving energie aan het gas onttrekt.

verhitting in meerdere zones. In het algemeen wordt de wandtemperatuur en bedtemperatuur gelijk gehouden en is er dus sprake van adiabatisch bedrijf. Het productgas wordt gereinigd in een cycloon en verder afgekoeld en gereinigd afhankelijk van het doel van het onderzoek.

Koelprobe

Voor het onderhavige project is een koelprobe ontworpen en gebouwd die kan worden geplaatst in de vergasser op een willekeurige hoogte boven het bed. De probe bestaat uit een met water gekoelde, naar buiten geïsoleerde, pijp met daaraan een viertal zogenaamde depositieplaatjes. Deze depositieplaatjes zijn dusdanig gedimensioneerd dat over de lengte van het plaatje een temperatuurprofiel ontstaat waardoor de depositie op meerdere temperatuurniveaus tegelijk kan worden onderzocht. Op vier plaatsen wordt de feitelijke probe-temperatuur gemeten. In Bijlage B worden de maten en meetpunten van de koelprobe gegeven.

Agglomeratie

Agglomeratie wordt gekwantificeerd via een standaard test waarbij de temperatuur na een 4 uur durende periode op 750°C stapsgewijs elke 30 minuten met 25°C wordt verhoogd. De procedure is beschreven in [12]. Agglomeratie kenmerkt zich door een plotseling sterk stijgende of dalende drukval. Agglomeratie wordt veelal voorafgegaan door een periode waarin gemeten bedtemperaturen geleidelijk van elkaar beginnen af te wijken.

EARS

EARS (Early Agglomeration Recognition System) is een methode waarmee het fluidisatiegedrag van een wervelbed wordt gekwantificeerd. Op basis van gemeten drukvariaties en de vergelijking met referentieperioden, wordt een zogenaamde S-waarde gegenereerd. Een S hoger dan 3 wordt in het algemeen gezien als een indicatie dat agglomeratie is gestart. EARS signaleert agglomeratie op een moment dat ligt voordat de conventionele methode (gemeten bed-temperaturen) agglomeratie signaleert. Voor een beschrijving van EARS wordt verwezen naar [13].

Gasreiniging en gastoepassing

Het gas uit de WOB wordt standaard afgefakkeld, maar kan ook worden geleid naar een gasreiniging bestaande uit filter, OLGA en waterwasser. Ook een thermische teerkraker is aanwezig. Het schone gas kan vervolgens worden geleid naar een gasmotor of SOFC brandstofcel [14] of worden gecompriëerd (en eventueel worden opgeslagen) en worden gebruikt voor de synthese van bijvoorbeeld Fischer-Tropsch diesel [15] of synthetisch aardgas (SNG) [16].

2.3 Brandstoffen

In het project zijn een groot aantal brandstoffen gebruikt: schoon hout pellets, beuk, sloophout (2 soorten), rioolslib, kippenmest, gras en houtstof. Voor de samenstelling wordt verwezen naar Bijlage C.

3. AGGLOMERATIE

Agglomeratie is het ongewenste effect dat het bedmateriaal in een wervelbed aan elkaar plakt en daardoor het fluidisatiegedrag verslechtert. De resulterende temperatuur-inhomogeniteit vergroot het probleem. Agglomeratie is dus een zichzelf versterkend verschijnsel. Veel gebruikte synoniemen van agglomeratie van een wervelbed zijn: sintering en de-fluïdisatie. In bijlage D wordt ingegaan op de mechanismen van agglomeratie. In [17] wordt agglomeratie bij verbranding uitvoerig beschreven.

3.1 Maatregelen

Maatregel 1: mengen met as-rijke brandstof

Een aanpak om het agglomeratieprobleem te reduceren is die waarbij de schadelijke componenten (vooral K) worden weggevangen en worden afgevoerd uit het systeem vóórdat ze een bepaalde kritische concentratie hebben bereikt. In dit geval is het zaak dat de tweede brandstof een groot aandeel aan relatief kleine inerte deeltjes bevat die worden weggeblazen uit het systeem nadat ze (een deel van) de K gebonden hebben. Rioolslib is zo'n brandstof. In een Europees project samen met o.a. Risø uit Denemarken is gebleken dat de agglomeratietemperatuur van stro met meer dan 100°C kan verbeteren door de toevoeging van rioolslib [12]. Rioolslib heeft een hoog gehalte aan inerte materialen die op zich niet voor grote agglomeratieproblemen zorgen. Papierslib en andere slibben vallen ook in deze categorie. Bij ECN is de gunstige werking van papierslib experimenteel aangetoond in combinatie met Miscanthus [18]. In eerder genoemd Europees project is verder aangetoond dat ook dolomiet, magnesiet en kaoliniet een gunstig effect hebben als toevoeging bij stro. Alle genoemde materialen combineren de eigenschappen van een hoog asgehalte met een lage K-concentratie. Op basis van een eerste analyse aan de hand van de Phyllis database [19] vallen ook de volgende materialen in de categorie *as-rijk* (en K-arm): houtstof, tapijtafval, kabelafval en autoshredderafval.

Maatregel 2: mengen met P-rijke brandstof

Uit fundamenteel onderzoek bij ECN aan agglomeratie zijn aanwijzingen gevonden dat Ca en P samen een soort beschermend laagje vormen rondom makkelijk smeltende verbindingen zoals kaliumsilicaat. Het laagje is voldoende poreus om transport naar binnen van o.a. kalium mogelijk te maken en dus op deze wijze kalium "onschadelijk" te maken. Dit zou betekenen dat Ca- en P-rijke biomassa in staat is het agglomeratieprobleem van een andere biomassabrandstof te reduceren. Ook in een Deens patent wordt de mogelijk gunstige werking van een P-rijk additief beschreven [20]. Voorbeelden van Ca- en P-rijke brandstoffen zijn: kippenmest, rioolslib en beendermeel.

3.2 Resultaten lab-schaal

In Tabel 1 worden de resultaten van de testen in de lab-schaal BFB vergasser weergegeven voor de diverse brandstof(mengsels).

Tabel 1 *Gemeten agglomeratietemperatuur in standaardtest in lab-schaal BFB-vergasser*

brandstof 1	brandstof 2	ratio [gew%]	agglomeratie temperatuur [°C]	opmerkingen
sloophout			750	sloophout van Afvalzorg
gras ^(a)			900	eco-gras Hartog, Abbekerk, gemalen pellets
gras ^(b)			875	idem, grotere fractie
gras ^(c)			925	idem, grotere fractie
gras ^(a)	rioolslib	75%-25%	900	eco-gras, slib van Uitw. Sluizen, Beverwijk
gras ^(a)	houtstof	75%-25%	850	eco-gras, houtstof van sloophout Afvalzorg
gras ^(a)	kippenmest	45%-55%	825	eco-gras, leghennenmest
	kippenmest		900	legghennenmest
beuk			>900	beuk van Rettenmaier
beuk	kippenmest	75%-25%	825	beuk van Rettenmaier, leghennenmest
beuk	kippenmest	25%-75%	840	beuk van Rettenmaier, leghennenmest
schoon hout			>900	witte pellets van Labee
beuk	kippenmest	75%-25%	agglomeratie na 1½ uur bij vaste temperatuur van 850°C	
gras ^(b)			agglomeratie na 7½ uur bij vaste temperatuur van 850°C	
gras ^(b)			agglomeratie na 1½ uur bij vaste temperatuur van 875°C	

a: zeeffractie 0.7-2 mm, vanwege voorbereiding is samenstelling mogelijk afwijkend van originele graspellets

b: zeeffractie <10 mm, pellets alleen verkleind, samenstelling is gelijk aan dat van het gras (pellets en poeder) zoals dat is gebruikt in de CFB-vergasser, zie Hoofdstuk 3.3

c: zeeffractie 3.2-10 mm, samenstelling mogelijk afwijkend van originele graspellets

Het gevolg van agglomeratie in de WOB is in alle gevallen een bedinhoud bestaande uit aan elkaar geplakte zanddeeltjes. De temperaturen die gemeten worden in het bed kunnen vele tientallen graden van elkaar afwijken en ook het verloop van de drukval vertoont discontinuïteiten. Na het openen van de reactor is in het algemeen een beeld zichtbaar zoals gegeven in Figuur 1. Duidelijk zichtbaar zijn de gaten die het gevolg zijn van de gebruikte lucht-verdeelplaat. Na het verwijderen van de thermokoppels, valt in het algemeen de bedinhoud vanzelf uit de reactor. Meestal zijn de krachten bij het neervallen voldoende groot om de klont (nagenoeg) volledig te laten uiteenvallen tot los zand. De vaste aan elkaar geplakte massa in de reactor vertoont gelijkenissen met een zandkasteel.

Wat opvalt uit Tabel 1 is dat gras pas agglomeratie oplevert bij 900°C. Dat is aanzienlijk beter dan met sloophout (750°C). Op basis van de samenstelling van het gras (hoge concentratie K en Si) lijkt dit niet logisch. Mogelijk dat hier sprake is geweest van het wegblazen van kaliumsilicaten waardoor ze niet de kans hebben gekregen om in het bed tot agglomeratie te leiden. Voor sloophout geldt waarschijnlijk dat de aanwezigheid van glas in de brandstof verantwoordelijk is voor de snelle agglomeratie.

Ook kippenmest blijkt pas bij 900°C te agglomereren in de standaard test. Dit is waarschijnlijk het gevolg van de hoge concentratie P en Ca (en Mg) die de negatieve effecten van met name K wegneemt. Ook beuk en schoon hout (Labee) agglomereert niet onder de 900°C. Dit kan verwacht worden op basis van de samenstelling, maar ook de testduur (typisch 6 uur) is te kort om bij brandstoffen met een zeer laag asgehalte voldoende as “op te bouwen” om agglomeratieproblemen te kunnen veroorzaken.



Figuur 1 *Typisch beeld van geagglomereerd bed, de foto is van onderaf genomen en toont de gaten overeenkomstig met het patroon van de gasdistributieplaat*

Het mengsel van kippenmest en gras leidt reeds bij 825°C tot agglomeratie. Verder blijkt het toevoegen van beuk aan kippenmest het agglomeratieprobleem te vergroten terwijl pure beuk helemaal niet agglomereert beneden 900°C. In beide gevallen blijkt dus het mengsel een grotere neiging te hebben tot agglomeratie dan beide zuivere uitersten. Een mogelijke verklaring hiervoor is dat bij menging van gras met kippenmest de oorspronkelijk gunstige verhouding Ca/K in kippenmest slechter wordt door toevoeging van gras met een lage verhouding Ca/K. Bij de menging van kippenmest met beuk is vanwege het zeer lage asgehalte van beuk de as van kippenmest dominant. Het is daardoor niet duidelijk hoe beuk negatief kan bijdragen aan agglomeratie van kippenmest.

Tegen de verwachting in blijkt de toevoeging van houtstof (van sloophout) de agglomeratie van gras te versnellen. Mogelijk dat ook hier de aanwezigheid van glas in de houtstof voor problemen zorgt.

3.3 Resultaten pilot-schaal

Graspellets en graspoeder

In de 0.5 MW_{th} CFB-vergasser zijn testen uitgevoerd met gras op 830-850°C. Het betreft eco-gras⁸ geleverd door Hartog grasdrogerij te Abbekerk. Het gras is gevoed als pellets (met een grootte van 6.4 mm diameter en lengte van 10 tot 20 mm, de dichtheid was circa 1250 kg/m³) en in de vorm van poeder (gemalen pellets, grootte gemiddeld 0.16 mm met 90% kleiner dan 0.4 mm).

De test met *graspellets* resulteerde binnen 1 uur tot een daling van de temperatuur in de sealpot/sifon hetgeen een voorteken is voor agglomeratie. Totaal is circa 5 uur vergast voordat werkelijke operationele problemen zich manifesteerden. De reactorinhoud is “bevroren” door de

⁸ Eco-gras is gegroeid zonder kunstmest.

lucht te vervangen door N_2 . Inspectie achteraf toonde harde clusters aan van aan elkaar geplakt zand: agglomeraten van enkele millimeters, zie Figuur 2 (rechts).

De test met graspoeder verliep zonder noemenswaardige problemen in de eerste uren. Pas na circa 3 uur werden de eerste tekenen van een verstoorde circulatie zichtbaar. Circa 7 uur na start leidde dit tot een gedwongen einde van de test. Inspectie van de bedinhoud achteraf liet agglomeraten zien, maar van een duidelijk andere structuur dan bij de test met graspellets, zie Figuur 2 (links). De agglomeraten bestonden nu uit zandkasteel-achtige structuren⁹ van enkele centimeters. Graspellets en -poeder leidt beide tot agglomeratie, maar duidelijk op een verschillende wijze. In Bijlage D wordt een tweetal agglomeratie-mechanismen besproken waarmee de geobserveerde verschillen kunnen worden verklaard.



Figuur 2 Foto's van agglomeratiestructuur na afloop van vergassingstest met graspoeder (links) en graspellets (rechts) in de pilot-schaal CFB-reactor, brokken zijn enkele centimeters groot

Stropellets en poeder

Eerder zijn testen uitgevoerd met stro, zowel los als in de vorm van pellets [21]. De pellets waren 5 mm diameter, 10 tot 20 mm lengte en hadden een dichtheid van 1150 kg/m^3 . De testen zijn uitgevoerd bij circa 800°C en met lucht op de sealpot. Gedurende de totaal 6 uur durende test met pellets zijn geen verschijnselen waargenomen die duiden op verstoorde circulatie of agglomeratie. De test met los stro bleek ook probleemloos. Opgemerkt dient te worden dat deze laatste test slechts 2 uur heeft geduurd vanwege niet-technische problemen.

