



Rijksdienst voor Ondernemend
Nederland

Vergassen laagwaardige brandstoffen

Openbaar eindrapport

TEBE213002

Topsector Energie

1 Inhoudsopgave

1	Inhoudsopgave	2
2	Lijst van figuren	3
3	Lijst van tabellen.....	3
4	Gegevens project	4
5	Inhoudelijk eindrapport.....	5
5.1	Samenvatting.....	5
5.2	Inleiding	6
5.3	Doelstelling	6
5.4	Werkwijze	6
5.5	Resultaten.....	7
5.5.1	WP 1 Brandstofselectie (WP leiders RWE Essent en HoST)	7
5.5.2	WP 2 Vergassingstesten	10
5.5.3	WP 3 Koelen + stofverwijdering	22
5.5.4	WP 4 Ketelconfiguratie	25
5.5.5	WP 5 Economische evaluatie.....	33
5.5.6	WP 6 Projectleiding en kennisdisseminatie.....	39
5.6	Discussie & conclusies	39
6	Uitvoering van het project	42
6.1	De problemen (technisch en organisatorisch) die zich tijdens het project hebben voorgedaan en de wijze waarop deze problemen zijn opgelost;	42
6.2	Toelichting op wijzigingen ten opzichte van het projectplan;	42
6.3	Toelichting op de verschillen tussen de begroting en de werkelijk gemaakte kosten.....	42
6.4	Toelichting wijze van kennisverspreiding	42
7	Appendix	43
7.1	Appendix A Parameter tabel.....	43
7.2	Appendix B PFD vuil gas.....	44
7.3	Appendix C PFD vuil gas.....	45
7.4	Appendix D PFD MILENA	46
7.5	Appendix E Prestatietabel vuil gas	47
7.6	Appendix F Prestatietabel schoon gas	48
7.7	Appendix G Massa- en energiebalansen	49
7.8	Appendix H In- en output tabellen	50

2 Lijst van figuren

Figuur 1. Schema voor thermische conversie van laagwaardige brandstof naar energie.	6
Figuur 2. Voorbewerking van paper rejects voor lab testen.	11
Figuur 3. ICP analyse van de geselecteerde brandstoffen: (a) onvermengde brandstoffen; (b) paper rejects zonder- en met additieven.	12
Figuur 4. Schematische weergave van de 5 kW _{th} wervelbed vergasser opstelling bij ECN.	12
Figuur 5. Schematische weergave van de 25 kW _{th} MILENA indirect vergasser bij ECN.	13
Figuur 6. Effect van verontreinigingen (glas en aluminium) in het bedmateriaal: (a) Aanvankelijke deeltjes; (b) Deeltjes na vergassing op 900°C; (c) Deeltjes na vergassing op 750°C.	14
Figuur 7. Effect van temperatuur en brandstof op de NH ₃ , HCl en H ₂ S concentraties (droge basis) van het stookgas.	15
Figuur 8. Effect van temperatuur en brandstof op de samenstelling van cycloonas (a) en filteras (b).	15
Figuur 9. SEM/EDX analyse van afzettingen uit paper rejects vergassing: 750°C (links), 850°C (rechts).	16
Figuur 10. Effect van additieven op NH ₃ , HCl en H ₂ S concentraties (droge basis) van stookgas.	17
Figuur 11. Effect van additieven op de samenstelling van cycloonas (a) en filteras (b).	17
Figuur 12. SEM/EDX analyse van afzettingen uit paper rejects vergassing + 5 gew.% halloysiet op 850°C.	18
Figuur 13. Effect van additieven op de samenstelling van afzettingen.	18
Figuur 14. Samenstelling van stookgas en rookgas uit MILENA lage temperatuur vergassing van paper rejects.	19
Figuur 15. Samenstelling van vlieggas in stookgas en rookgas uit MILENA lage temperatuur vergassing van paper rejects.	19
Figuur 16. Overzicht van het vergassingsproces.	20
Figuur 17. Brandstofmix aanvoer en verbruik.	21
Figuur 18. Schets van de ketel voor verontreinigd gas.	27
Figuur 19. Schets van de ketel voor schoon stookgas.	29
Figuur 20. Schets convectiekoeler.	31
Figuur 21. Schets stralingskoeler.	32
Figuur 22. Stortkosten van de verschillende vliegassen van de cases 1 t/m 7.	35
Figuur 23. Operationele kosten van de cases 1 t/m 7.	35
Figuur 24. Elektriciteitsopbrengsten bij 25 of 50 MW _{th} van de cases 1 t/m 7.	36
Figuur 25. Opbrengsten warmte bij 25 of 50 MW _{th} van cases 1 t/m 7.	37
Figuur 26. Overzicht netto opbrengsten, investeringsbedrag en terugverdientijd voor 50MW _{th}	37

3 Lijst van tabellen

Tabel 1. Overzicht mogelijke laagwaardige brandstoffen.	10
Tabel 2. Samenstelling van geselecteerde brandstoffen.	11
Tabel 3. Uit te werken concepten voor MBM, paper rejects en RDF en stof afvangsopties en koelers.	24
Tabel 4. Gekozen concepten voor uitwerking in WP 5.	25
Tabel 5. Stookgas eigenschappen.	30
Tabel 6. Warme zijde: gas.	30
Tabel 7. Koude zijde: stoom.	30
Tabel 8. Prijzen voor de verschillen onderdelen in k€ op turn-key basis.	33
Tabel 9. Uitgangspunten voor de economische evaluatie gebaseerd op een vergassingsinstallatie in Nederland.	Error! Bookmark not defined.
Tabel 10. Afvoerkosten voor verschillende typen as.	33
Tabel 11. Investeringsramingen voor de verschillende concepten.	Error! Bookmark not defined.
Tabel 12. As en C-gehalte van MBM, paper rejects en RDF.	34
Tabel 13. Elektriciteitsproductie bij verschillende warmtevragen.	36
Tabel 14. Economische haalbaarheid van elektriciteitsproductie en 25 MW _{th} warmtelevering van cases 1 t/m 7.	Error! Bookmark not defined.
Tabel 15. Economische haalbaarheid van elektriciteitsproductie en 50 MW _{th} warmtelevering van cases 1 t/m 7.	Error! Bookmark not defined.
Tabel 16. Eenvoudige terugverdientijd bij toepassing van verschillende typen koelers.	38
Tabel 17. Subsidie SDE+ bij MBM.	39

4 Gegevens project

- TEBE213002
- Vergassen laagwaardige brandstoffen
- Penvoerder: Stichting Energieonderzoek Centrum Nederland (A.J. Grootjes)
- Medeaanvragers: RWE Essent, HoSt Fluidised bed Technology, NEM Energy B.V.
- 1 januari 2014 tot 31 juli 2015

Contactgegevens penvoerder:

Naam: A.J. (Sander) Grootjes

Emailadres: grootjes@ecn.nl

Telefoonnummer: +31 88 515 49 83

Het project is uitgevoerd met subsidie van het Ministerie van Economische Zaken, voor de Topsector Energie uitgevoerd door Rijksdienst voor Ondernemend Nederland.

5 Inhoudelijk eindrapport

5.1 Samenvatting

Hernieuwbare warmte en elektriciteit via thermische conversie zoals vergassing kan een grote bijdrage leveren aan de verduurzaming van de energievoorziening. Vergassingsinstallaties zijn meestal ontworpen voor een specifieke brandstof. Het bijmengen van laagwaardige brandstoffen wordt vaak gezien als een risico vanwege de onbekende interacties van de mengsels. Het vergassen van een brandstof en het verbranden van het productgas in een ketel is een methode om lastige brandstoffen om te zetten in warmte en/of elektriciteit, omdat de brandstof niet gemalen hoeft te worden en vanwege de goede temperatuurcontrole in de vergasser. Tevens bestaat de mogelijkheid om in de vergasser maatregelen toe te passen voor bijvoorbeeld de afvangst van zwavel.

Voor dit project staan de volgende vragen centraal: het is onduidelijk hoe de parameters (chloorgehalte, temperatuur, stofgehalte, deeltjesgrootte, gehalte glas, aluminium, zware metalen) in het vergasser/ketel-systeem op elkaar kunnen inspelen en hoe dit technisch en economisch in een installatie kan worden vertaald. De focus van het onderzoek ligt op verdeling van stof, chloor, zwavel en zouten in de vaste en gasvormige fase. Uit de brandstofselectie zijn RDF, papier rejets en diermeel (MBM) gekozen als laagwaardige brandstoffen op basis van de criteria prijs, beschikbaarheid brandstof, corrosie in vergasser, vervuiling in gaskoeler, agglomeratie in vergasser, as kwaliteit, emissies, logistiek en goedkopere verwerking.