Houtpellets en beukenzaagsel

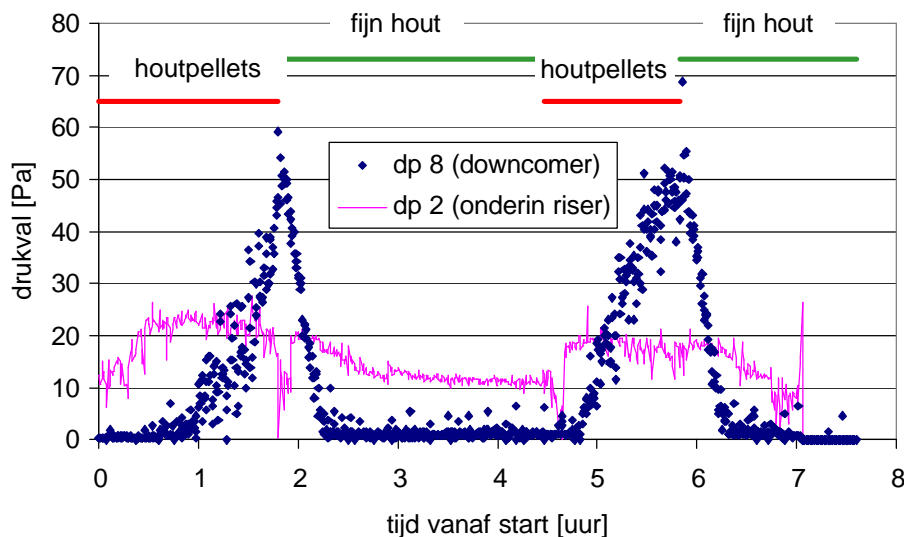
Een test met pellets van sloophout (12 mm diameter, 6-20 mm lengte, dichtheid circa 1200 kg/m^3) bij circa 850°C heeft geleid tot de eerste tekenen van verstoorde circulatie binnen 1 uur. Na totaal circa 2 uur waren de circulatieproblemen dermate groot dat normaliter de installatie uit bedrijf zou moeten. Tot twee maal toe is echter op dit punt overgeschakeld van de grote pellets naar kleine beukensnippers¹⁰ (zeef fractie 0.7-2 mm). Binnen circa 30 minuten herstelde de

⁹ Dit zijn relatief zachte poreuze structuren van los aan elkaar geplakt bedmateriaal (zand) dat uit elkaar valt bij geringe kracht. Dergelijke structuren worden meestal aangetroffen in de lab-schaal vergasser (WOB) na agglomeratie.

¹⁰ In werkelijkheid was dit een mengsel van beuk en pellets waarbij de bijdrage van de pellets slechts 20% is.

circulatie zich in beide gevallen volledig. In Figuur 3 is dit zichtbaar. De drukval dp8 onderin de downcomer (zie Bijlage A), die normaliter hooguit 5 Pa bedraagt, stijgt tot vele tientallen Pa. Dit duidt op de aanwezigheid van een zakkend bed tussen de meetpunten. Normaliter bevindt zich dit helemaal onder de meetpunten voor dp8. In Figuur 3 is tevens zichtbaar dat bij de eerste piek van dp8, drukval dp2 een zeer lage waarde heeft. Dit betekent dat de riser (haast) leeg is geblazen.

Het lijkt er sterk op dat de minder reactieve pellets zich langzaam ophopen en daarbij de circulatie verstoren. De samenstelling van de houtpellets is echter dusdanig dat agglomeratie (vooral nog) uitblijft ondanks de verslechterde temperatuur-uniformiteit in de vergasser. Het overschakelen naar een reactieve (kleine) brandstof leidt tot het langzaam verdwijnen van de grote pellets en volledig herstel van de circulatie.



Figuur 3 Verloop van drukvallen dp8 en dp2 (in downcomer resp. onderin riser, zie Bijlage A voor exacte plaats) bij overschakeling van grote pellets naar fijn hout (twee maal); de verstoorde circulatie herstelt zich volledig

3.4 Conclusies

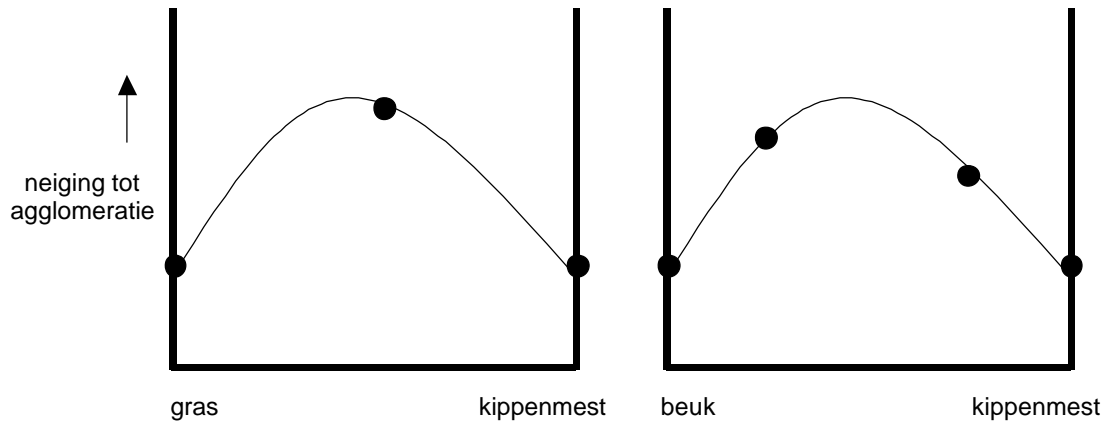
Duidelijk is dat agglomeratie in beide vergassingsinstallaties (lab-schaal BFB en pilot-schaal CFB) kan optreden, maar dat er grote verschillen bestaan in zowel “agglomeratietemperatuur” als agglomeraten. Dit is te verklaren door aan te nemen dat agglomeratie in beide opstellingen verloopt volgens verschillende mechanismen: type I (coating-agglomeratie) en type II (smelt-agglomeratie). In Bijlage D worden beide mechanismen nader toegelicht.

Lab-schaal testen en type I agglomeratie

In de lab-schaal vergasser is agglomeratie zonder uitzondering het gevolg van het type I mechanisme. Hierbij leidt de opgebouwde coating rondom bedmateriaal-deeltjes op den duur tot een slechtere fluidisatie en vervolgens tot agglomeratie. In een lab-schaal BFB is dit het preferente mechanisme vanwege de zeer goede warmteoverdracht in het wervelbed waardoor type II agglomeratie minder kans krijgt. Bovendien is in een BFB de fluidisatie relatief mild (in tegenstelling tot een CFB) en is daardoor een geringe “plakkracht” tussen deeltjes voldoende om defluidisatie te bewerkstelligen. Verder geldt dat op lab-schaal de brandstof per definitie fijn is en er dus weinig kans is op lokale piektemperaturen door een groot brandend deeltje.

Brandstofmengsels

Met de standaard agglomeratietest in de lab-schaal BFB-vergasser is aangetoond dat in een aantal gevallen de neiging tot agglomeratie groter is voor het mengsel dan voor beide zuivere stromen. Het mengen heeft dus een negatief effect. In Figuur 4 is dit schematisch weergegeven. Voor het verloop van het agglomeratiegedrag bij de menging van kippenmest met beuk is mogelijk de wijziging van de Ca/K-verhouding de oorzaak. Voor het gedrag bij de menging van kippenmest met beuk is geen verklaring.



Figuur 4 Schematische weergave van het gemeten effect van kippenmest op het agglomeratiegedrag in mengsels met gras en hout; punten: meetpunt, lijn: geïnterpoleerde relatie

Brandstofpellets

Bij het gebruik van brandstof in de vorm van pellets blijft vanwege de relatief geringe reactiviteit (grote afmeting, hoge dichtheid, weinig breuk door slijtage) veel char aanwezig in de reactor. Dit kan oplopen tot 15 massa% van de totale bedinhoud¹¹. Veel van deze deeltjes zullen vanwege hun grote afmeting zich onderin de vergasser verzamelen en daar lokaal vanwege het overschot aan zuurstof veel heter kunnen worden dan hun omgeving. De aanwezigheid van lokaal veel grote deeltjes resulteert tevens in een slechte menging. Dit levert een grote kans op temperatuurpieken. Hetzelfde geldt voor de deeltjes die worden rondgeblazen in een CFB-reactor en de luchtgeblazen sealpot/sifon bereiken.

De verstoring van fluïdisatie en circulatie bij het gebruik van pellets is duidelijk aangetoond in de CFB-vergasser. Bij het gebruik van houtpellets blijkt dit te kunnen worden hersteld door over te schakelen op een kleine brandstof. Bij het gebruik van gras echter lijkt het proces van agglomeratie reeds gestart te zijn. De test met graspellets in de CFB-vergasser resulteerde in aan elkaar gesinterd bedmateriaal, geheel in overeenstemming met het type-II mechanisme (smelt-agglomeratie). Met exact hetzelfde gras in de vorm van fijngemalen poeder bleek agglomeratie minder snel op te treden en vervolgens volgens het type I mechanisme te verlopen.

Het grote verschil tussen hout en gras is uiteraard de samenstelling. Gras bevat circa 40 keer meer K. Betrokken op de massa van de as is dit een verschil van een factor 6. Een ander verschil is dat een chardeeltje van hout beter in staat is eventueel gesmolten bestanddelen af te schermen van de omgeving omdat het asgehalte van een volledig ontgast deeltje bij hout slechts 10% bedraagt en bij gras 40%.

¹¹ Dit is bepaald door gecontroleerd uitbranden na afloop van een vergassingstest met sloophoutpellets. Het is in overeenstemming met theoretische berekeningen door [36].

Testen met stropellets hebben niet geleid tot agglomeratie in de CFB-vergasser. De temperatuur tijdens deze test was met 800°C relatief laag, maar ook de samenstelling verschilt significant van dat van gras. De gebruikte stropellets bevatten weliswaar een vergelijkbare hoeveelheid K, maar de hoeveelheid silicium is veel hoger. De as van de stro heeft hierdoor een smeltpunt dat beduidend hoger is dan dat van gras.

Brandstofpoeder

Het vergassen van graspoeder in de CFB-vergasser leidt niet alleen tot een langere tijd agglomeratie-vrij bedrijf dan bij het gebruik van pellets van dezelfde brandstof, het resulteert tevens in andere agglomeratie-structuren. Het lijkt te bevestigen dat bij het gebruik van poeder in een CFB, agglomeratie optreedt door het ontstaan en groeien van een coating op bedmateriaal (type I mechanisme). In de lab-schaal BFB is dit het preferente mechanisme omdat, vanwege de beperkingen van het voedingssysteem, de brandstof per definitie relatief fijn gemalen is. Pogingen om grote deeltjes (gras) te voeden zijn weliswaar geslaagd, maar vanwege de noodzakelijke voorbereiding kon niet worden voorkomen dat ook de chemische samenstelling wijzigde en dus een goede vergelijking onmogelijk is.

Sealpot/sifon in CFB-vergasser

In de CFB-vergasser van ECN bevat het circulatiesysteem een wervelbed dat fungeert als sifon. Het wervelbedje wordt bedreven als BFB. De verschillen met de lab-schaal BFB zijn (1) de snelheden zijn relatief laag met 2-3 maal u_{mf} versus 10-15 maal u_{mf} in de lab-schaal BFB¹², (2) de brandstof ter plaatse is voornamelijk ontgaste char waardoor (3) relatief weinig vluchtige bestanddelen aanwezig zijn. De eerste reden betekent dat de sealpot in principe gevoelig is voor agglomeratie vanwege de milde fluidisatie. Zeker als bedacht wordt dat een deel van de inhoud bestaat uit relatief grote char-deeltjes die de fluidisatie negatief beïnvloeden. Daarbij komt dat de downcomer is gevuld met een zakkende statische massa en dus een eventuele plakkerige coating alle kans krijgt om bedmateriaal aan elkaar te plakken. Omdat de brandstof in de sealpot voornamelijk bestaat uit ontgaste char, zal er waarschijnlijk weinig nieuwe coating wordt opgebouwd in de sealpot. Dit kan echter reeds gebeurd zijn in de riser. Alles bij elkaar is de initiatie van agglomeratie in de sealpot niet uit te sluiten. Daarbij komt dat een circulatiestoring leidt tot het versneld leegblazen van de riser¹³ met bijbehorende problemen. Een gering probleem in de sealpot kan daardoor een groot probleem worden in de riser.

Opschaling

Bij de opschaling van een CFB geldt in het algemeen dat de diameter van de reactor wordt vergroot opdat de gassnelheid gelijk blijft. Dit zou betekenen dat er in principe wat agglomeratiegedrag betreft geen grote wijzigingen optreden. Als echter de grote CFB op druk wordt bedreven, dan neemt de concentratie biomassa (char) sterk toe vanwege (1) de relatief geringe hoeveelheid bedmateriaal en (2) de tragere conversie. Dit wordt nog extremer als ook zuivere zuurstof wordt gebruikt in plaats van lucht. De CFB op druk (en bedreven met zuurstof) heeft daardoor aanzienlijk grotere kans op type II agglomeratie. Mogelijk dat daardoor strengere eisen moeten gesteld aan de maximale brandstofgrootte bij bedrijf op druk. Verder geldt dat als opschaling gepaard gaat met grotere brandstofdeeltjes, dat dit een extra risico oplevert op type II agglomeratie. Normaliter zal echter vanaf een schaal van circa 1 MW_{th} de brandstofgrootte niet meer toenemen en grofweg enkele centimeters bedragen.

Voor het effect van opschaling van een BFB geldt in principe dezelfde redenering als voor een CFB. Het verschil is echter dat een BFB minder gevoelig is voor type II agglomeratie vanwege het grotere vermogen temperatuurpieken te kunnen onderdrukken.

¹² u_{mf} is de minimale fluidisatiesnelheid; vanwege het verschil van bedmateriaalgrootte tussen pilot-schaal CFB en lab-schaal BFB is de ratio tussen werkelijke gassnelheid en u_{mf} een praktisch wijze om de mate van "wervelintensiteit" uit te drukken.

¹³ Bij een volledige circulatiestop is de riser in theorie leeg na slechts enkele tientallen seconden

Conclusie

Het agglomeratieprobleem dat wordt waargenomen in de CFB-vergasser is feitelijk een fluïdisatie/circulatieprobleem. De oplossingen moeten dan ook gericht zijn op het vermijden van verstoringen van fluïdisatie en circulatie. Aangetoond is dat dit betekent dat het gebruik van grote, relatief weinig reactieve, biomassa moet worden beperkt. Daarnaast geldt in het algemeen dat gezorgd dient te worden voor een zo constant mogelijke brandstoftoevoer. Gebleken is dat als de condities in een CFB zodanig worden gekozen dat fluïdisatie- en circulatieproblemen niet meer optreden, het agglomeratiemechanisme analoog is aan dat in de lab-schaal BFB. In beide gevallen is het feitelijke agglomeratieprobleem het gevolg van de opbouw van een coating rondom bedmateriaal (type I agglomeratie). Verwacht wordt dat ook in grotere CFB en BFB-vergassers dit het preferente mechanisme is/wordt mits de fluïdisatie- en circulatieproblemen zijn opgelost. Met name voor een grote CFB-vergasser op druk/zuurstof vergt dit mogelijk extra maatregelen.