Vergassingstemperatuur, vochtgehalte van de brandstof en additieven beïnvloeden in grote mate de verdeling van chloor en (aard)alkalimetalen over de gas- en vaste fase. Een verlaging van de vergassingstemperatuur van de gebruikelijke 850°C naar 750°C levert de volgende voordelen:

- De kwantitatieve verdeling van chloor wijzigt in minder chloor in het gas en het fijnstof en meer chloor in het cycloonas en bodemas. Minder zouten (bv CaCl_2) zijn aanwezig in de gasfase. Het voordeel daarvan is dat de vervuiling van de gaskoeler minder zal zijn.
- De depositen op de gaskoeler zijn bij 850°C harder, dichter en deels gesmolten. Bij 750°C zijn de depositen poreuzer en makkelijker te verwijderen van de gaskoeler, met lagere onderhoudskosten als positief gevolg.

Deze resultaten zijn consistent voor zowel de lab als de grote schaal (RWE Essent, 80 MW_{th}) experimenten op hout en RDF.

Het gebruik van halloysiet en koolvliegias als additief in de vergasser leidt tot het afvangen van de (aard)alkalimetalen in de vorm van aluminosilicaten. Deze aluminosilicaten hebben een hoog smeltpunt en gaan nauwelijks over in de gasfase, waardoor de vervuiling van de gaskoeler verminderd wordt. Een vergassingstemperatuur van ~750°C blijkt een goede trade-off te zijn tussen koolstofconversie, cold gas efficiency, teergehalte/samenstelling en verdeling van chloor over de vaste stof en gasfase.

Voor de selectie van cases voor de ketelconfiguraties en de economische evaluaties is geconcludeerd dat het toepassen van een cycloon geen voordeel oplevert. Voor de ketel en de daarop volgende rookgasreiniging zijn daarom twee basis ontwerpen gemaakt voor de geselecteerde brandstoffen: één voor de cases zonder keramisch filter en een voor de cases met een keramisch filter. Het keramische filter verwijdert stof, char en chloor uit het gas.

Vanwege de subsidie op groene elektriciteit en warmte zijn de cases voor “100% elektriciteit”, “elektriciteit + 25 MW_{th} warmte” en “elektriciteit + 50 MW_{th} warmte” economisch geëvalueerd. Warmtelevering van “50 MW_{th} + elektriciteitslevering” levert meer opbrengsten op dan de “25 MW_{th} + elektriciteit” casus of de “100% elektriciteit” casus. Ontstoffen van het productgas (vliegias, koolstof en chloor) voor de ketel is niet gunstig voor de terugverdientijd ten opzichte van een systeem zonder onstoffing en reguliere rookgasreiniging. De investering in een keramisch filter, het hoge stikstofdebiet voor het reinigen van het filter, de hogere storkosten door afzet van as met koolstof en het verlies in koolstofconversie wegens niet op tegen de hogere opbrengsten van de elektriciteitsproductie bij 120 bar en 540°C.

Bij het verwerken van een brandstof waarbij het aandeel biomassa groter dan 95% is, kan in Nederland SDE+ subsidie aangevraagd worden. Van de geselecteerde brandstoffen geldt dit alleen voor MBM. Doordat zowel warmte als elektriciteit geleverd worden, is het subsidie tarief gunstig. Hierdoor is de terugverdientijd 3,3 jaar bij 50 MW_{th} warmtelevering. Indien de subsidie zou wegvallen, stijgt de terugverdientijd tot 27 jaar. Het effect van deze subsidie is enorm.

5.2 Inleiding

Vergassen is een methode om lastige brandstoffen om te zetten in warmte en/of elektriciteit. De vergasser converteert de lastige (vaste) brandstof tot een minder lastige (gasvormige) brandstof. Het creëert bovendien de optie om het gas te reinigen voordat het verbrand wordt. Hierdoor kan de ketel relatief eenvoudig blijven of kan zelfs een bestaande ketel worden toegepast. Wervelbedvergassing is een handige methode, omdat de brandstof niet gemalen hoeft te worden en vanwege de goede temperatuurcontrole en de mogelijkheden om “in-bed” maatregelen toe te passen voor bijvoorbeeld de afvangst van zwavel. Vergassen in combinatie met een (bestaande) ketel wordt al toegepast voor een beperkt aantal brandstoffen. Door de technologie aan te passen/te optimaliseren voor lastigere brandstoffen kunnen de kosten omlaag en kan de markt worden vergroot.

In het kort: de vergasser/ketel combinatie levert een technische en economische oplossing voor de conversie van zeer laagwaardige brandstoffen naar elektriciteit/warmte.



Figuur 1. Schema voor thermische conversie van laagwaardige brandstof naar energie.

Elk van de vier onderdelen in het systeem (voorbewerking, vergasser, koeler/reiniging, ketel) (andere dan in het plaatje hierboven) heeft een bepaald speelveld wat betreft chloorgehalte, temperatuur, stofgehalte, deeltjesgrootte, gehalte glas, aluminium, zware metalen, etc.. Dat speelveld kan worden beïnvloed door de keuze van de vergassingscondities (temperatuur), toevoegingen aan de wervelbedvergasser (“in-bed”), gasreiniging, brander/ketel condities en uitvoering. Brandstofvoorbewerking is ook een vrijheidsgraad. Emissie-eisen zijn een randvoorwaarde.

Voor dit project staan de volgende vragen centraal: het is onduidelijk hoe de speelvelden van de onderdelen in het vergasser/ketel-systeem op elkaar kunnen aansluiten en hoe dit technisch en economisch in een haalbare installatie kan worden vertaald. De focus ligt op: stof, chloor, zwavel, glas en aluminium. Concrete vragen zijn:

1. Welke problemen kunnen optreden bij het gebruik van laagwaardige brandstoffen en hoe kunnen deze voorkomen/opgelost worden (bijvoorbeeld toeslagstoffen of aanpassing procescondities)?
2. Hoe kan bestaande technologie aangepast worden, opdat het bestaande laagwaardige brandstoffen kan accommoderen?
3. Hoe moet de brander/ketel uitgelegd worden om het beperkt gereinigde gas te kunnen verwerken rekening houdend met o.a. vervuiling en emissie-eisen.

5.3 Doelstelling

1. Vergassingstechnologie voor indirecte (bij)stook in een ketel geschikt maken voor de inzet van laagwaardige brandstoffen. Voorbeeld: als chloor een probleem is voor de ketel (verkort de levensduur, vervuult de ketel, verlaagt de maximaal haalbare stoomcondities en dus rendement naar elektriciteit), dan kunnen maatregelen in de vergasser in combinatie met de nageschakelde koeler de hoeveelheid chloor, die in het gas terecht komt verminderen of kan de ketel worden aangepast.
2. Technologische verbeteringen ontwikkelen en testen, die de technische prestatie van de geïntegreerde installatie verbeteren. Voorbeeld: vervangen van de cycloon door een hoge temperatuur stoffilter of granulair bed filter, zodat stof-/zoutbelasting van de ketel gereduceerd wordt.

5.4 Werkwijze

Het project is op de volgende stapsgewijze manier uitgevoerd:

1. Selectie van aantrekkelijke brandstoffen voor de Nederlandse situatie.

2. Vergasser: testen van drie brandstoffen en 2 additieven in een matrix van brandstof – temperatuur – bedmateriaal/toeslagstof. Full-scale (RWE Essent) en lab-scale (ECN) testen van het gedrag van typische verontreinigen t.b.v. optimalisatie van het huidige bedrijf van de Amer centrale.
3. Koelen/gasreiniging: inventariseren en evalueren van de opties voor stofafvangst in combinatie met koeling.
4. Brander/ketel: vaststellen van de gevolgen van brandstofkeuze en de configuratie van de vergasser op het ontwerp van de ketel en de nageschakelde gasreiniging.
5. Economische evaluatie: bovenstaande reduceren tot economische gegevens, resulterend in de meest logische combinaties wat betreft brandstof, vergassingsconfiguratie en ketelconfiguratie.
6. Kennisdisseminatie op minimaal 2 evenementen/conferenties.