De continue verversing van het bedmateriaal is een simpele en vermoedelijk adequate oplossing voor het agglomeratieprobleem in een BFB of een CFB (mits hydrodynamische problemen zijn opgelost). De verversingsfrequentie kan waarschijnlijk worden gereduceerd door het toevoegen van brandstoffen (of inerte toevoegingen) die een grote hoeveelheid extra oppervlak aanbieden aan het coatingmateriaal én relatief makkelijk uit de reactor worden geblazen zodat de coating wordt afgevoerd uit het systeem. Dergelijke brandstoffen zijn rioolslib en papierslib. De gunstige werking hiervan is aangetoond in de lab-schaal BFB-installatie. De toevoeging van houtstof blijkt echter niet te leiden tot een verbetering. Ook blijken mengsels van kippenmest met beuk of gras de agglomeratieproblemen te vergroten ten opzichte van de zuivere niet gemengde brandstoffen. Dit wordt slechts ten dele begrepen.

4. TEER

Teer is de verzamelnaam van grote koolwaterstoffen. Teer is meestal ongewenst vanwege de eigenschap te condenseren bij relatief hoge temperatuur, leidend tot vervuiling van apparatuur. Het gebruik van de grootte teerdauwpunt [$^{\circ}\text{C}$] is in dit geval praktisch. Bij temperaturen onder het teerdauwpunt zullen teren condenseren. Bij ECN wordt momenteel gewerkt aan een on-line methode om direct het teerdauwpunt te meten. Tot nu toe wordt het teerdauwpunt bij ECN berekend op basis van de gemeten teersamenstelling. Voor een wervelbedvergasser wordt vaak een teerdauwpunt berekend van circa 200°C . Vanwege de beperkingen van de teermeetmethode (het grootste detecteerbare teermolecuul is 300 g/mol , grotere teren worden niet gemeten) is het werkelijke teerdauwpunt hoger en waarschijnlijk veel hoger, geschat wordt $300\text{-}400^{\circ}\text{C}$, zie Hoofdstuk 6. Dit betekent dus dat condensatie optreedt op oppervlakken kouder dan $300\text{-}400^{\circ}\text{C}$.

Een geheel andere categorie teren wordt gevormd door de heterogene verbindingen. Deze bevatten naast C- en H-atomen ook O, N of S en kenmerken zich door een goede oplosbaarheid in water. Bij systemen waarbij het gas wordt gereinigd met natte wassers, leidt de aanwezigheid van deze teren tot een afvalwaterprobleem. Tenslotte kan worden vermeld dat teer uit CFB-vergassers enkele procenten energie vertegenwoordigen. Voor eigenschappen van teren in het algemeen wordt verwezen naar [22]. Meer informatie over het teerdauwpunt is te vinden in [23] en op www.thersites.nl.

4.1 Maatregelen

In experimenten uitgevoerd in opdracht van onder meer Afvalzorg [24] is gebleken dat rioolslib een sterk reducerend effect heeft op de concentratie teer in het stookgas tijdens de vergassing van hout. Dit effect is bevestigd door meerdere partijen. Een reden voor dit effect is waarschijnlijk de aanwezigheid van grote hoeveelheden aardalkalimetalen (Ca en Mg) die katalytisch werken bij de afbraak van teer. Op basis van de samenstellingen verzameld in de database Phyllis vallen ook de volgende brandstoffen in de categorie die als additief de teerconcentratie kunnen verlagen (Ca- en/of Mg-rijk): kippenmest, tapijtafval en ONF¹⁴. Testen zijn uitgevoerd met kippenmest en rioolslib in mengsels met schoon hout.

Een andere test is uitgevoerd in de CFB-vergasser waarbij een mengsel is gemaakt van kleine en grote brandstof. De test is bedoeld om de volgende hypothese te bewijzen/verwerpen: grote biomassa levert de char die katalytisch werkt voor de teerafbraak van de teren gevormd door de kleine biomassa. De redenering hierbij is gebaseerd op een aantal aannamen: (1) bij gebruik van normale (grote) brandstof in een CFB wordt teer geproduceerd in de gehele reactor omdat brandstof in de gehele reactor aanwezig is en dus ontgast, (2) char werkt katalytisch voor de teerafbraak [25,26], (3) kleine biomassa ontgast met name in de onderste zone van een CFB waardoor er de gelegenheid is om deze teren daarna af te breken en (4) kleine biomassa produceert geen/nauwelijks char die de eigen teer kan afbreken.

Bekend is dat de concentratie water in het gas een belangrijke invloed heeft op de teerhoeveelheid en –samenstelling. Om het effect van de aanwezigheid van water en de extra hoeveelheid lucht (die in de praktijk nodig is om de extra water te verdampen) te scheiden, zijn met de lab-schaal vergasser enkele testen uitgevoerd. In deze relatief kleine vergasser zijn de

¹⁴ ONF: organische natte fractie; het voornamelijk organische deel van het restafval (grijze afval)

parameters brandstofvochtgehalte en ER¹⁵ niet gekoppeld en kan de invloed van deze parameters op de teer onafhankelijk worden onderzocht.

4.2 Resultaten lab-schaal

In een drietal testen in de WOB lab-schaal vergasser is het effect van ER en de concentratie water in het gas op de teersamenstelling bepaald. Hiervoor is beuk gebruikt als brandstof. Tabel 2 toont de resultaten. De teerconcentratie is bepaald zowel vlak boven het bed als ná het freeboard.

Tabel 2 *Teer van lab-schaal BFB-vergasser bij twee ER's en met beuk met 10 en 40% vocht, laatste kolom: test met wilg [23]*

vochtgehalte	10%	10%	40%	43%
ER	0.24	0.38	0.38	0.25
totale teerconcentratie boven bed [g/m _n ³]	14.0	9.0	5.5	9.2
totale teerconcentratie na freeboard [g/m _n ³]	12.4	8.4	4.6	8.5
teerdauwpunt boven bed freeboard [°C]	186	184	179	166
teerdauwpunt na freeboard [°C]	189	178	159	176
concentratie heterogene teren [g/m _n ³]	1.2	0.7	0.3	0.2

Een verhoging van de ER, bij verder gelijkblijvende condities, leidt tot een forse reductie van de hoeveelheid teer. Het teerdauwpunt blijkt echter nauwelijks te veranderen. Het verhogen van het vochtgehalte van de brandstof bij gelijkblijvende ER leidt ook tot een forse daling van het teergehalte. Het dauwpunt zakt ook enigszins. Dit is in overeenstemming met eerder gerapporteerde resultaten [23]. In alle gevallen neemt ook de hoeveelheid wateroplosbare teren af. De in de praktijk onvermijdelijke combinatie van een hoger vochtgehalte en een hogere ER leidt dus tot een teerreductie en teerdauwpuntsverlaging die zowel het gevolg is van de extra lucht als het extra water. Opgemerkt dient te worden de berekende teerdauwpunten een onderschatting zijn van de werkelijke waarde, vanwege de beperkingen van de teermeetmethode. De boven geschetste effecten van vocht en ER op teerdauwpunt zijn daardoor mogelijk in werkelijkheid veel groter.

Verder blijkt dat in het freeboard netto circa 10% van de teer verdwijnt, maar dat met name bij de derde test (nat hout en hoge ER) reacties plaatsvinden die het teerdauwpunt verlagen. Blijkbaar speelt de aanwezigheid van water een belangrijke rol bij de afbraak van de zeer grote teren.

4.3 Resultaten pilot-schaal

In Tabel 3 staan de resultaten samengevat van de testen met brandstofmengsels uitgevoerd in de 0.5 MW_{th} CFB-vergasser. Wat betreft de teerdauwpunten geldt ook hier dat het een berekende waarde betreft en het dauwpunt in werkelijkheid waarschijnlijk veel hoger is.

¹⁵ ER (equivalentie ratio) is de verhouding tussen de werkelijk toegevoegde hoeveelheid lucht (zuurstof) en de hoeveelheid die nodig zou zijn voor de stoichiometrische verbranding van het gas. Een vergasser opereert per definitie bij een ER < 1. Bij een ER > 1 spreekt men over verbranding en wordt de ER vaak aangeduid met λ.

Tabel 3 *Teer van pilot-schaal CFB-vergasser met diverse brandstofmengsels*

brandstof(mengsel)	vergasser- temperatuur [°C] en ER	totale teer- concentratie [g/m _n ³]	water- oplosbare teer [g/m _n ³]	teer- dauwpunt [°C]	referentie
schoon hout (pellets)	880 - 0.30	6.5	0.1	192	deze studie
...met 25% rwzi-slib	900 - 0.30	5.8	0.1	191	deze studie
...met 50% rwzi-slib	900 - 0.29	6.6	0.2	188	deze studie
...met 60% kippenmest	860 - 0.38	6.1	0.4	180	deze studie
beuken chips (0.7-2 mm)	840 - 0.28	12.2	0.6	200	deze studie
...met 20% kippenmest	840 - 0.30	5.5	0.06	180	deze studie
...met 15% schoon hout (pellets)	830 - 0.27	12.6	0.2	200	deze studie
schoon hout (pellets)	850 - 0.22	14.0		198	[27]
kippenmest	830 - 0.50	1.4	0.2	125	[28]

Hout en rioolslib

Testen zijn gedaan met schoon hout (in de vorm van kleine pellets) in mengsels met 25 en 50% rioolslib. Rioolslib blijkt niet in staat te zijn de teerconcentratie of het teerdauwpunt te veranderen.

Hout en kippenmest

Testen met kippenmest als toevoeging zijn uitgevoerd met zowel beuk (chips van 0.7-2 mm) als schoon hout (pellets). In beide gevallen daalt de totale teerconcentratie en het teerdauwpunt door de toevoeging van kippenmest. Het effect is echter vooral groot bij het gebruik van beukenchips, ondanks het feit dat hier het mengsel voor slechts 20% uit kippenmest bestond. Mogelijk dat (zie hypothese genoemd in Paragraaf 4.1) vanwege de geringe afmeting van de gebruikte beuk, en de daardoor snelle ontgassing in de vergasser, er een zone bestaat bovenin de riser waarin geen teren worden gevormd en de teerreductie door de kippenmest-componenten maximaal kan worden benut.

Klein hout en groot hout

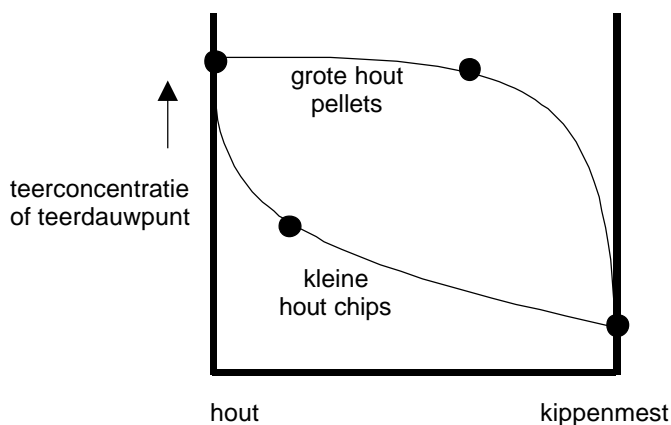
Een test met 85% klein hout en 15% groot hout (pellets) blijkt geen wijzigingen op te leveren van teerconcentratie en -dauwpunt ten opzichte van de beide zuivere stromen. De toevoeging van pellets van schoon hout heeft niet het effect zoals dat van kippenmest. Dat kan twee oorzaken hebben: (1) de pellet-bestanddelen zijn onvoldoende in staat teren te reduceren en/of (2) de pellets ontgassen ook bovenin de riser en kunnen daardoor netto de teerconcentratie niet reduceren.

4.4 Conclusies

Uit testen met de lab-schaal BFB-vergasser blijkt dat de hoeveelheid teren significant kan worden gereduceerd door het gebruik van natte biomassa. Zowel de extra lucht als de aanwezigheid van extra water in het gas zijn de oorzaak van de teerreductie. Opvallend is echter dat het teerdauwpunt behorende bij de teer die is gemeten direct boven het wervelbed nauwelijks daalt bij het gebruik van nattere biomassa. In het freeboard daarentegen vinden processen plaats die het teerdauwpunt verlagen. Hierbij blijkt de aanwezigheid van water in het gas een vereiste. Opgemerkt dient te worden dat het gebruik van nattere biomassa weliswaar gepaard gaat met een forse reductie van de teerconcentratie teer en ook het teerdauwpunt, maar dat gelijktijdig de capaciteit en het rendement van een vergasser daalt.

In een CFB-vergasser bestaat geen freeboard. De gehele reactor wordt gebruikt voor de ontgassing van de brandstof. Er lijken echter mogelijkheden om de gunstige effecten van een freeboard in een BFB-vergasser ook te creëren in een CFB-vergasser. Hiervoor is het

noodzakelijk een brandstof te kiezen dat dusdanig klein is dat het volledig ontgast onderin de riser waardoor feitelijk de bovenste zone als freeboard kan dienen. Om dit te testen is gebruik gemaakt van de katalytische werking van kippenmest op de afbraak van teer. Kippenmest zelf is dusdanig klein dat het vermoedelijk compleet ontgast onderin de riser. Gebleken is dat een mengsel van kippenmest met kleine beukenchips inderdaad de teerconcentratie significant verlaagt en ook het teerdauwpunt verlaagt ten opzichte van de test met 100% beukenchips. Bij gebruik van pellets blijkt echter noch de teerconcentratie noch het teerdauwpunt significant te dalen door de toevoeging van kippenmest. Waarschijnlijk wordt dit veroorzaakt door het feit dat de relatief weinig reactieve pellets ook bovenin de riser ontgassen waardoor de kippenmest de gelegenheid niet heeft de teren af te breken. Er bestaat feitelijk geen freeboard. In Figuur 5 is bovenstaande schematisch weergegeven.



Figuur 5 *Schematische weergave van het gemeten effect van kippenmest op teerconcentratie en teerdauwpunt in mengsels met hout; punten: meetpunt, lijn: geïnterpoleerde relatie*

Omdat bekend is dat char (ontgaste biomassa) op zich katalytische activiteit vertoont voor teerafbraak, is getracht dit effect te gebruiken in het “freeboard” van een CFB-vergasser op analoge wijze als de eerder beschreven methode met kippenmest. Gebleken is echter dat de effecten op teer nihil zijn. Mogelijk is dit vanwege de geringe activiteit van char ten opzichte van de ontgaste kippenmest. Waarschijnlijker is echter dat de pellets (ondanks het gekozen geringe aandeel in het mengsel) in te grote mate teren produceren bovenin de riser. Het was ook om dezelfde reden dat kippenmest niet in staat bleek de teren van pellets af te breken.

5. CONVERSIE

De conversie van biomassa in een CFB-vergasser is gemiddeld 90% [27]. De resterende 10% verlaat het systeem in de vorm van een koolstofrijk vast residu. Het koudgasrendement is daardoor niet optimaal. Bovendien moet het koolstofrijke vaste residu (char) worden afgevoerd, hetgeen kosten met zich mee kan brengen.

5.1 Maatregelen

Testen met pure kippenmest hebben aangetoond dat zelfs bij relatief lage procestemperaturen de conversie hoog is en de teeremissie laag is. De relatief hoge concentratie aardalkalimetalen (Ca en Mg) zijn waarschijnlijk de reden hiervoor. Deze elementen kunnen katalytisch werken bij de conversie van biomassa (en teer). In een mengsel met hout wordt wellicht iets van deze gunstige effecten van kippenmest van toepassing op het gedeelte hout. Andere Ca- en/of Mg-rijke brandstoffen zijn: rioolslib, tapijtafval en ONF.

5.2 Resultaten

De testen in het kader van conversie zijn uitgevoerd in de pilot-schaal CFB-vergasser. De lab-schaal BFB-vergasser is ongeschikt voor dit deel van het onderzoek, omdat vanwege de beperkingen aan de brandstofgrootte de conversie in het algemeen reeds zeer hoog is.

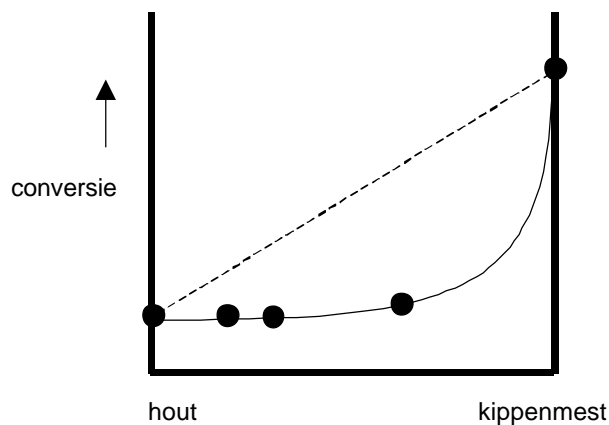
In Tabel 4 staan de resultaten samengevat van de testen die gedaan zijn met brandstofmengsels met het doel de conversie te verhogen. Hieruit blijkt dat de toevoeging van kippenmest of rioolslib geen enkel effect heeft op de conversie van hout. De enige werkelijke significante conversietoename wordt veroorzaakt door een verhoging van de temperatuur. Eerder is door ECN aangetoond dat de rendementsdaling door de toename van de temperatuur volledig gecompenseerd wordt door de toename van de conversie (tot een maximum) [27].

Tabel 4 *Samenvatting resultaten conversiemetingen in pilot-schaal CFB-vergasser met diverse brandstofmengsels*

brandstof(mengsel)	vergassertemperatuur [°C] en ER	koolstof-conversie [gew%]	referentie
schoon hout (pellets)	880 - 0.30	95%	deze studie
...met 25% rwzi-slib	900 - 0.30	94%	deze studie
...met 50% rwzi-slib	900 - 0.29	95%	deze studie
...met 60% kippenmest	860 - 0.38	95%	deze studie
sloophout (pellets)	750 - 0.17	85%	[18]
...met 35% kippenmest	750 - 0.18	85%	[18]
beuken chips (0.7-2 mm)	840 - 0.28	97%	deze studie
...met 20% kippenmest	840 - 0.30	96%	deze studie
schoon hout (pellets)	850 - 0.22	91%	[27]
schoon hout (pellets)	880 - 0.26	94%	[27]
schoon hout (pellets)	900 - 0.27	96%	[27]
sloophout (pellets)	850 - 0.27	92%	[27]
kippenmest	750 - 0.30	95%	gemiddeld
kippenmest	830 - 0.50	98%	niet geplubl. test uit [28]

5.3 Conclusies

Aangetoond is dat een verhoging van de conversie niet kan worden bereikt door het toevoegen van een brandstof met een op zich hoge conversie. Er is geen synergetisch effect waarneembaar, de mogelijk katalytische werking op de conversie van de ene brandstof lijkt niet te werken voor de andere brandstof in het mengsel. Het is zelfs andersom: de brandstof met op zich slechte conversie-eigenschappen (hout, met name pellets) verlaagt de conversie van de brandstof met op zich goede conversie-eigenschappen (kippenmest). Figuur 6 toont dit schematisch. Een reden voor het onverwachte effect is moeilijk te geven. Feit is dat met name houtpellets de omgeving van kippenmest in de vergasser domineren. Het kan daardoor bijvoorbeeld zijn dat de eerste cycloon minder efficiënt werkt en/of het fluïdisatiegedrag anders is dan in het geval dat 100% kippenmest vergast wordt.



Figuur 6 *Schematische weergave van het gemeten effect van kippenmest op de koolstofconversie in mengsels met hout; punten: meetpunt, getrokken lijn: geïnterpoleerde relatie, stippellijn: relatie als er geen onderlinge beïnvloeding zou zijn*

6. DEPOSITIE

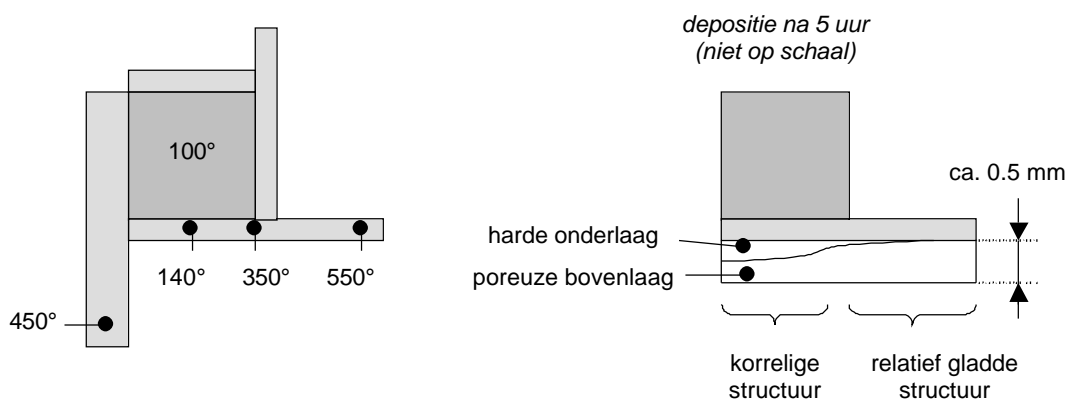
Vaak zal het gas uit een CFB-vergasser worden gekoeld. Hierbij kan stoom worden geproduceerd (zoals in de installatie van Essent in Geertruidenberg), heet water of hete lucht worden gemaakt. In alle gevallen blijkt de vervuiling van koelerooppervlakken een serieus probleem te zijn dat leidt tot het niet halen van de beoogde gastemperatuur of het noodzakelijkerwijs overdimensioneren van de koeler. De vervuiling van de koeler lijkt sterk samen te hangen met de concentratie zware teren in het gas.

6.1 Maatregelen

Een waarschijnlijk belangrijke factor bij de vervuiling van warmtewisselaars is de concentratie (zware) teren. Daarnaast is het van belang wat de capaciteit is van de deeltjes in het gas om een vervuiling weg te slijten, vergelijkbaar met zandstralen. Voor een goed zandstraal-effect is een hoge concentratie grote deeltjes met hoge dichtheid het best. Dit kan gerealiseerd worden door een brandstof te kiezen met een hoog asgehalte en/of het gehalte koolstof (lage dichtheid) in de deeltjes te minimaliseren. Een andere methode is het gebruiken van (gesleten) bedmateriaal door de stofafvangst (cycloon of filter) te plaatsen achter de koeler en niet ervoor.

6.2 Resultaten lab-schaal

Bij de drie testen zoals genoemd in Tabel 2 is een depositieprobe geplaatst boven het bed zoals beschreven in bijlage B. De probe hing circa 25 cm boven het fluidiserende bed. De testen duurden 5 uur. Vanwege het uitsteken van de probe buiten het actief gekoelde centrum, is een temperatuurprofiel over de probe gecreëerd. Dit is gemeten en is in Figuur 7 gegeven. Tevens is schematisch weergegeven hoe de vervuiling op het oppervlak van één van de vier depositieplaatjes eruit ziet. Figuur 8 toont foto's van de probe na de test. Duidelijk zichtbaar is het verloop van de vervuiling als functie van de temperatuur van het oppervlak.

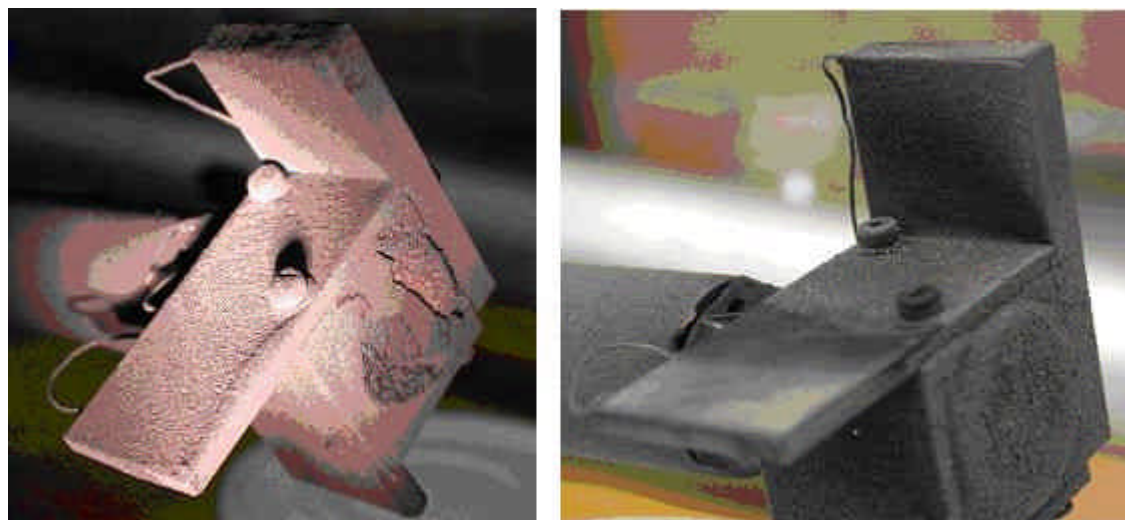


Figuur 7 *Gemeten temperatuur in de depositieprobe (links) en schematische weergave van de depositie na afloop van de eerste test (rechts)*

Het waargenomen depositiegedrag laat zien dat teercondensatie optreedt tot een oppervlaktetemperatuur van circa 350°C. Hierboven is geen duidelijke teerlaag waarneembaar. Genoemde 350°C is veel hoger dan de berekende teerdauwpunten zoals weergegeven in Tabel 2. De reden hiervoor is dat het teerdauwpunt wordt berekend uit de gemeten teersamenstelling, maar de gebruikte meetmethode (SPA-methode) niet in staat is om teren te meten groter dan circa 300 g/mol. Hoewel de concentratie van deze zware teren waarschijnlijk gering is, is de invloed op het dauwpunt groot. Opgemerkt dient te worden dat teermoleculen onderling kunnen reageren via zogenaamde polymerisatiereacties¹⁶. Dit verhoogd feitelijk het dauwpunt.

De poreuze bovenlaag, bestaande uit een poreus geheel van aan elkaar geplakte chardeeltjes, is overal aanwezig. Hoewel deze laag eenvoudig te verwijderen is, is de afstand tot het wervelbed tijdens de testen blijkbaar dermate groot geweest dat geen significant “zandstraal-effect” is waargenomen. De totale dikte van 0.5 mm (opgebouwd in 5 uur) betekent grofweg een halvering van de totale warmteoverdracht¹⁷!

De depositie op de bodem van de probe, met een temperatuur van circa 100°C, is eveneens circa 0.5 mm dik na de eerste test. Hierbij is echter de onderlaag duidelijk teerachtig en kneedbaar. In tegenstelling tot de depositie op het depositieplaatje zoals getoond in Figuur 7 is hier een duidelijke teergeur waarneembaar.



Figuur 8 Foto van depositieplaatje na afloop van een test, links: na afloop van de eerste test (lage ER), rechts: na afloop van de derde test (hoge ER, nat hout)

De deposities na de tweede en derde test (bij een hoge ER vanwege respectievelijk een extra warmteverlies en extra natte brandstof, zie Tabel 2) zijn dunner dan die na de eerste test. De derde test levert zelfs een laag die dunner is dan 0.1 mm. Ook is geen teergeur waarneembaar van de probe na de derde test. Er blijkt dus een significant verschil te bestaan in het depositiegedrag bij verhoging van de ER. Met name de hoge ER in combinatie met een hoog watergehalte leidt tot een relatief gunstige situatie wat betreft de vervuiling van een koeloppervlak. Dit is in overeenstemming met de gemeten trend in teerconcentratie en teerdauwpunt¹⁸ zoals gegeven in Tabel 2 (pagina 22). Ook is het waarschijnlijk van belang dat

¹⁶ De term polymerisatie wordt hier gebruikt voor reacties die de molecuulmassa verhogen en de dampspanning daardoor verlagen. Dit kan plaatsvinden door dehydrogenering, dehydratie of andere mechanismen. De snelheid van deze reacties neemt in het algemeen toe met de temperatuur. In [7] wordt 200°C genoemd als minimale temperatuur.

¹⁷ Aangenomen is een warmtegeleidingscoëfficiënt van 0.15-0.20 W/mK gebaseerd op eerder nog niet gepubliceerd werk bij ECN.

¹⁸ Het berekende teerdauwpunt wordt vanwege beperkingen van de teer-meetmethode onderschat. Trends zijn daardoor mogelijk in werkelijkheid veel groter.

er vanwege de hogere conversie bij hoge ER minder chardeeltjes in het gas aanwezig zijn die kunnen bijdragen aan de opbouw van een isolerende bovenlaag op de koeler.