5.5 Resultaten

5.5.1 WP 1 Brandstofselectie (WP leiders RWE Essent en HoSt)

In WP 1 is een inventarisatie uitgevoerd van bestaande kennis en ervaringen met (semi) commerciële installaties en proefinstallaties. Tevens is een inventarisatie van laagwaardige brandstoffen uitgevoerd en een onderbouwde selectie van drie te testen laagwaardige brandstoffen gemaakt. Uit de hierboven beschreven taken kunnen de volgende conclusies worden getrokken:

Inventarisatie bestaande kennis CFB vergassing/koeling/reiniging en toepassing van het gas in een ketel:

CFB vergassing:

Er is in diverse installaties en op verschillende schaalgroottes (HoSt: Tzum, Lahti 1, Lahti 2) positieve ervaring opgedaan met vergassing van RDF/RDF afvalstromen. Het feit dat in Lahti een tweede vervolginstallatie is gerealiseerd op een schaal van 160 MW_{th} in een standalone toepassing, geeft veel vertrouwen in de technische haalbaarheid van toepassing van CFB vergassingstechnologie voor deze niet uniforme afvalstroom. Naast vergassing van RDF/RDF is de CFB vergassingstechnologie eveneens succesvol gedemonstreerd voor schoon hout en verontreinigd afvalhout (Ruien, Geertruidenberg, Lahti). Op kleinere schaal zijn in CFB proefinstallaties en (semi) commerciële installaties diverse brandstoffen succesvol getest gedurende meerdaagse testcampagnes met brandstoffen zoals stro (Foster Wheeler: 400 uur in 3 MW_{th} installatie), beendermeel (HoSt: 4 dagen continu), kippenmest (HoSt: duizenden uren), zonnebloem vliesjes (HoSt: duizenden uren).

Gaskoeling:

In een drietal installaties van HoSt op relatief kleine schaal (3- 5 MW_{th}) is de technologie bewezen betreffende afkoeling van syngas tot een temperatuur van 450 – 550°C met behulp van een gas/lucht koeler (pijp in pijp), voor diverse brandstofsoorten. Positieve langdurige resultaten zijn hierbij bereikt voor de brandstoffen kippenmest en zonnebloemvlesjes. Tevens zijn positieve resultaten bereikt in kortere meerdaagse testcampagnes met brandstoffen als RDF en beendermeel. Het koelerconcept is vanwege start/stop bedrijf in de gerealiseerde installaties nog niet volledig bewezen in volcontinu bedrijf (8000 uur/jaar). Ervaringen geven echter veel vertrouwen dat ook dit realiseerbaar is (er is geen vervuiling of verminderde warmteoverdracht in de tijd geconstateerd). Gezien het relatief lage teerdauwpunt dat wordt gerealiseerd bij vergassing van kippenmest zijn de langdurige positieve ervaringen ten aanzien van koelervervuiling met deze brandstof wellicht wat minder relevant (deze zin snap ik niet).

In diverse installaties van leverancier Foster Wheeler wordt een syngas/lucht koeler (eveneens pijp in pijp) succesvol toegepast voor afkoeling van het syngas tot een temperatuur van circa 650 - 750°C, voor een reeks brandstofsoorten (RDF, afvalhout, industrieel afval).

In de vergassingsinstallatie in Geertruidenberg worden serieuze problemen ondervonden met vervuiling van de gaskoeler welke is uitgevoerd als stoomketel (met diverse pijpenbundels in de gasstroom). Het lijkt er momenteel op dat de koeler niet optimaal is ontworpen/gedimensioneerd, maar dat de keuze voor een lagere vergassingstemperatuur de problemen kan reduceren.

Eerste ervaringen met de 2x 80 MW_{th} CFB vergasser van Metso (tegenwoordig Valmet) in Lahti geven vertrouwen in de toepassing van een stralingskoeler, bestaande uit gladde pijp/membraanwanden, voor productie van stoom of ECO water met RDF als brandstof. Het syngas wordt hierbij afgekoeld tot

een temperatuur van circa 400°C. Voor testen met een 5% zijstroom van de 80 MW_{th} Lahti (1) vergasser en de 3 MW_{th} proefinstallatie van Foster Wheeler, worden positieve resultaten gepresenteerd door de leverancier en VTT, voor afkoeling van syngas tot 350 tot 450°C met behulp van watergekoelde pijpenbundels. De temperatuur van het water werd hierbij dusdanig hoog ingesteld, dat teercondensatie werd vermeden. Reiniging (van de koelers?) vond plaats met behulp van 'spring hammers'. De brandstoffen bij deze testen betroffen RDF, afvalhout met RDF en stro.

Ontstopping:

In de installaties van HoSt is stof afvangen met behulp van cyclonen na een afkoeling tot 450-550°C succesvol gedemonstreerd voor de brandstoffen kippenmest en zonnebloem vliesjes en gedurende kortere testcampagnes met andere brandstoffen. Het afvangstrendement is, afhankelijk van de brandstofsoort, beperkt tot 85-95%. Het vermoeden bestaat dat de meeste alkali metalen met het stof worden verwijderd, dit is echter nog niet met metingen onderbouwd.

In Geertruidenberg is stof afvangen met behulp van cyclonen op een temperatuur van 300 – 500°C succesvol aangetoond.

In proefinstallaties van VTT en in een zijstroom van Lahti zijn succesvol proeven uitgevoerd met stof afvangen van syngas met behulp van hoge temperatuur filters, gekoppeld aan additieven injectie. Chloor, alkali, metalen (behalve onder andere Hg) worden bijna volledig verwijderd:.

Eerste ervaringen met de 160 MW_{th} installatie van Metso in Lahti geven vertrouwen in het concept van stofafscheiding met hoge temperatuur filters op een temperatuur van circa 400°C, bij toepassing van de brandstof RDF. Bij vergassing van RDF worden relatief veel zware teren geproduceerd, wat vertrouwen geeft in toepassing van dit concept voor andere brandstoffen. Bijna volledig worden chloor, alkali, metalen (behalve onder andere Hg) verwijderd.

In de hoge druk CFB installatie in Värnamo zijn na slechte ervaringen met keramische filters (scheurvorming) uiteindelijk goede ervaringen opgedaan met een metaal filter bij een temperatuur van 350-400°C.

Conceptueel/overig:

In het concept van HoSt (vergassing, koeling tot 500°C, cyclonen) blijkt geen agressieve vervuiling op te treden in de nageschakelde ketelinstallatie. Het stof dat de cyclonen passeert komt beschikbaar als fijnstof, wat makkelijk van pijpen te verwijderen is met behulp van roetblazers.

Bij vergassing van afval/RDF worden zwaardere teren geproduceerd. Hierdoor is extra aandacht nodig voor teercondensatie/vervuiling in de gaskoeler en een eventueel filter/cycloon bij toepassing van deze brandstof. De productie van zware teren kan worden verlaagd door keuze van een lagere vergassingstemperatuur.

Ten aanzien van het ketelontwerp lijkt het verstandig de rookgassen te koelen tot een temperatuur lager dan 700°C in een stralingsruimte of indien st of beperkt/niet wordt verwijderd in een syngas reinigingsinstallatie. Dit ter voorkoming van hardnekkige vervuiling van convectie V.O. (verwarmend oppervlak).

Brandstofselectie:

Dit project richt zich op het vergassen van brandstoffen, die zodanig laagwaardig zijn, dat de opwekking van elektriciteit en eventueel warmte op basis van die brandstoffen kan concurreren met die op basis van gangbare biomassa of gangbare fossiele brandstoffen.

Mogelijke brandstoffen:

De laatste jaren is de belangstelling voor het toepassen van uiteenlopende soorten biomassa toegenomen en ook is er een groeiende aandacht voor energetische toepassingen van allerlei brandbare restproducten, van zeer uiteenlopende oorsprong. In principe is vergassing een brandstofvoorbewerking die de uiteindelijke toepassingsmogelijkheden van de brandstof als energiedrager verbreedt en vergroot. Impliciet wordt in dit project uitgegaan van vergassing op basis van wervelbedtechnologie, hetgeen inhoudt dat de vergasser in principe beperkte eisen stelt aan de

structuur en logistieke eigenschappen van de brandstof. De brandstof hoeft bijvoorbeeld niet maalbaar te zijn.

De lijst van mogelijke brandstoffen, die in dit project beschouwd worden, komt voort uit scouting- en handelsactiviteiten in een zich ontwikkelende markt voor brandbare reststoffen, die een gedeeltelijke overlap heeft met de markt voor afvalstoffen. In Tabel 1 is een overzicht weergegeven van mogelijke brandstoffen en hun score op de diverse aspecten, die voor toepassing in vergassingsinstallaties van belang zijn. Deze aspecten, die in feite de criteria zijn waarop de brandstoffen geselecteerd worden, zijn:

- Prijs. Het spreekt voor zich, dat voor gesubsidieerde (schone) biomassa toepassingen brandstoffen alleen in aanmerking komen als de prijs (per GJ) duidelijk lager is dan de prijs van biomassa, die direct in een ketel kan worden meegestookt, zoals witte houtpellets. Daarnaast is het ook duidelijk, dat brandstoffen, die zonder subsidie moeten concurreren met fossiele brandstoffen, vooral kolen, een prijs moeten hebben, die significant lager is (per GJ) dan de prijs van kolen.
- Beschikbaarheid. Van belang is een continu, of tenminste goed voorspelbaar, aanbod van de brandstof. Daarnaast is de beschikbare hoeveelheid belangrijk: voor kleinere vergassingsinstallaties ligt de ondergrens tussen 5.000 en 10.000 ton per jaar, voor grotere vergassers, gekoppeld aan een (kolen-)centrale ligt de ondergrens in de ordegrootte van 50.000 ton per jaar.
- Corrosie en vervuiling. Neiging tot het veroorzaken van corrosie en/of vervuiling in de installatie. Deze wordt met name bepaald door de samenstelling van de as in de brandstof.
- Agglomeratie. Neiging tot agglomeratie in het wervelbed. Deze neiging wordt eveneens puur bepaald door de eigenschappen van de as in de brandstof.
- Emissies. Dit aspect werkt verschillend uit voor vergassers die 100% van het gas voor een eindgebruiker leveren en vergassers, die het gas leveren aan een ketel, die al een eigen brandstof als hoofdbrandstof verwerkt. Niettemin is hier in algemene zin de verwachte trend beoordeeld.
- Askwaliteit. Het ontwikkelen van toepassingsmogelijkheden voor bodemas en vliegias is steeds een project op zich, dat veel tijd en inspanning vergt. Hier wordt alleen een score toegekend op basis van de chemische samenstelling. Voor vergassers in een bijstooksituatie kan er ook nog een effect doorwerken in de askwaliteit van de ketel, waarin het productgas wordt bijgestookt.
- Logistieke eigenschappen. Is transport en opslag van de brandstof goed mogelijk voor toepassing in een vergasser?
- Is andere, goedkopere verwerking mogelijk? Brandstoffen, die ook direct in een ketel kunnen worden meegestookt, komen op economische gronden in principe niet in aanmerking voor vergassing, aangezien die methode aanzienlijk duurder is.

Tabel 1 Overzicht mogelijke laagwaardige brandstoffen

Overzicht mogelijke laagwaardige brandstoffen voor concurrerende gasproductie t.b.v. elektriciteitsopwekking										
Brandstof	Prijs	Beschikbaarheid	Corrosie in installatie	Vervuiling in installatie	Agglomeratie in wervelbed	Emissies	Askwaliteit	Logistiek	Goedkopere verwerking mogelijk	Opmerkingen
Afval uit aardappelverwerking (slib)								te vochtig, niet verwerkbaar		
Bentoniet (vethoudend)	+	- +	+						ja	
Biokool (getorrificeerde biomassa)	-	-	+	+		+			ja	
Diermeel	+	+ -	-	-	-					
Digestaat	- +	+ -	-	-	?	-	- -			
Koffie husk	-	-	- +	0	0	0	0			
Kokos schalen	+ -	+ -	+ -	?	?	0	0			
Paper rejects	+	+	- +	0 -	0 -	+	+			
PKS (Palm Kernel Shells)								- -		te zwaar
Rijst husk	-	-	-	-	?	0	0			
Zeefoverloop GFT	+ -	+ -	?	-	?	+	+	-		erg vochtig
Zonnebloem husk	-	-	-	-	?	0	0			
Autobanden	?	- ?	?	?	?	?	?			
Dakleer	+ -	+	-	?	?	0	0			
Kabelschroot	+	- -	?	?	?	0	0			
RDF fluff	+ -	+	?	?	+ -	?	+ -		nee	
RDF pellets	+ -	+	?	?	+ -	?	+ -			
RWZI slib	+	++	-	-	?	0	0	te vochtig, niet verwerkbaar		
Xylit	- +	-	0	0	0	0	0			

Brandstofselectie:

Op grond van de scores in bovenstaande tabel zijn de volgende brandstoffen geselecteerd voor beschouwing en testen in dit TKI project: diermeel (Meat and Bone Meal, MBM), paper rejects en RDF.

5.5.2 WP 2 Vergassingstesten

Labschaal testen met de geselecteerde brandstoffen:

Brandstoffen:

Op basis van de selectie uitgevoerd binnen WP1, zijn drie laagwaardige brandstoffen geselecteerd voor testen in het project: diermeel (meat and bone meal, MBM), paper rejects en RDF. Bovendien is het effect van additieven bestudeerd. Twee verschillende additieven (halloysiet en koolvliegias) zijn aan paper rejects toegevoegd (additief: 5% van het gewicht van het mengsel).



Paper rejects
- Large pieces of metal and plastic removed.
- 40-60% wt. moisture (wet basis)

1 x pelletization, 8 mm dye.

2 x pelletization, 8 mm dye.

6 x pelletization, 4 mm dye.
Moisture ~ 35% wt. (wet).

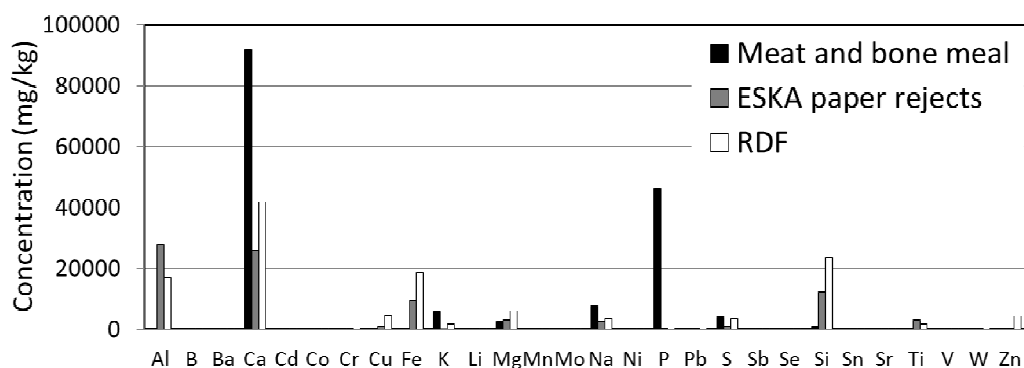
Air-dried to 5% wt. moisture.
1 x pelletization, 4 mm dye.

Figuur 2. Voorbewerking van paper rejects voor lab testen.

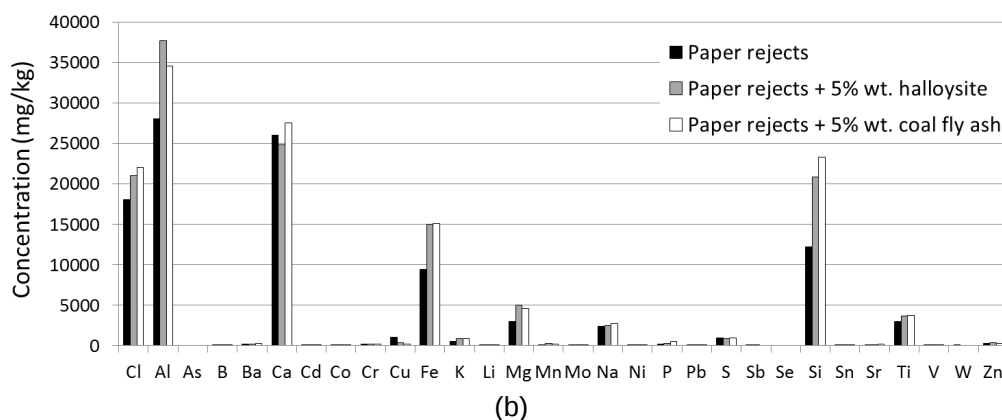
De samenstelling van de verschillende brandstoffen is weergegeven in Tabel 2 en Figuur 3. Alle brandstoffen hebben een relatief hoog asgehalte (14-26 gew.%, droge basis). MBM heeft hoge concentraties van Ca en P, terwijl RDF en paper rejects grote hoeveelheden van Cl, Al, Ca, Fe, Cu en Si bevatten. Daarnaast wordt door het gebruik van additieven de concentratie van Al, Si, Cl, Fe en Mg ten opzichte van de onvermengde brandstof hoger. Dit komt door de minerale samenstelling van de additieven.

Tabel 2. Samenstelling van geselecteerde brandstoffen.