6.3 Resultaten pilot-schaal

Tijdens de testen in de pilot-schaal CFB-vergasser is gebruik gemaakt van depositieprobes zoals beschreven in Paragraaf 2.1, zie ook [6,7]. Mengsels zijn gemaakt met rioolslib en kippenmest in een poging de concentratie deeltjes in het gas te verhogen en op deze wijze depositie te vermijden via een soort zandstraal-effect.

Gebleken is dat de toevoeging van rioolslib aan schoon hout (pellets) geen enkel effect heeft op het depositiegedrag. In alle gevallen is gedurende de test geen significante afname gemeten van de warmteoverdracht ondanks het feit dat de probetemperatuur tijdens de testen slechts circa 200°C was en dus enige teerafzetting verwacht mag worden. Het teerdauwpunt is namelijk berekend op circa 200°C (zie Tabel 3) en is in werkelijkheid waarschijnlijk hoger. De reden voor het uitblijven van een verbetering is dat tijdens deze testen de tweede cycloon opzettelijk buiten werking is gesteld waardoor de in grote hoeveelheid meegesleurde deeltjes de depositieprobe reeds schoonstralen. De deeltjesconcentratie bij het gebruik van schoon hout pellets is circa 10 g/m³. De toevoeging van extra deeltjes (tot 35 resp. 80 g/m³) als gevolg van het gebruik van rioolslib kan blijkbaar geen extra effect meer opleveren.

De testen met beuk als brandstof en in combinatie met kippenmest of schoon hout pellets laten eveneens geen reductie van warmteoverdracht zien op een probe die gekoeld is op 180°C (voor teergegevens bij genoemde testen, zie Tabel 3). Ook hier is blijkbaar de schurende werking van de reeds in het gas aanwezige deeltjes voldoende groot om de probe schoon te houden van een isolerende laag. De toevoeging van extra deeltjes (m.n. door toevoeging kippenmest) kan geen verbetering meer geven.

Geconcludeerd wordt dat in alle gevallen de probe als gevolg van de schurende werking van de deeltjes in het gas vrij wordt gehouden van een isolerende laag. Opgemerkt dient te worden dat uit inspectie achteraf blijkt dat er in alle gevallen een zwart laagje aanwezig is op de probe. Dit is gecondenseerde en grotendeels gepolymeriseerde teer die vanwege het compacte karakter van de laag (en de geringe dikte) geen merkbare invloed heeft op de warmteoverdracht.

6.4 Conclusies

Uit de testen wordt geconcludeerd dat het ontbreken van een deeltjesscheider (cycloon of filter) tussen CFB-vergasser en koeler dermate positief werkt voor het schoonschuren van het koeleroppervlak dat een verdere verhoging van de deeltjesconcentratie geen extra effect oplevert. Met name de grote en zware deeltjes domineren het “zandstraal-effect”. Methoden om depositie te minimaliseren zouden dus gericht moeten zijn op het effect van relatief zware en grote (bedmateriaal) deeltjes.

In de lab-schaal vergasser is een depositieprobe gebruikt die feitelijk het teerdauwpunt meet. Via het opgelegde en gemeten temperatuurprofiel in combinatie met het visueel aangetoonde verloop van de teerdepositie op de probe is aangetoond dat het teerdauwpunt circa 350°C bedraagt. Dit is veel hoger dan het uit de gemeten teerconcentratie berekende dauwpunt van circa 200°C. Oorzaak hiervan is de aanwezigheid van zeer zware teren die niet gemeten kunnen worden met de toegepaste SPA-methode.

7. CONCLUSIES EN DISCUSSIE

Getracht is door het gebruik van combinaties van brandstoffen de vergassingseigenschappen van een CFB-vergasser te verbeteren. De werkzaamheden zijn gericht op een viertal problemen: agglomeratie, teer, onvolledige conversie en depositie.

Agglomeratie

Het agglomeratieprobleem in een CFB-vergasser is vaak het gevolg van een fluïdisatieprobleem of een verstoring van de circulatie. Aangetoond is dat dit samenhangt met het gebruik van grote brandstofdeeltjes. Met name het gebruik van pellets blijkt snel tot fluïdisatieproblemen te leiden die afhankelijk van de samenstelling van de brandstof resulteert in agglomeratie. Een pellet is vanwege de hoge dichtheid (vaak ruim boven 1000 kg/m^3) een soort extreme vorm van een weinig reactief deeltje (lees: groot deeltje) waardoor relatief veel al of niet ontgaste brandstof in de vergasser aanwezig is wat een negatief effect heeft op de fluïdisatie. Het gevolg is agglomeratie volgens het zogenaamde type II mechanisme: lokaal zijn dermate hoge temperaturen dat ter plaatse componenten smelten en het probleem vergroten.

Bij het gebruik van kleine brandstoffen in een CFB-vergasser zijn hydrodynamische problemen (fluïdisatie, circulatie) niet of nauwelijks aanwezig. Beschreven type II agglomeratie is daardoor minder waarschijnlijk. Als agglomeratie toch plaatsvindt, dan is dit volgens een ander mechanisme waarbij langzaam een coating wordt opgebouwd rondom de bedmateriaaldeeltjes. In dit zogenaamde type I mechanisme kan de aangegroeide coating op den duur leiden tot het aan elkaar plakken van deeltjes eindigend in defluïdisatie. Dit mechanisme blijkt ook het mechanisme te zijn van agglomeratie zoals dat in de lab-schaal BFB vergasser wordt waargenomen. Gesteld kan dus worden dat de lab-schaal BFB-vergasser representatief is voor een CFB-vergasser wat betreft agglomeratie, mits de CFB-vergasser vrij is van fluïdisatie- en circulatieproblemen (die bijvoorbeeld het gevolg kunnen zijn van het gebruik van te grote brandstofdeeltjes).

Agglomeratie volgens het type I mechanisme is complex. Het regelmatig verversen van bedmateriaal lijkt een doeltreffende methode om agglomeratie te vermijden. Mogelijk kan met het gebruik van de agglomeratie-detectiemethode EARS de verversingssnelheid worden geminimaliseerd. Uit testen in het verleden is gebleken dat behalve de continue verversing van bedmateriaal, ook de toevoeging van een asrijke biomassa zoals rioolslib en papierslib een effectieve methode is om agglomeratie te onderdrukken. Verder is uit de literatuur bekend dat de toevoeging van een P- en Ca-rijke brandstof de schadelijke effecten van een coating afschermen en dus agglomeratie onderdrukken. In onderhavig project is onder meer onderzocht of het as-rijke houtstof en het P- en Ca-rijke kippenmest een gunstig effect kan hebben. Gebleken is echter dat dit niet het geval is. Het mengen blijkt zelfs een negatief effect te hebben op agglomeratie zie Figuur 9. Dit wordt slechts ten dele begrepen.

Teer

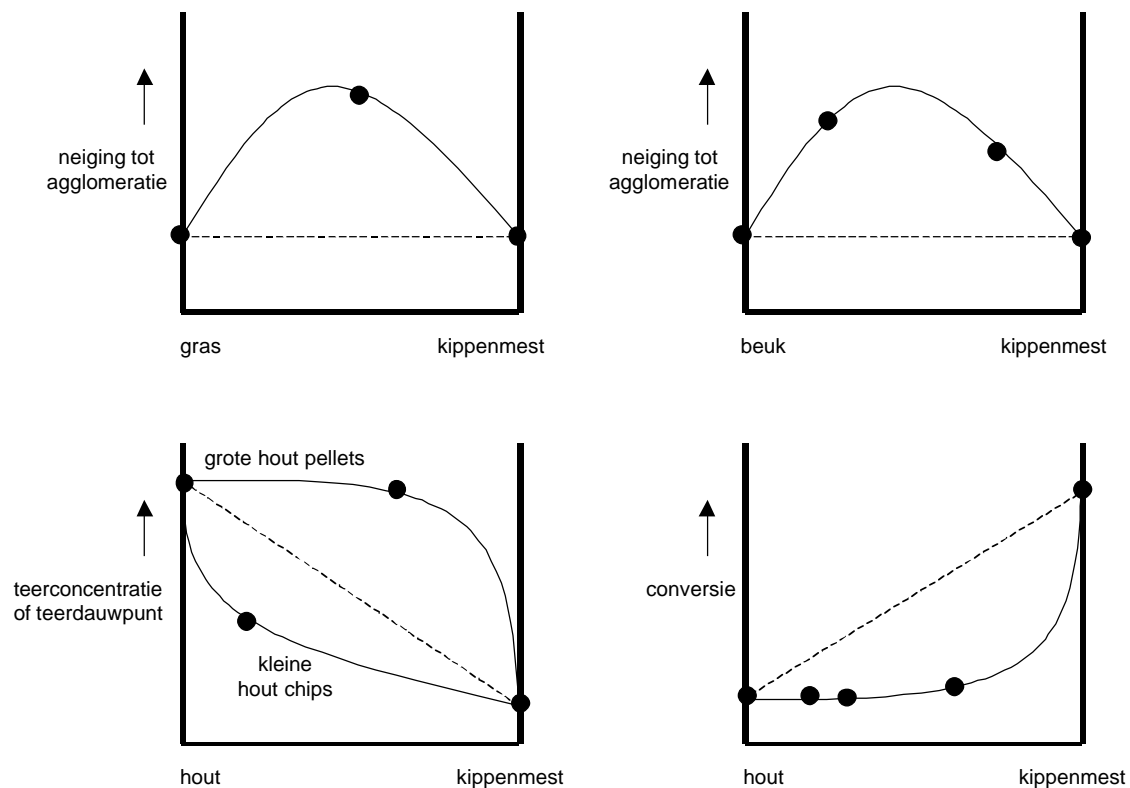
Het teerdauwpunt is een praktische grootheid die het teerprobleem (vervuiling) kwantificeert. Uit testen met de lab-schaal BFB-vergasser is gebleken dat met name reacties in het freeboard het teerdauwpunt kunnen verlagen. Hiervoor is de aanwezigheid van water gewenst. Uit testen in het verleden is bekend dat ook katalytisch actieve materialen (mineralen, char) met name in het freeboard de teerconcentratie verlagen.

Getracht is ook in de CFB-vergasser een zone te creëren met de bijbehorende gunstige effecten op de teerconcentratie. Hiervoor is kippenmest gebruikt als brandstof met katalytische werking wat betreft teerafbraak. Gebleken is dat het mengen met kippenmest in een CFB-vergasser

aanzienlijke verbeteringen kan brengen wat teer betreft. Voorwaarde hierbij is echter dat de brandstof dermate klein is dat het (nagenoeg) volledig ontgast onderin de vergasser en er dus bovenin een zone ontstaat die vergelijkbaar is met het freeboard in een BFB-vergasser, zie Figuur 9.

Conversie

Een CFB-vergasser bedreven met hout heeft in het algemeen geen hoge conversie. Kippenmest daarentegen blijkt juist nagenoeg volledig om te zetten. Getracht is iets van het positieve (waarschijnlijk deels katalytische) effect van kippenmest over te brengen op hout. Gebleken is echter dat dit niet mogelijk is en zelfs de conversie van kippenmest wordt geremd door het hout, zie Figuur 9. Het mengen heeft dus een negatief effect op de conversie.



Figuur 9 Schematische weergave van het effect van het mengen van kippenmest op drie problemen: agglomeratie, teer en conversie; punten: meetpunt, getrokken lijn: geïnterpoleerde relatie, stippellijn: relatie als er geen onderlinge beïnvloeding zou zijn

Depositie

Uit eerder onderzoek is bekend dat de condensatie van teer een belangrijk verschijnsel is bij de vervuiling van koelers. De werkelijke barrière voor warmteoverdracht wordt echter gevormd door een poreuze laag bestaande uit met name chardeeltjes. Deze laatste laag kan relatief eenvoudig worden verwijderd/vermeden via het effect van "zandstralen". Een hoge deeltjesconcentratie in het gas kan dan voldoende zijn. Uit testen met de CFB-vergasser is gebleken dat 10 g/m^3 voldoende is en een verdere verhoging door bijvoorbeeld de toevoeging van rioolslib aan de brandstof geen zin heeft. Waarschijnlijk is vooral de aanwezigheid van enkele grote en zware deeltjes belangrijk. Het ontbreken van een cycloon of andere deeltjesscheider vóór de koeler is daarvoor essentieel.

Via een serie depositie-tests in de lab-schaal BFB-vergasser is aangetoond dat depositie van teren plaatsvindt op oppervlakken met temperaturen ruim boven de berekende teerdauwpunten van 180-190°C. Verder blijkt een verhoging van ER en vochtgehalte (bijvoorbeeld door gebruik van natte brandstof) een zeer gunstig effect te hebben op de vervuiling van koelerooppervlak. Dat is vermoedelijk het gevolg van de verlaging van hoeveelheid teer en het teerdauwpunt, maar ook de afname van de concentratie chardeeltjes in het gas kan een rol spelen.

Variabele: Brandstofgrootte

Testen in de CFB-vergasser zijn uitgevoerd met twee uiterste brandstofgroottes: kleine biomassa van 2 mm en minder en grote biomassa in de vorm van pellets met een diameter en lengte van beide minimaal 6 mm. Pellets zijn hier gebruikt als simulatie van “normale” biomassa zoals houtchips. Pellets zijn echter op een viertal punten essentieel anders dan houtchips:

- Pellets hebben een relatief hoge dichtheid vanwege de persdruk bij het pelletiseren: de dichtheid van pellets en droog wilgenhout is circa 1200 resp. 500 kg/m³.
- Pellets zijn isotroop wat betreft belangrijke fysische eigenschappen terwijl hout vanwege zijn poriestructuur in hoge mate anisotroop is (vezels lopen in de lengterichting van een houtdeeltje). Hierdoor heeft een pellet meer last van de zogenaamde “pyrolyse-wind” waarbij ontsnappende relatief koude gassen de opwarming van een deeltje tegenwerken [29]. Bij hout ontsnappen de gassen in de lengterichting parallel aan de oriëntatie van de vezels terwijl het warmtetransport juist hoofdzakelijk in een richting dwars daarop plaatsvindt.
- Houtchips hebben vanwege hun vezelstructuur in het algemeen een grotere lengte/dikte-ratio. Waarden van 10 zijn geen uitzondering.
- Een partij houtchips is samengesteld uit deeltjes van vele afmetingen (zowel dikte als lengte), terwijl bij pellets alleen de lengte varieert en dat meestal in slechts geringe mate.