		Diermeel, MBM	Paper rejects	RDF	Paper rejects + 5 gew.% haloysiet	Paper rejects + 5 gew.% koolvliegias
As (550°C)	(% w/w, dry)	26	14	24	19	20
Vluchtig	(%w/w, dry)	65	75	67	70	70
HHV	(MJ/kg, dry)	18.8	26.3	22.6	24.8	24.7
C	(%w/w, dry)	42	57	49	51	51
H	(%w/w, dry)	6	8.1	6.7	7	6.9
N	(%w/w, dry)	8.6	0.3	0.95	0.4	0.3
O	(%w/w, dry)	19	23	23	21	21
S	(mg/kg dry)	3800	894	2933	600	700
Cl	(mg/kg dry)	5000	18014	14381	21000	21000



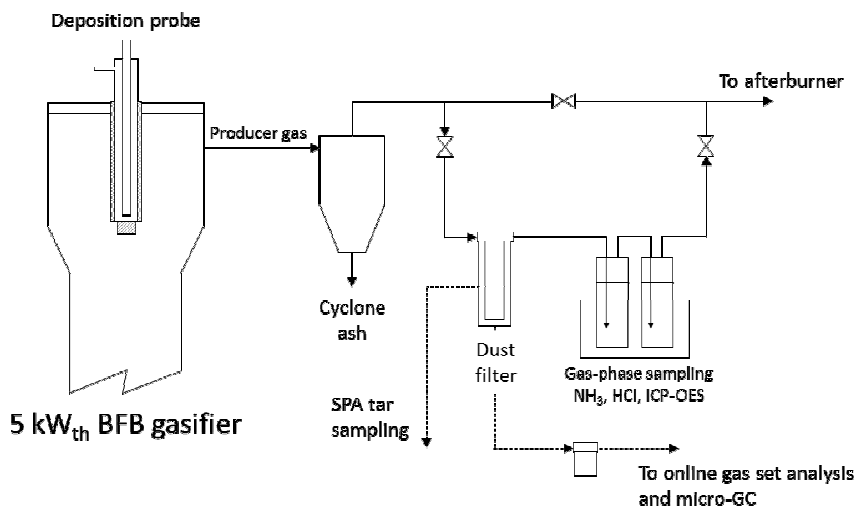
(a)



Figuur 3. ICP analyse van de geselecteerde brandstoffen: (a) onvermengde brandstoffen; (b) paper rejects zonder- en met additieven.

Experimentele opstellingen:

De experimenten voor het onderzoek naar de invloed van het type brandstof, de vergassingstemperatuur en het toevoegen van additieven zijn uitgevoerd in een lab schaal wervelbed (BFB) vergasser in het laboratorium van ECN. Het schema van de experimentele opstelling is getoond in Figuur 4. Na de vergasser passeert het stookgas een cycloon, waar het cycloonas van het gas gescheiden wordt. Het resterende fijnstof in het gas wordt vervolgens in een filter afgevangen. Het stookgas gaat door een vloeistof voor verdere chemische analyse van de gassamenstelling (ICP) (de oplosbare gassen: HCL, NH₃ e.d.; andere gassen gaan naar de micro-GC). Een gekoelde depositie probe kan in het freeboard van de vergasser geplaatst worden om de depositievorming op de gaskoeler te simuleren. Na elk experiment zijn de depositie monsters verzameld voor verdere analyse middels SEM/EDX microscopie. De samenstelling van het stookgas is online gemeten door micro-GC analyse. De hoeveelheid en samenstelling van teren is bepaald via SPA teeranalyse.

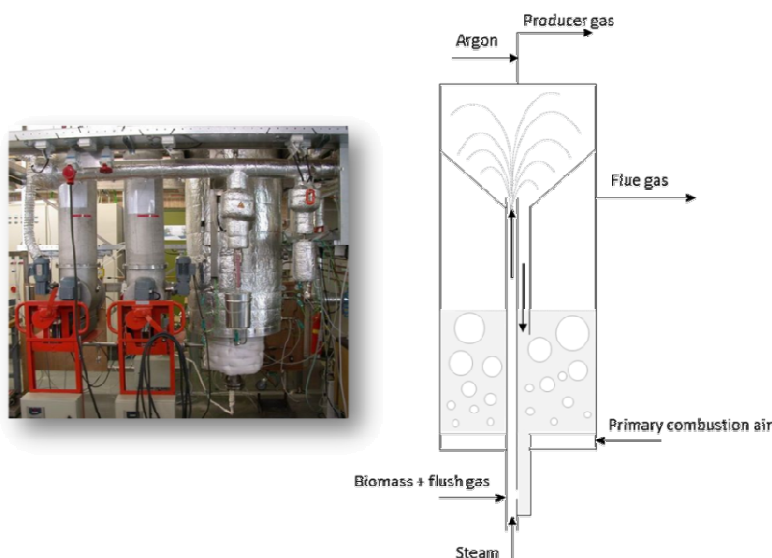


Figuur 4. Schematische weergave van de 5 kW_{th} wervelbed vergasser opstelling bij ECN.

De vergassingsexperimenten zijn uitgevoerd met lucht/stoom als vergassingsatmosfeer. Stoom is toegevoegd aan de vergasser om het realistische (als ontvangen) vochtgehalte van de brandstoffen (b.v. 40-50 gew.% vocht in het geval van paper rejects) te simuleren. Voor de labexperimenten was het noodzakelijk de brandstoffen voor te bewerken, zodat de brandstoffen goed te voeden zijn in de lab schaal vergassers, zie Figuur 2 als voorbeeld. Elke brandstof is getest op verschillende temperaturen (750°C, 850°C, en aanvullend 700°C in het geval van paper rejects). Zand (deeltjesgrootte > 0.25 mm) was het bedmateriaal in de vergasser. In alle testen was het brandstofdebiet bepaald op ~ 0.3 kg/uur. Voor de studie van de invloed van additieven zijn paper rejects en de mengsels daarvan met additieven getest bij identieke condities (temperatuur 850°C en lucht/stoom atmosfeer).

Naast de kleinschalige testen hierboven beschreven zijn ook testen op 25 kW_{th} schaal uitgevoerd. Hiervoor is MILENA, een indirecte vergassingstechnologie ontwikkeld door ECN, gebruikt. De MILENA vergasser bestaat uit een riser (waar pyrolyse/vergassing van de brandstof plaatsvindt) en een BFB verbrandingskamer (waar de overgebleven kool verbrand wordt voor warmteopwekking). In de rustkamer wordt het stookgas van de vaste stoffen (kool en bedmateriaal) gescheiden. De vaste stoffen worden gerecirculeerd naar de verbrandingskamer via de downcomer. Warmte wordt overgebracht van de combustor naar de riser door de circulatie van het bedmateriaal. Het schema van MILENA wordt in Figuur 5 getoond.

Het doel van de test met MILENA is het vergelijken van de prestaties van direct BFB- en indirect vergassing met betrekking tot de verontreinigen/verdeling van de elementen met paper rejects als brandstof (3,5 kg/uur) op lage temperatuur (~730°C). Stookgassamenstelling, teer gehalte/samenstelling en gasfase samenstelling zijn bepaald. Er is geen depositieprobe gebruikt in MILENA.

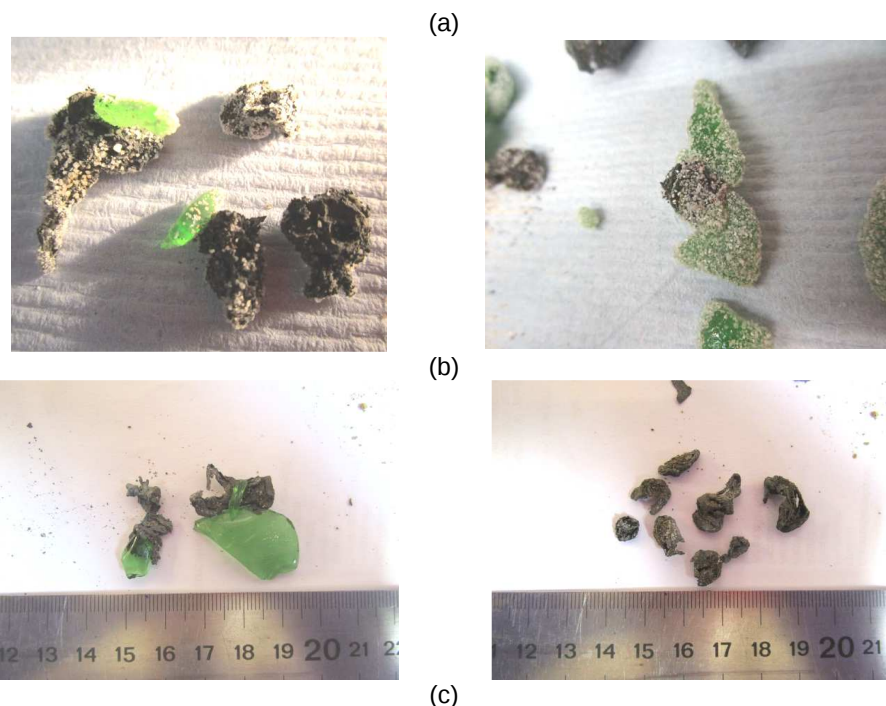


Figuur 5. Schematische weergave van de 25 kW_{th} MILENA indirect vergasser bij ECN.

Resultaten:

In laagwaardige brandstoffen kunnen diverse verontreinigingen zitten zoals glas en metaal. Afhankelijk van de temperatuur in het wervelbed kunnen materialen gaan smelten. Het smelten kan ertoe leiden dat er aan de gesmolten massa andere deeltjes blijven plakken, waaronder het bedmateriaal of andere vaste stoffen. Dit kan tot (grotere) ongewenste agglomeraten leiden. Figuur 6 laat de verschillen zien wanneer er aan een fluïde zandbed van 900°C en 750°C glas, ijzer (bierdopjes) en aluminium (bliklipjes) worden toegevoegd. Bij 900°C smelt het aluminium en het glas en plakt er bedmateriaal aan het glas. Eveneens is het te verwachten dat een deel van het aluminium in de gasfase kan komen vanwege de vluchtigheid van het metaal bij deze hoge temperatuur. Bij 750°C smelt alleen het aluminium, maar het is aannemelijk dat er meer achterblijft in het bed, omdat er minder verdampt. Het glas smelt nagenoeg niet, maar kan wel aan het aluminium gaan plakken. Een lagere temperatuur heeft duidelijk voordelen, er ontstaan minder agglomeraten en de vaste stoffen kunnen makkelijker met de bodemas worden verwijderd uit de installatie.

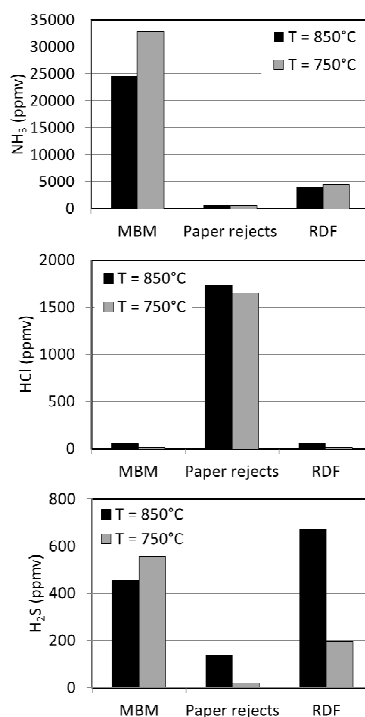




Figuur 6. Effect van verontreinigingen (glas en aluminium) in het bedmateriaal: (a) Aanvankelijke deeltjes; (b) Deeltjes na vergassing op 900°C; (c) Deeltjes na vergassing op 750°C.

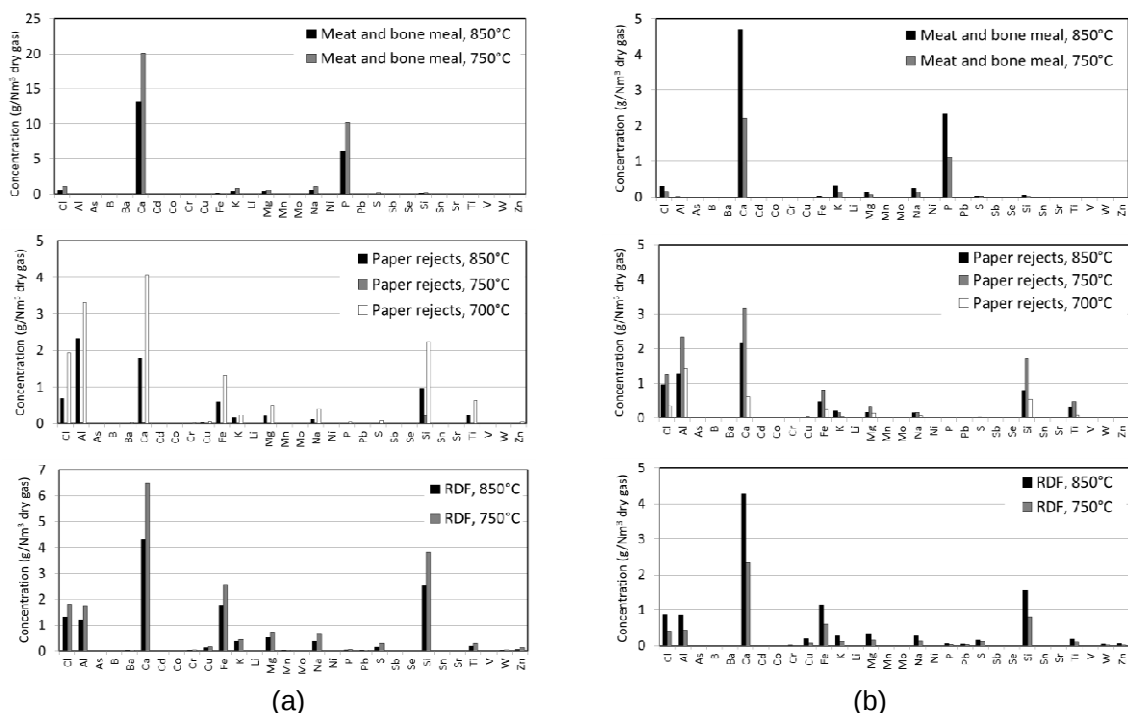
Effect van vergassingstemperatuur:

Figuur 7 laat zien dat het stookgas van MBM vergassing de hoogste concentratie van NH_3 (2.5-3.3 vol.%, droge basis) heeft van de geteste brandstoffen. Paper rejects vergassing produceert de hoogste concentratie van HCl (~ 1700 ppmv), maar vertoont het laagste H_2S gehalte. Lagere vergassingstemperaturen leiden tot een hogere productie van NH_3 , maar verminderen de hoeveelheid chloor, die naar de gasfase gaat. Geen duidelijke trends zijn gevonden voor de temperatuurafhankelijkheid van de H_2S concentratie. Ondanks een soortgelijk chloorgehalte in paper rejects en RDF (zie Tabel 2), is de HCl concentratie van het stookgas significant verschillend. Dit is een indicatie, dat niet alleen de temperatuur, maar ook het vochtgehalte van de brandstof de HCl formatie kan beïnvloeden tijdens het vergassingsproces, en daarmee de samenhangende problemen (afzettingen, fouling, corrosie). Hogere initiële vochtgehalten van de brandstof lijken de vorming van chloor in de gasfase te verhogen. Deze hypothese is niet getoetst. Een experiment met paper rejects met hoger en lager vochtgehalte zou uitsluitel kunnen geven, maar was binnen dit project niet meer mogelijk. Dit betekent dat een slim ontwerp van het proces (combinatie van brandstofvoorbewerking, vergassingscondities, gasreinigingssectie) de technische uitdagingen van laagwaardige brandstoffen kan beperken.



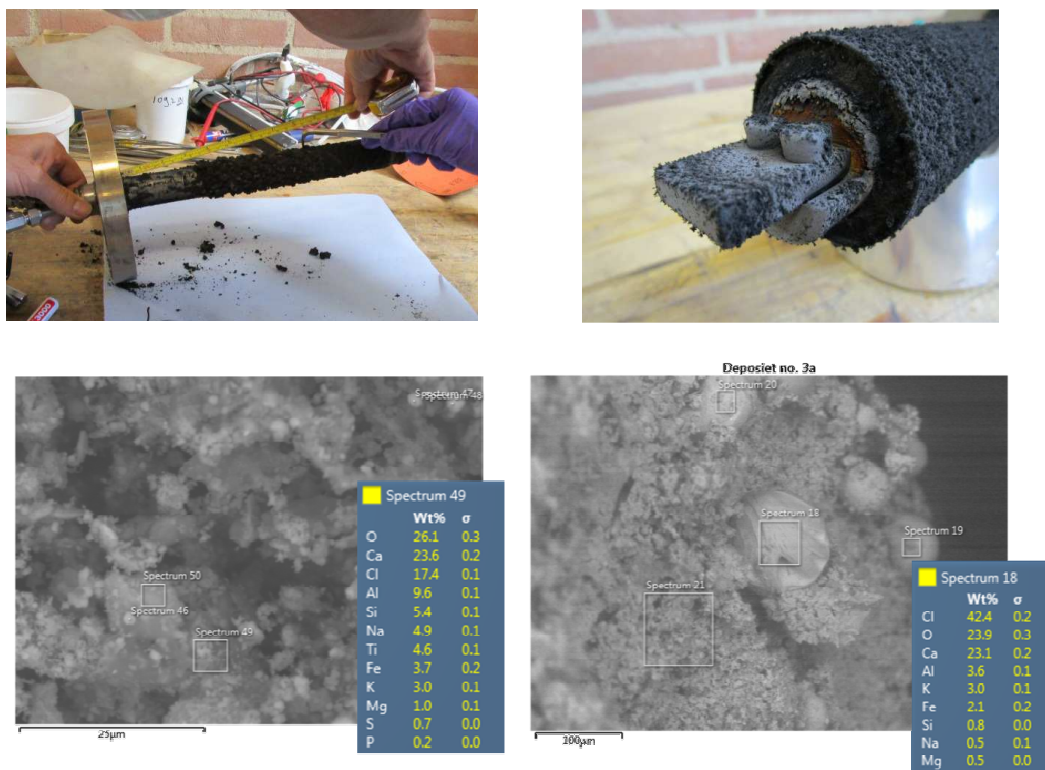
Figuur 7. Effect van temperatuur en brandstof op de NH₃, HCl en H₂S concentraties (droge basis) van het stookgas.