Op basis van bovenstaande verschillen en experimenteel bepaalde waarden van conversie bij gebruik van onder meer houtpellets en wilg van verschillende afmetingen¹⁹ [18] wordt hier gesteld dat de gebruikte pellets gezien kunnen worden als simulatie van houtdeeltjes waarvan de kleinste maat (dikte, lengte) minimaal 10 mm is.

Geconcludeerd wordt dat grote brandstof in het algemeen ongewenst is. Grote brandstofdeeltjes zijn relatief weinig reactief waardoor de conversie laag is. Dit betekent niet alleen een laag rendement, maar betekent ook dat er veel (ontgaste) brandstof in de vergasser aanwezig is. Aangetoond is dat dit resulteert, via een verstoring van het fluïdisatiegedrag, in een verhoogd risico op temperatuurpieken en dus agglomeratie. Verder is aangetoond dat alleen met voldoende kleine brandstof de teerconcentratie en teerdauwpunt kan worden verlaagd door de toevoeging van brandstoffen met katalytische activiteit voor teerafbraak (in de testen is kippenmest gebruikt). Bij grote brandstof werkt dit niet. Minder teer en minder char in het gas (hogere conversie) betekent in het algemeen ook een afname van de vervuiling van koelerooppervlak.

Tenslotte kan worden opgemerkt dat het verkleinen van hout tot deeltjes van slechts enkele millimeters circa 0.01 kW_e/kW_{th,biomassa} kost [30]. Deze 1% extra elektriciteit kan worden geproduceerd als de conversie toeneemt met 3 à 4% punten (bij aangenomen totaal elektrisch rendement van 25-35%). Op basis van deze studie, maar ook van eerdere studies, kan gesteld worden dat een 3-4% conversietoename mogelijk is als grote brandstof wordt verkleind tot enkele millimeters. Als tevens agglomeratieproblemen uitblijven en teer- en depositieproblemen kunnen afnemen, kan gesteld worden dat het verkleinen van biomassa aantrekkelijk is.

¹⁹ In de pilot-schaal CFB-vergasser bij ECN zijn testen gedaan met pellets (10 mm diameter en 10-20 mm lang) en wilg zowel in de vorm van gezaagde cilinders (10 mm diameter en 10 of 40 mm lang) als chips. De koolstofconversie bij 850°C en een ER van 0.30 (de gemeten waarden zijn ten behoeve van de goede vergelijking allemaal gerekend naar een ER van 0.30 met de relatie $\Delta(\text{conversie})=37\% \Delta(\text{ER})$) was voor pellets: 89%, wilg-cilinders: 90% en wilg-chips: 93%.

Variabele: Vochtgehalte

Het vochtgehalte van de brandstof speelt een grote rol bij alle genoemde problemen. Dit betekent dat de menging van een brandstof met een relatief natte brandstof alleen al vanwege de extra hoeveelheid vocht invloed heeft op agglomeratie, teer, conversie en depositie. In alle gevallen heeft extra water een gunstig effect. Hoewel het totale rendement van de vergasser zal afnemen, kan met name bij het gebruik van grote brandstof (met relatief grote problemen, zie boven) het beperkt toevoegen van een natte brandstof aantrekkelijk zijn. Dat is met name het geval bij toepassingen waarbij het hete gas direct wordt bijgestookt in een grote centrale. Hierbij kunnen genoemd worden de bestaande CFB-vergassers van Foster Wheeler in Lahti (Finland) en Ruien (België) waarbij natte brandstoffen worden vergast.

Conclusie

Eén van de belangrijke voordelen van een CFB-vergasser is de hoge mate van flexibiliteit wat betreft brandstof. Dat geldt zowel voor de soort als de grootte van de brandstof. De flexibiliteit wat betreft de brandstofgrootte blijkt echter in de praktijk beperkt te zijn. Gebleken is dat de grote deeltjes niet alleen leiden tot een lagere conversie (en dus een lager rendement), maar ook een negatieve invloed hebben op agglomeratie. Zowel wat betreft conversie als agglomeratie lijkt het gunstig te kiezen voor een kleine brandstof. Bovendien is aangetoond dat met kleine brandstof de teerconcentratie en het teerdauwpunt significant kunnen worden verlaagd door de toevoeging van kippenmest terwijl bij grote brandstof dit geen effect heeft. Een kleine brandstof kan dus ook depositieproblemen reduceren.

Wat betreft depositie lijkt zoals verwacht de teer een belangrijke rol te spelen. Met de gebruikte zogenaamde depositie-probes is feitelijk (voor het eerst) bij benadering een teerdauwpunt gemeten. Het blijkt met circa 350°C echter ruim boven het (uit teermetingen) berekende teerdauwpunt van circa 200°C te liggen. Dit komt enerzijds door een beperking van de teermeetmethode waardoor de grote teren niet worden gemeten, maar anderzijds kan ook adsorptie van teer een rol spelen.

8. REFERENTIES

1. A. van der Drift: *CFB-vergassers voor biomassa. Een overzicht van bestaande installaties*, ECN-rapport: ECN-CX--01-010, 57 p. (2001).
2. A. van der Drift, H. F. de Kant and J. B. Rajani: *Commercialisation BIVKIN-based gasification technology, non-confidential version*, ECN-rapport: ECN-C-00-080, 56 p. (2000).
3. H. P. A. Calis, H. Haan, H. Boerrigter, A. van der Drift, G. Peppink, R. van den Broek, A. Faaij and R. H. Venderbosch: *Preliminary techno-economic analysis of large-scale synthesis gas manufacturing from imported biomass*. In: *Pyrolysis and Gasification of Biomass and Waste*, Expert Meeting, 30 September - 1 October 2002, Strasbourg, France, pp. 403-418.
4. W. Willeboer: *Inbetriebnahmeerfahrungen der 80 MWth Lurgi Vergasungsanlage im Amer Kraftwerk, Niederlande*. In: *Grüne Investitionen in die Biomasse-Vergasung*, 27. und 28. September 2001, Oberhausen (Germany).
5. J. de Jong and W. Willeboer: *Big wood gasification plant put in operation*. In: *Proc. 1th World Conference on Biomass for Energy and Industry, Sevilla (Spain) 5-9 June 2000, Vol I* (Eds. S. Kyritsis et al.), pp. 921-922, James & James, London (UK).
6. J. R. Pels, A. van der Drift, H. Horlings and J. H. A. Kiel: *Mechanism for formation of carbon-rich deposition on cooler pipes in biomass gasifiers*, Presented at "The 2nd World Conference and Technology Exhibition on Biomass for Energy, Industry and Climate Protection" in Rome, Italy, 10-14 May 2004.
7. A. van der Drift and J. R. Pels: *Product gas cooling; cooling and ash removal of product gas from biomass gasification*, ECN, Petten, The Netherlands, ECN-report: ECN-C-04-077 (in preparation) (2004).
8. P. C. A. Bergman, S. V. B. van Paasen and H. Boerrigter: *The novel "OLGA" technology for complete tar removal from biomass producer gas*. In: *Pyrolysis and Gasification of Biomass and Waste*, 30 Sept.-1 Oct. 2002, Strasbourg, France, France.
9. L. P. L. M. Rabou and S. V. B. van Paasen: *Ammonia recycling and destruction in a CFB gasifier*. In: Presented at "The 2nd World Conference and Technology Exhibition on Biomass for Energy, Industry and Climate Protection" in Rome, Italy, 10-14 May 2004.
10. S. V. B. van Paasen and R. Bär: *Tar removal with a wet ESP: parametric study*. In: Presented at "The 2nd World Conference and Technology Exhibition on Biomass for Energy, Industry and Climate Protection" in Rome, Italy, 10-14 May 2004.
11. H. Boerrigter, A. van der Drift, C. M. van der Meijden, S. V. B. van Paasen, J. R. Pels, L. P. L. M. Rabou and F. Verhoeff: *Integrated biomass gasification and gas cleaning facility: ECN pilot-plant for biomass research*. In: Presented at "The 2nd World Conference and Technology Exhibition on Biomass for Energy, Industry and Climate Protection" in Rome, Italy, 10-14 May 2004.
12. A. van der Drift and A. Olsen: *Conversion of biomass, prediction and solution methods for ash agglomeration and related problems*, ECN-C--99-090, (1999).
13. R. Korbee, J. R. van Ommen, J. Lensselink, J. Nijenhuis, H. A. Kiel and C. M. van den Bleek: *Early agglomeration recognition system (EARS)*. In: *Proceeding of 17th International Fluidized Bed Combustion Conference (FBC 2003)*, 18-21 May 2003, Jacksonville (FL), USA.
14. A. Oudhuis, A. Bos, J. P. Ouweltjes, G. Rietveld and A. B. van der Giesen: *High efficiency electricity and products from biomass and waste; experimental results of proof of principle of staged gasification and fuel cells*. In: Presented at "The 2nd World Conference and Technology Exhibition on Biomass for Energy, Industry and Climate Protection" in Rome, Italy, 10-14 May 2004.

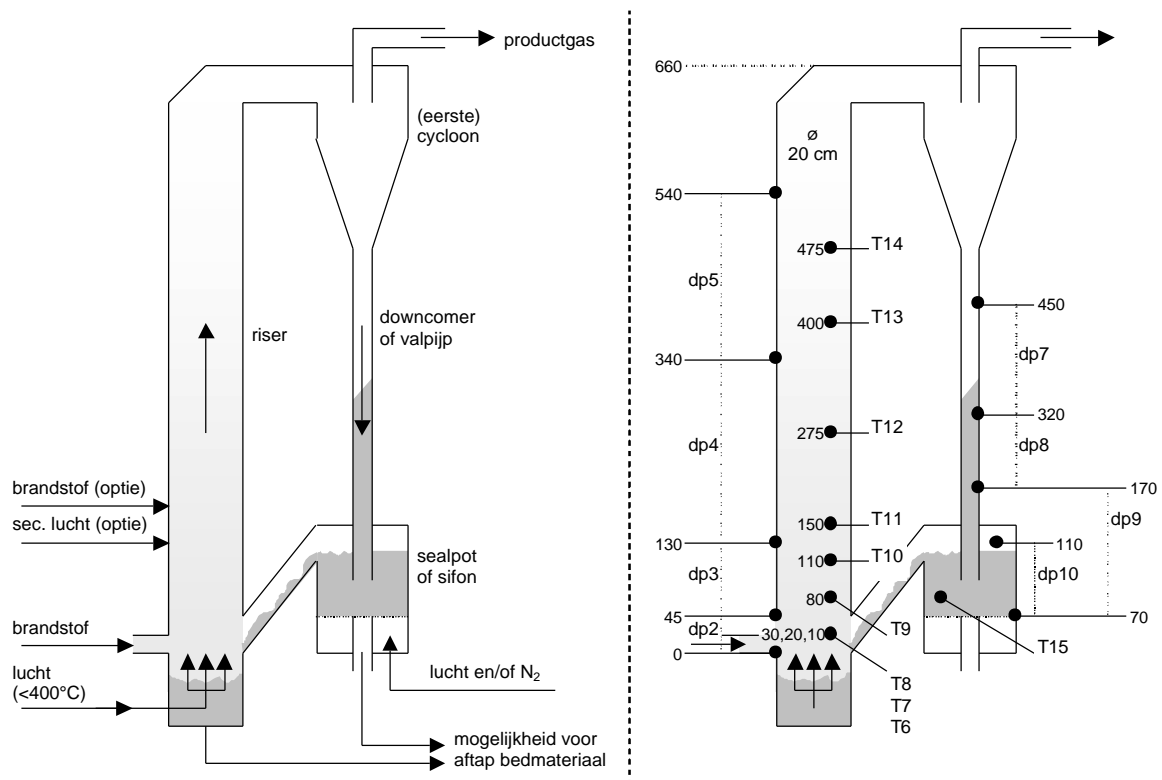
15. H. Boerrigter, D. Slort, H. Bodenstaff and H. P. A. Calis: *Gas cleaning for integrated Biomass Gasification (BG) and Fischer-Tropsch (FT) systems; experimental demonstration of two BG-FT systems*. In: Presented at “The 2nd World Conference and Technology Exhibition on Biomass for Energy, Industry and Climate Protection” in Rome, Italy, 10-14 May 2004.
16. H. Mozaffarian, R. W. R. Zwart, H. Boerrigter and E. P. Deurwaarder: *Biomass and waste related SNG production technologies*. In: Presented at “The 2nd World Conference and Technology Exhibition on Biomass for Energy, Industry and Climate Protection” in Rome, Italy, 10-14 May 2004.
17. H. J. M. Visser: *The influence of fuel composition on agglomeration behaviour in FBC; IBABI*, ECN-rapport: ECN-C-03-035 (2004).
18. A. van der Drift: *Biomassa-conversie-eigenschappen bij vergassing*, Petten, ECN, ECN-CX--00-062, 98 p. (2000).
19. *Biomass and waste composition database on the internet: www.ecn.nl/phyllis*, Energy Research Centre of the Netherlands (ECN) (2002).
20. L. H. Sorensen, J. Fjellerup and U. Henriksen: *Phosphor addition in gasification*. PCT Int. Appl., 12 pp. CODEN: PIXXD2 Patent WO 01/05913 A1 (filed 16 July 1999, issued 25 Jan 2001).
21. H. Boerrigter, H. Ratering, L. Sun, D. Guo, F. Verhoeff, C. M. van der Meijden, H. Klein Teeselink, M. Su and J. C. Jansen: *Renewable energy in the paper industry in the Chinese Shandong Province; replacing coal by co-firing of wheat straw reject (WSR) in existing boilers; Phase1: Technical and economical feasibility study*, ECN-rapport: ECN-CX-04-002 (2004).
22. J. P. A. Neeft: *Teren uit thermische conversie van biomassa en reststromen. Definities, vorming, eigenschappen, en bemonstering en analyse*, Petten, ECN, ECN-C--99-102, 58 p. (2000).
23. S. V. B. van Paasen and J. H. A. Kiel: *Tar formation in a fluidized-bed gasifier.*, ECN-rapport: ECN-C-04-013, 50 p. (2004).
24. J. W. Vermeulen and A. van der Drift: *Brandstoffen uit reststromen voor circulerend wervelbedvergassing, rapportage fase 2*, Haarlem, NV Afvalzorg, 63 p. (1998).
25. A. van der Drift, S. V. B. van Paasen, C. M. van der Meijden, H. Klein Teeselink and J. H. O. Hazewinkel: *The TREC-module to reduce tar concentration*, ECN-rapport: ECN-CX-03-053 (2003).
26. Z. Abu El-Rub, E. A. Bramer and G. Brem: *Tar removal in an entrained flow cracker (EFC) with application to biomass gasification*. In: Pyrolysis and gasification of biomass and waste, 30 September - 1 October 2002, Strasbourg, France, pp. 337-346.
27. A. van der Drift, C. M. van der Meijden and S. D. Strating: *Hogere koolstofconversie in CFB-biomassavergasers*, ECN-rapport: ECN-C-03-053, 44 p. (2002).
28. L. P. L. M. Rabou and A. van der Drift: *Optimalisatie gasreiniging (confidential)*, ECN-rapport: ECN-CX-02-113, 52 p. (2002).
29. S. R. A. Kersten: *Biomass gasification in circulating fluidized beds, Thesis, Twente University, the Netherlands*. Thesis, 227 p. (2002).
30. P. C. A. Bergman, A. R. Boersma, J. H. A. Kiel, R. W. A. Wilberink, Bodenstaff.H. and P. G. T. Heere: *Final report in preparation, Torrefaction for entrained flow gasification of biomass (Torrefactie ten behoeve van entrained-flow vergassing van biomassa), carried out in 2003 by ECN and TU/e with financial support of SDE*, ECN-rapport: ECN-C-04-026 (2003).
31. A. van der Drift, J. van Doorn and J. W. Vermeulen: *Ten residual biomass fuels for circulating fluidized-bed gasification*. Biomass Bioenergy **20** (1) 45-56 (2001).
32. A. van der Drift and 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*. In: First World Conference and Exhibition on Biomass for Energy and Industry, 5-9 June 2000, Sevilla, Spain, pp. 575-577.