Temperatuur beïnvloedt niet alleen de samenstelling van de componenten in de gasfase. Figuur 8 laat zien dat lagere vergassingstemperaturen tot hogere concentraties van elementen in het cycloonas en lagere concentraties van elementen in het filteras leidt. Veranderingen in temperatuur veroorzaken een verschuiving in de kwantitatieve verdeling van elementen (met name chloor) tussen de gas- en vaste fase. Ondanks een iets lagere brandstofconversie, veroorzaakt door lagere vergassingstemperaturen, kan door de lagere temperatuur de hoeveelheid problematische verontreinigingen naar de gasfase beperkt worden. Een temperatuur van ~750°C blijkt een goede trade-off te zijn tussen koolstofconversie, cold gas efficiency, teer gehalte/samenstelling en verdeling van chloor in de vaste stof- en gasfase.



Figuur 8. Effect van temperatuur en brandstof op de samenstelling van cycloonas (a) en filteras (b).

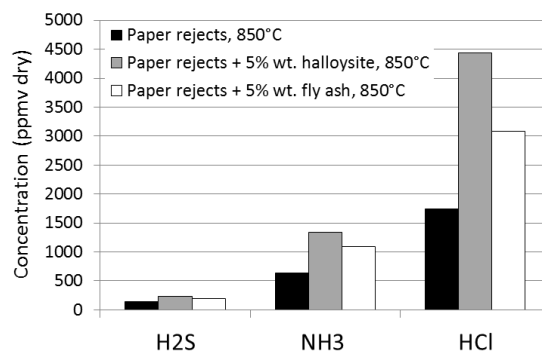
Figuur 9 laat een voorbeeld zien van de SEM/EDX analyses, die uitgevoerd zijn aan de afzettingen, die gevormd zijn op de depositie probe tijdens de vergassing van paper rejects bij verschillende temperaturen. De analyse van de overige monsters is gerapporteerd in het ECN rapport ECN-X--15-038. De analyses laten zien dat er zouten neerslaan op het oppervlak van de probe (oppervlaktecondities simuleren de gaskoeler in de RWE Essent Amer installatie). De analyse maakt inzichtelijk dat de afzettingen diverse zouten, zoals CaCl_2 , NaCl , KCl , of AlCl_3 bevatten. In het algemeen leiden hogere vergassingstemperaturen tot dichtere, gedeeltelijk gesmolten en gesinterde afzettingen, met hogere concentraties chloor. Dit type afzettingen is moeilijker te verwijderen en beïnvloedt de thermische eigenschappen van de gaskoeler nadelig. Lagere vergassingstemperaturen leiden tot poreuzere, zachtere en makkelijker verwijderbare afzettingen. Afzettingen uit de testen met RDF vergassing laten vergelijkbare resultaten zien als die van de paper rejects, maar met opvallend hogere concentraties van lood. Paper rejects en RDF als brandstof zijn inhomogeen van samenstelling en uitschieters in teruggevonden elementen zijn daarom mogelijk.



Figuur 9. SEM/EDX analyse van afzettingen uit paper rejects vergassing: 750°C (links), 850°C (rechts).

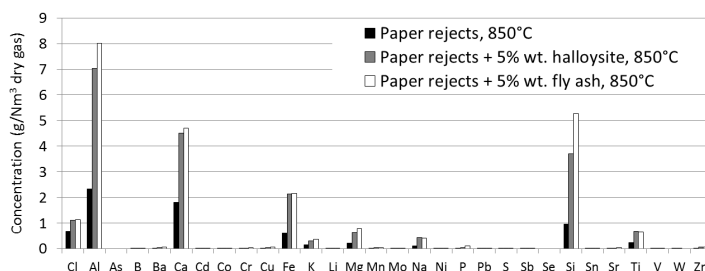
Effect van brandstofadditieven:

Figuur 10 laat zien dat de toevoeging van halloysiet of poederkoolvliegias als additief bij paper rejects vergassing de concentratie van de elementen S, N en Cl in de gasfase verhoogt. Dit effect is sterker in het geval van halloysiet.

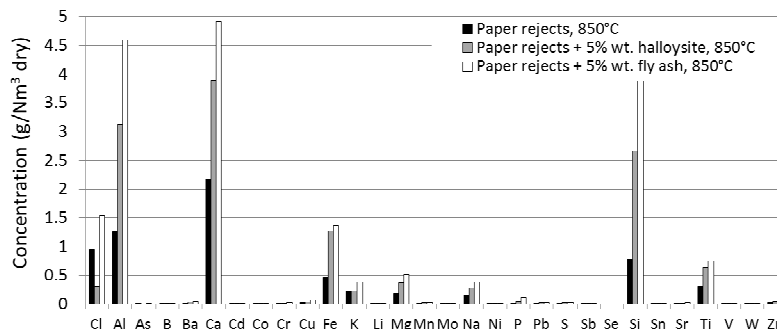


Figuur 10. Effect van additieven op NH₃, HCl en H₂S concentraties (droge basis) van stookgas.

Figuur 11 laat zien dat de toevoeging van halloysiet of koolvliegias het gehalte van elementen zowel in het cycloonas als in het filteras verhoogt. Een significante toename van zowel Al en Si als Ca, Fe, Na en K concentraties wijst op de aanwezigheid van hoog-smeltpunt alkali/calcium aluminosilicaten. Deze gebonden alkali's kunnen beschouwd worden als minder problematische verbindingen, vanwege hun hoge smeltpunt.



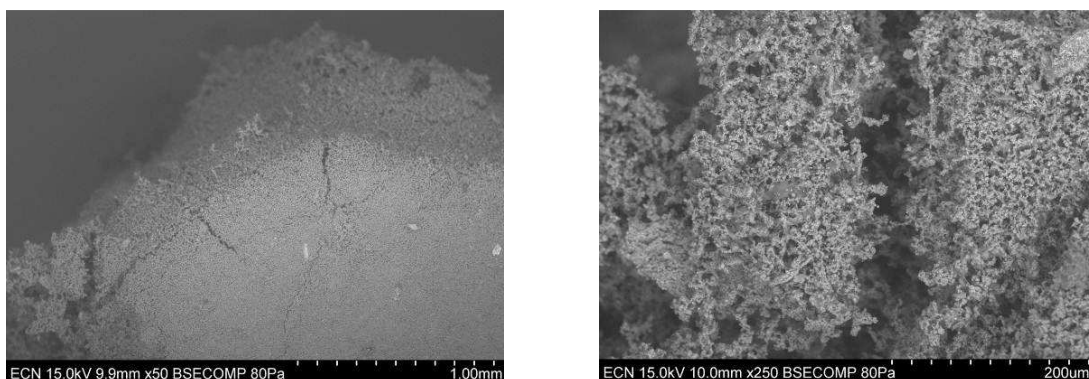
(a)



(b)

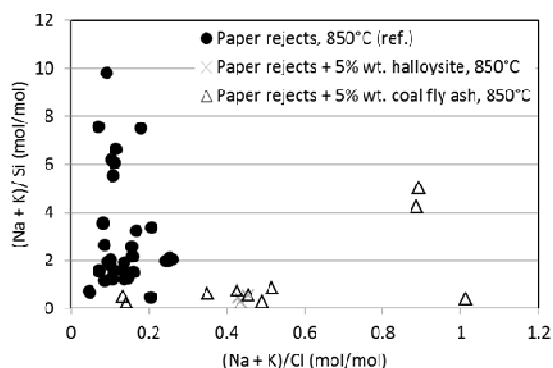
Figuur 11. Effect van additieven op de samenstelling van cycloonas (a) en filteras (b).

Figuur 12 laat de SEM/EDX analyse zien van de afzettingen op de depositieprobe uit het vergassingsexperiment van paper rejects + 5 gew.% halloysiet op 850°C (voor resultaten met koolvliegias zie ECN rapport ECN-X--15-037). De afzettingen zijn minder gesinterd en zachter en bevatten geen zichtbaar gesmolten zouten. Tijdens vergassing van ongemengd paper rejects werd een afzetting gevormd bestaande uit afzettingen met gesmolten zouten (zie Figuur 9). Er zijn geen gesmolten structuren gevonden in de afzettingen van de testen met de toevoeging van zowel halloysiet als koolvliegias.



Figuur 12. SEM/EDX analyse van afzettingen uit paper rejects vergassing + 5 gew.% halloysiet op 850°C.