33. A. van der Drift and J. van Doorn: *Effect of fuel size and process temperature on fuel gas quality from CFB gasification of biomass*. In: Progress in Thermochemical Biomass Conversion, 17-22 September 2000, Tyrol, Austria, Vol 1, pp. 265-271.
34. A. van der Drift, C. M. van der Meijden and S. D. Strating-Ytsma: *Ways to increase the carbon conversion of a CFB-gasifier*. In: 12th European Conference on Biomass for Energy, 17-21 June 2002, Amsterdam, the Netherlands, pp. 604-606.
35. H. J. M. Visser, S. van Lith and J. H. A. Kiel: *Agglomeration due to biomass ash-bed material interactions in fluidised bed reactors*. In: 12th European Conference on Biomass for Energy, 17-21 June 2002, Amsterdam, the Netherlands, pp. 585-588.
36. K. Smolders and J. Baeyens: *Operating parameters for the circulating fluidized bed (CFB) processing of biomass*. Pyrolysis and Gasification of Biomass and Waste Proceedings of an Expert Meeting (2003) 631-640.

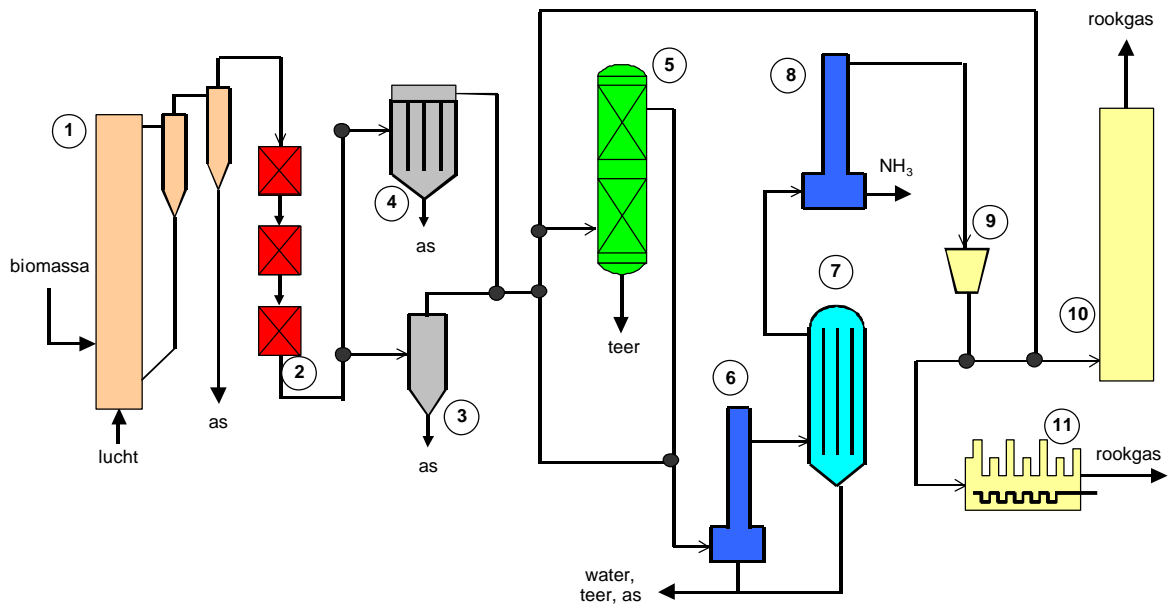
BIJLAGE A PILOT-SCHAAL CFB-VERGASSER (BIVKIN)

Hieronder in Figuur A1 wordt schematisch de CFB-vergasser getoond van ECN (genaamd BIVKIN) met enkele belangrijke grootheden en meetpunten. Standaard wordt de vergasser bedreven met 100 kg/uur gedroogde brandstof ofwel circa 500 kW_{th}. De CFB-vergasser is goed geïsoleerd, het stationaire warmteverlies is circa 30 kW. Het standaard bedmateriaal is silica zand met een diameter van 550 μm (mediaan). De brandstof dient niet groter te zijn dan circa 4 cm. Diverse voedingssystemen zijn beschikbaar voor een breed scala aan brandstoffen. Enkele experimentele resultaten zijn gerapporteerd in [31-34].

Het productgas uit de CFB kan worden gereinigd op meerdere manieren. Figuur A2 toont de huidige opties (status medio 2004).



Figuur A1 De CFB-vergasser van ECN (niet op schaal getekend) inclusief de meetpunten voor temperatuur (T) en druk (dp); hoogtematen in centimeter



Figuur A2 *Het pilot-schaal testpark bij ECN medio 2004, 1: 500 kW_{th} CFB-vergasser, 2: drie-staps gaskoeler tot 300-350°C, 3: cycloon, 4: sintermetaal gasfilter, 5: OLGA teerverwijdering, 6: quenchoeler/water-scrubber, 7: nat elektrostatisch filter ESP, 8: stripper, 9: booster, 10: low-NO_x naverbrander, 11: gasmotor (optie)*

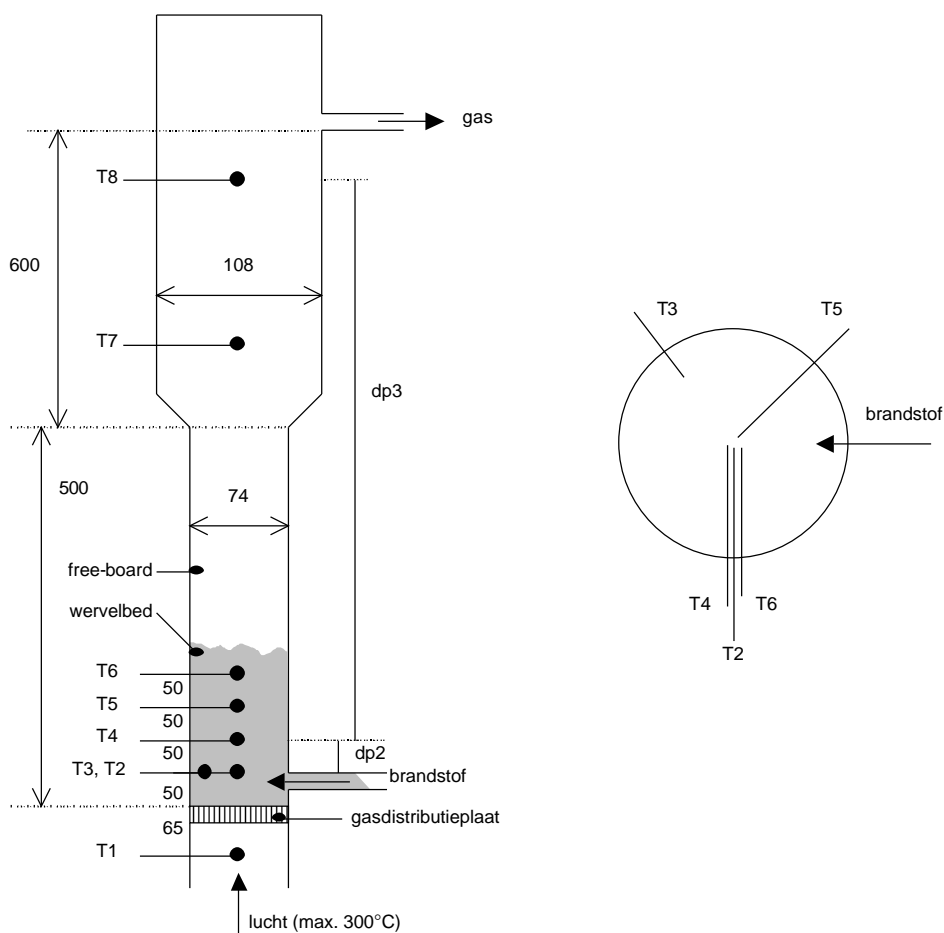
BIJLAGE B LAB-SCHAAL BFB WERVELBEDVERGASSER (WOB)

In Figuur B1 wordt schematisch de 5 kW_{th} lab-schaal Wervelbed-Opstelling Biomassa (WOB) getoond met de maten en plaats van de diverse meetpunten. De hele installatie is uitgevoerd in staal en elektrisch verhit ter compensatie van warmteverliezen. Het gas wordt direct na de vergasser door een cycloon geleid en bemonsterd voor de analyse van gassen, deeltjes, teer etc.

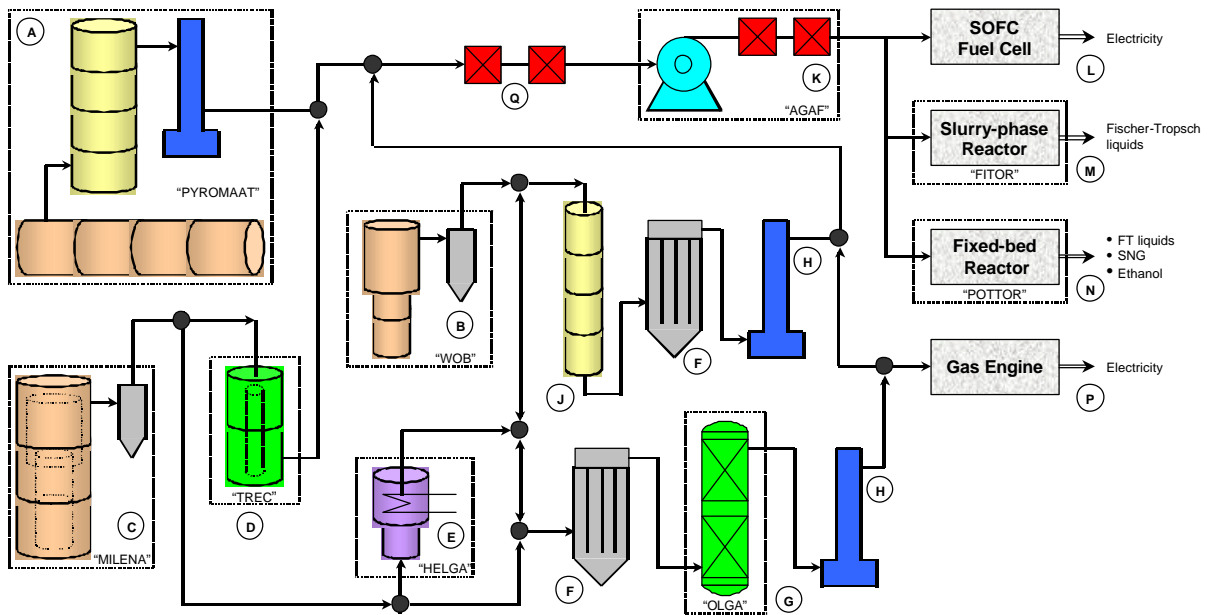
In Figuur B2 is gegeven het lab-schaal testpark bij ECN waarin de WOB een van de vergassers is. Het toont de status medio 2004.

Standaard vergassingscondities

De WOB wordt normaliter bedreven met 1 kg silica zand als bedmateriaal, met een grootte van 300 µm (mediaan). De voedingsbunker wordt standaard continu gespoeld met 1 liter/minuut (bij normaal-condities: 1 atm, 273 K) en de brandstof is vooraf gezeefd op een fractie tussen 0.7 en 2 mm. De WOB wordt bedreven met lucht. De temperatuur van de stalen wand wordt in het algemeen ingesteld op een temperatuur die minder dan 2° afwijkt van de bedtemperatuur. In dat geval wordt adiabatisch (autotherm) vergassingsbedrijf gesimuleerd.



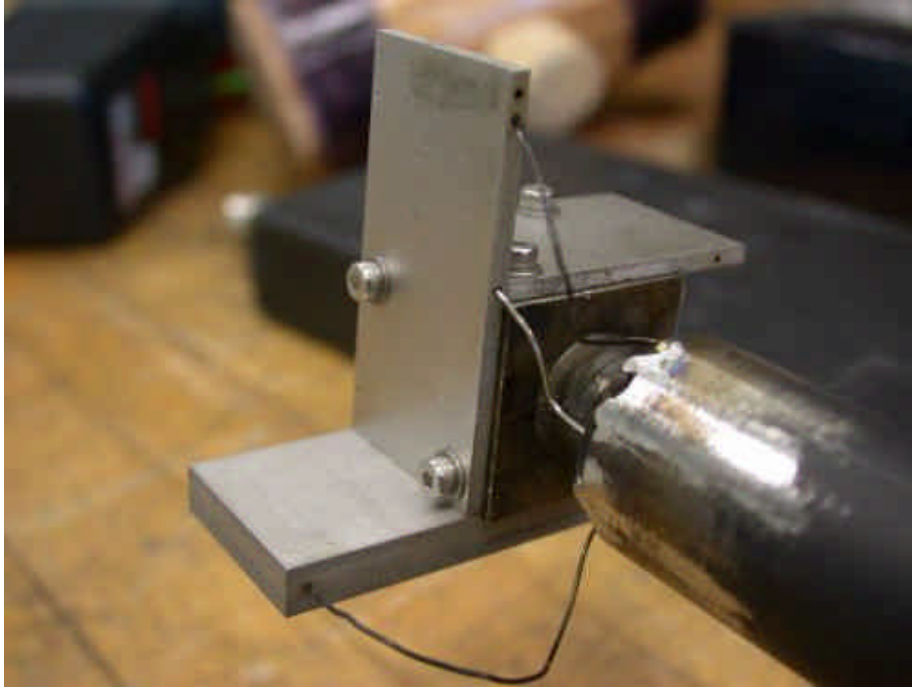
Figuur B1 Schematische weergave (niet op schaal) van de wervelbedopstelling “WOB” bij ECN inclusief de meetpunten voor temperatuur (T) en druk (dp), maten in millimeter



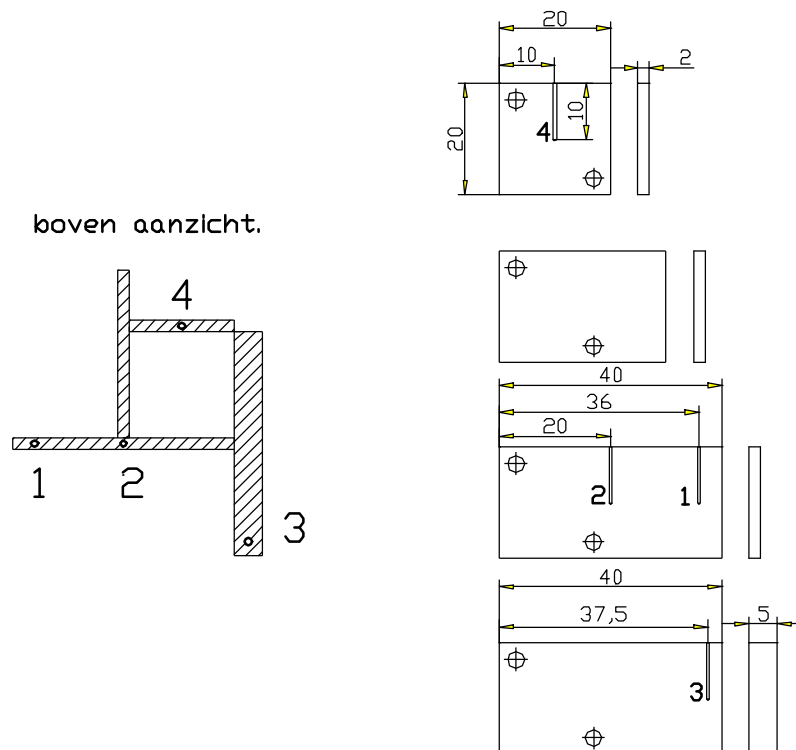
Figuur B2 *Het lab-schaal testpark bij ECN, A: 20 kW_{th} schroefreactor, B: 5 kW_{th} wolverbedvergasser (WOB), C: 20 kW_{th} wolverbed/indirecte vergasser (MILENA), D: teer-reductie module TREC, E: gaskoeler HELGA, F: heet-gasfilter, G: oliewater OLGA, H: waterscrubber, K: compressor tot 60 bar met quard bedden, Q: droge gasreiniging, L, M, N en P: diverse opties om het gas te gebruiken*

Koelprobe

Voor het onderzoek naar vervuiling van warmtewisselaars, is gebruik gemaakt van een zogenaamde depositieprobe in de WOB, zie Figuur B3. Deze wordt van bovenaf in de vergasser gestoken en kan op verschillende hoogtes worden gehangen. Bij het in dit rapport beschreven onderzoek hing de onderzijde van de koelprobe op circa 25 cm boven het wolverbed (in geëxpandeerde toestand). Figuur B4 toont de maten en temperatuurmeetpunten van de koelprobe.



Figuur B3 *De koelprobe (schoon) voor het onderzoek aan vervuiling in de lab-schaal vergasser “WOB”; de probe wordt van bovenaf verticaal naar beneden in de WOB vergasser gestoken*



Figuur B4 *De maten van de koelprobe voor onderzoek aan vervuiling in de lab-schaal vergasser “WOB” met de positie van de thermokoppels*

BIJLAGE C BRANDSTOFFEN

Tabel C1 *De samenstelling van de gebruikte brandstoffen met HHV: bovenste verbrandingswarmte, LHV: onderste verbrandingswarmte; daf: droog en asvrije basis, dr: droge basis, nat: natte basis*

brandstof		beuk	eco-gras	sloop hout	sloop hout	schoon hout	leghennen mest	rwzi-slib	houtstof	stro afval
bron en vorm		Rettenmaier; chips	Hartog; pellets	Afvalzorg; chips	Labee; pellets (bruin)	Labee; pellets (wit)	Atsma; los	uitwaterende sluizen; granulaat	Afvalzorg; stof	China; pellets
afmeting (l: lengte)	mm	0.7-2	ϕ=6.4 l=10-20	0.7-2	ϕ12 l=6-20	ϕ6 l=5-20	< ca. 3	ϕ=ca. 3	<1	ϕ5 l=10-20
dichtheid	kg/m ³	ca. 700	1250	ca. 500	1200	1200				1150
water	wt% nat	9.9	11	21	8.7	8.3	36	7.2	23	9.7
as	wt% dr	1.0	12	4.3	1.9	0.3	20	34	25	23
volatiles	wt% daf	84	81	79	80	82	84	81	78	61
HHV	kJ/kg daf	19748	21134	20078	20144	19929	17694	24871	20722	20199
LHV	kJ/kg nat	17491	16350	15153	17915	18082	9045	15065	11940	13986
C	wt% daf	49.2	50.2	51.5	50.1	48.4	44.5	53.0	52.2	47.7
H	wt% daf	6.1	6.4	6.2	6.0	6.4	6.8	7.4	5.7	6.2
O	wt% daf	44.2	40.5	40.7	42.6	45.3	43.3	41.1	40.7	42.9
N	wt% daf	0.19	2.8	1.5	0.68	0.13	5.5	7.7	1.1	1.3
S	wt% daf	0.02	0.39	0.11	0.07	0.01	0.36	2.0	0.2	0.27
Cl	wt% daf	0.004	0.71	0.09	0.07	0.01	0.41	0.16	0.12	1.2
Al	mg/kg dr	48	1100	460	380	65	790	17000	3400	
As	mg/kg dr	0.9	1.5	8.9	3.9		0.4	6.8	18	0.9
Ca	mg/kg dr	2900	7500	4100	2600	1300	70000	27000	13000	6700
Cd	mg/kg dr	0.09	0.08	1.3	0.4	0.2	0.23	1.0	2.1	0.1
Co	mg/kg dr	12	0.3	2.2	1.1	0.1	1.0	4.8	14	1
Cr	mg/kg dr	1.5	3.6	35	20	4.7	18	39	110	8.1
Cu	mg/kg dr	1.6	6.3	21	17	4.9	55	350	170	4.8
Fe	mg/kg dr	37	710	510	500	83	1200	33000	7100	2000
Hg	mg/kg dr	0.01			0.04		0.01			
K	mg/kg dr	1200	24000	740	930	380	22000	4400	1800	23000
Mg	mg/kg dr	370	1600	450	390	140	6300	5000	1300	2500
Mn	mg/kg dr	54	42	77	65	120	330	450	170	
Mo	mg/kg dr	0.8	2.3	0.6	3.7	0.4	3.8	12	1.8	0.9
Na	mg/kg dr	11	1800	670	520	70	3300	1600	1200	1800
Ni	mg/kg dr	2.5	8.5	4.6	7.1	34	14	22	28	3.5
P	mg/kg dr	89	3200	100	440	85	16000	30000	270	840
Pb	mg/kg dr	3.1	1.8	320	120		4.6	120	1700	2.2
Sb	mg/kg dr	13	0.2	2.5	1.4	0.8	0.4	3.4	2.4	0.3
Se	mg/kg dr	1.4	1.1	0.3	0.3		1.2	5.0	0.4	
Si	mg/kg dr	170	9000	2600	1900	210	5100	31000	8100	20000
Sn	mg/kg dr	0.4	0.2	0.9	0.8	0.9	0.5	20	3.2	
Sr	mg/kg dr	4.8	25	18	14	4.5	51	270	59	
Zn	mg/kg dr	3.2	25	350	150	15	300	830	1300	15

BIJLAGE D MECHANISMEN VAN AGGLOMERATIE

Agglomeratie in een wervelbed is het verschijnsel dat bedmateriaal aan elkaar plakt tot agglomeraten. Dit leidt tot een verstoring van de fluïdisatie of defluïdisatie. Agglomeratie wordt ook wel sintering genoemd. Er zijn twee extreme vormen van agglomeratie beschreven [35]: type I en type II.

Type I agglomeratie: coating-agglomeratie

In het zgn. type-I mechanisme condenseren ascomponenten vanuit de gasfase op het bedmateriaal. Daarbij wordt een coating gevormd. De coating kan leiden tot het aan elkaar plakken van deeltjes, ofwel agglomeratie. Twee krachten spelen hierbij een rol: (1) de plakkracht, die een functie is van o.a. de viscositeit van de coating, en (2) de kracht die in staat is deeltjes los te krijgen en in zekere mate wordt bepaald door het fluïdisatieregime²⁰. Type I agglomeratie is een proces dat tijd kost omdat de coating moet worden opgebouwd. Type I agglomeratie is niet plaatselijk, maar treedt meestal op in het gehele bed. De problemen van defluïdisatie treden daarom al op bij relatief geringe bindingskracht tussen de bedmateriaaldeeltjes. Na afloop blijkt vaak nagenoeg de gehele bedinhoud aan elkaar geplakt te zijn als een zandkasteel. Bij geringe mechanische kracht valt het uiteen.

Bij type I agglomeratie is de aanwezigheid van vluchtige componenten van groot belang. Dat geldt voornamelijk voor componenten die een reactie kunnen aangaan met het bedmateriaal en laag-smeltende eutectische mengsels kunnen vormen. Belangrijke elementen zijn kalium, chloor en silicium.

Type I agglomeratie kan worden tegengegaan door frequent het bedmateriaal te verversen opdat de coating niet kan worden opgebouwd. Dit is een doeltreffend middel, maar afhankelijk van de vereiste frequentie kan het hoge kosten met zich meebrengen. Een ander middel ter vertraging van agglomeratie is het toevoegen van kleine inerte deeltjes zoals MgO, dolomiet, of as-rijke brandstoffen zoals papierslib en rioolslib. Dit werkt vertragend op agglomeratie omdat het een relatief groot oppervlak aanbiedt aan de condenserende as-componenten én het eenvoudig wordt weggeblazen uit de reactor en daarmee dus de voor agglomeratie schadelijke bestanddelen afvoert uit het systeem.

Type II agglomeratie: smelt-agglomeratie

Type-II is een vorm van agglomeratie waarbij vooraf geen coating wordt opgebouwd. Bij dit type spelen rondzwerfende gesmolten asdeeltjes de hoofdrol. Deze plakken de bedmateriaaldeeltjes aan elkaar. De “lijm” heeft een samenstelling die sterk lijkt op de chemische samenstelling van de as. De samenstelling van de as is derhalve van groot belang. K en Si spelen een belangrijke rol. Het soort bedmateriaal is van gering belang. Type II agglomeratie is veelal plaatselijk. Hierdoor zal het probleem zich kunnen vergroten zonder dat dit voor het proces direct hinder levert. Type II agglomeratie is daarom veelal herkenbaar aan gesmolten structuren van goed aan elkaar gesinterde/geplakte deeltjes. In tegenstelling tot type I agglomeratie hoeft geen coating te worden opgebouwd en kan type II agglomeratie snel optreden.

²⁰ Het fluïdisatieregime wordt gekenmerkt door de snelheid en de massa van de deeltjes. Een belangrijke parameter hierbij is de ratio tussen gassnelheid en minimale fluïdisatiesnelheid u_{mf} . Een grotere ratio stelt agglomeratie uit. De minimale fluïdisatiesnelheid u_{mf} is de snelheid van het gas dat door een bed van deeltjes wordt geleid die minimaal nodig is om het bed in beweging te krijgen.

Type II agglomeratie is meestal het gevolg van een ander probleem zoals een storing in de brandstof toevoer, een verstoorde fluïdisatie door bijvoorbeeld de aanwezigheid van grote delen of zelfs type I agglomeratie.

Circulerend wervelbed (CFB)

In een CFB-reactor is vanwege de hoge snelheden type-I agglomeratie minder realistisch omdat de sterke botsingen de groei van de coating belemmeren (slijtage) en/of de coating onvoldoende in staat is de deeltjes te laten plakken omdat de botsingen veel heftiger zijn dan in bijvoorbeeld een BFB. Type II agglomeratie lijkt een groter probleem dan type I in een CFB.

Bij kleine brandstoffen zullen veel asdeeltjes, die in het algemeen klein zijn, relatief gemakkelijk worden weggeblazen uit een CFB-systeem. Dit betekent dat type II agglomeratie niet waarschijnlijk is bij het gebruik van kleine brandstofdeeltjes. Bij het gebruik van grotere brandstofdeeltjes, zal veel van de as in de reactor voorkomen in combinatie met (nog niet omgezette) char. De char/as is relatief groot en zal dus relatief lang in het systeem blijven. Hoewel in principe de char matrix de eventueel smeltende as afschermt en feitelijk onschadelijk maakt, kan de char ook juist een negatief effect veroorzaken. De char kan vanwege lokale verbrandingsreacties heter zijn dan zijn omgeving waardoor de as eerder smelt dan in een char-vrije omgeving. Daarnaast kan de aanwezigheid van de meestal grote en lichte char in een verstoorde fluïdisatie en/of circulatie resulteren waardoor lokaal hoge temperaturen kunnen worden bereikt.

Bubbling wervelbed (BFB)

In een bubbling wervelbed is type I agglomeratie het waarschijnlijkst. De reden hiervoor is enerzijds dat de fluïdisatie relatief mild is en dus een coating relatief makkelijk leidt tot het aan elkaar plakken van deeltjes en anderzijds dat een in BFB een zeer uniforme temperatuurverdeling heerst en storingen op de fluïdisatie minder makkelijk optreden dan in bijvoorbeeld een CFB. Dit laatste heeft als oorzaak dat een BFB geen circulatiesysteem kent en bovendien relatief veel bedmateriaal bevat wat eventuele storingen van bijvoorbeeld brandstof toevoer dempt.