De additieven veranderen niet alleen de morfologie, maar ook de samenstelling van de resulterende afzettingen. Figuur 13 toont de atomische verhoudingen $(Na + K)/Cl$ en $(Na + K)/Si$ van de afzettingen geproduceerd tijdens vergassing van zowel ongemengde als met additieven gemengde paper rejects. De getallen geven informatie over de verbindingen die vormen door toevoeging van additieven. Uit de grafiek kan geconcludeerd worden dat vergassing van ongemengde paper rejects tot lagere $(Na+K)/Cl$ verhoudingen leidt, wat betekent, dat er hogere concentraties van zouten (b.v. $NaCl$, KCl , $CaCl_2$) aanwezig zijn in de afzetting. Het toevoegen van additieven aan de brandstof verschuift de ratio's naar hogere $(Na+K)/Cl$ en lagere $(Na+K)/Si$ waarden. Dit betekent dat de alkali's (oorspronkelijk aanwezig in de vorm van zouten) in toenemende mate gebonden worden in minder problematische aluminosilicaten. Het smeltpunt van aluminosilicaten ligt significant hoger ($>1500^{\circ}C$) en daarom zullen deze verbindingen veel minder in de gasfase terecht komen en minder afzettingen vormen. De conclusie is dat het toevoegen van de geteste additieven het toepassen van problematische, alkali- en chloorrijke brandstoffen, zoals paper rejects, mogelijk maakt, met minder fouling, slagging en corrosie problemen, door een effectieve vermindering van het in de gasfase gaan van zouten. Vervolgonderzoek is gewenst, omdat het geteste halloysiet één van de vele soorten halloysiet is. Halloysiet kan in meer of mindere mate bewerkt zijn. De vraag die ontstaan betreft het vinden en testen van het juiste type halloysiet, dat voldoende actief is tegen een zo laag mogelijke prijs.



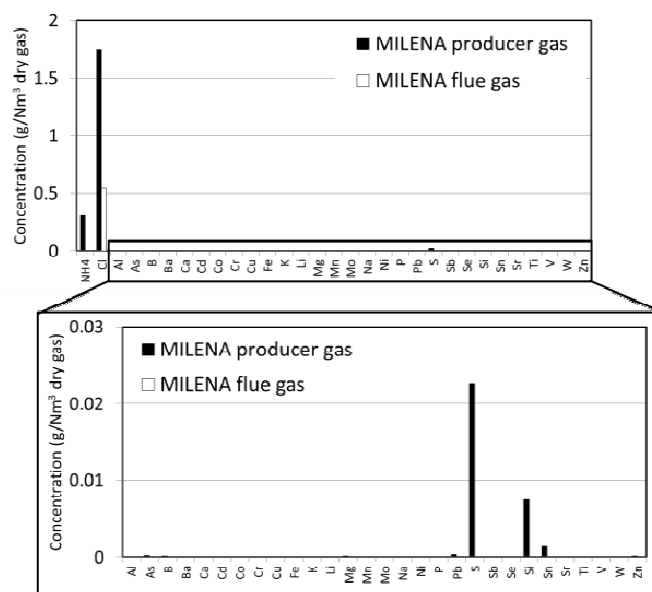
Figuur 13. Effect van additieven op de samenstelling van afzettingen.

Paper rejects vergassing in MILENA:

Een test bij lage temperatuur ($\sim 730^{\circ}C$) is in MILENA uitgevoerd voor de vergelijking tussen directe- en indirecte vergassing, met de focus op de verdeling van problematische elementen. De temperatuur was geselecteerd op basis van de experimenten in de BFB vergasser.

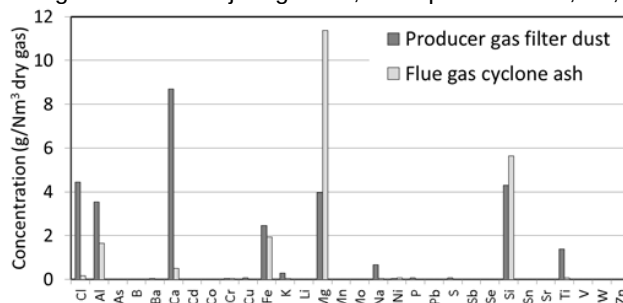
Indirecte vergassing produceert twee gasstromen in plaats van één: het stookgas en het rookgas. Elk van hen heeft een verschillende samenstelling en verschillende stofgehalten. Figuur 14 toont de diverse stoffen in het stook- en rookgas uit MILENA. De hoogste concentratie van het stookgas valt deel aan chloor ($\sim 1.7 \text{ g/Nm}^3$ of 1100 ppmv droog gas), gevolgd door NH_3 (NH_4^+) (0.3 g/Nm^3 of $\sim 390 \text{ ppmv}$ droog). Sporen van andere elementen zoals S, Si, Sn en Pb zijn aanwezig ($< 0.025 \text{ g/Nm}^3$). De concentratie van de overige elementen is onder de detectiegrens. De concentraties van Cl en N in het stookgas uit MILENA zijn van dezelfde orde grootte als die in het stookgas via directe BFB vergassing

(zie Figuur 7). Verder is chloor ($\sim 0.5 \text{ g/Nm}^3$ of $\sim 340 \text{ ppmv}$ droog) eveneens aanwezig in het rookgas uit MILENA.



Figuur 14. Samenstelling van stookgas en rookgas uit MILENA lage temperatuur vergassing van paper rejects.

Stof in het MILENA stookgas (Figuur 15) bevat hoofdzakelijk Ca, Cl, Si, Mg, Al, en Fe. Integendeel bevat stof uit MILENA rookgas hoofdzakelijk Mg en Si, met sporen van Al, Fe, Ca en Cl.

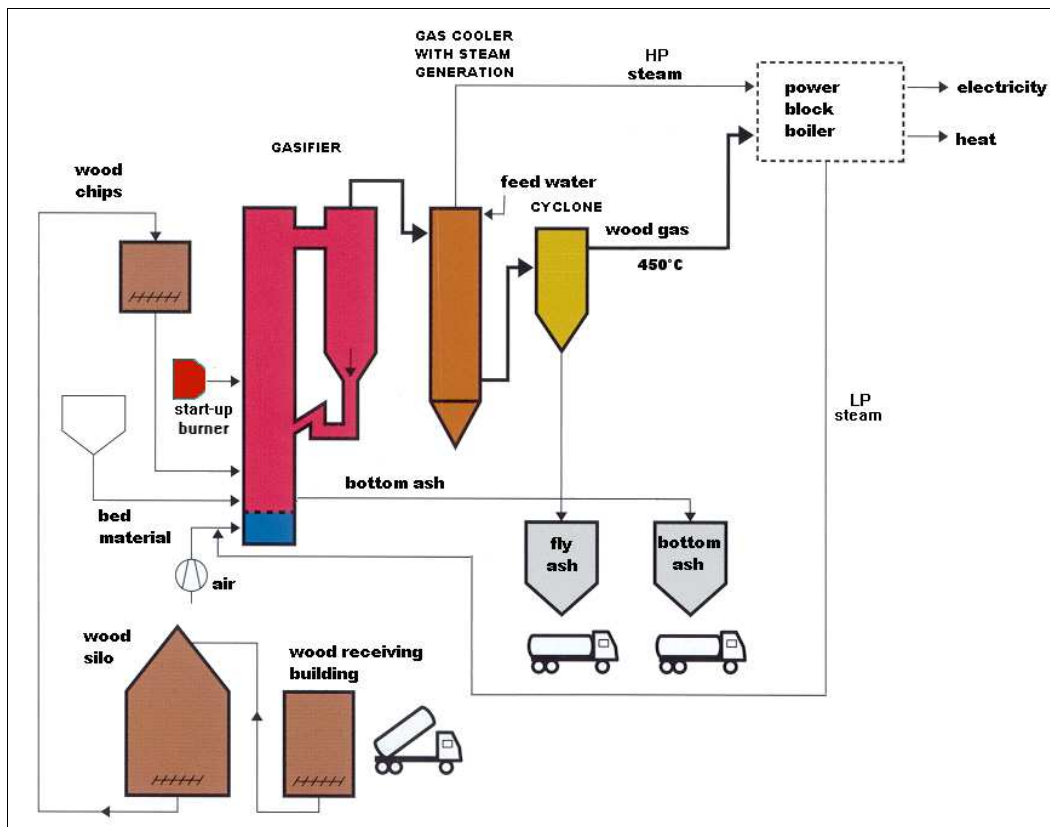


Figuur 15. Samenstelling van vliegias in stookgas en rookgas uit MILENA lage temperatuur vergassing van paper rejects.

Full-scale testen van de verschillende geselecteerde brandstoffen:

Inleiding, achtergrond en testplan:

Het doel van de vergassingstest is te onderzoeken of het meestoken van RDF (Refuse Derived Fuel) via de bestaande (hout)vergasser van Amercentrale 9 technisch, economisch en conform milieu-eisen uit te voeren is. RDF zal hierbij voor een deel bouw- en sloophout vervangen.



Figuur 16. Overzicht van het vergassingsproces.

Tijdens deze eerste test wordt het gedrag van het RDF in het vergassingsproces onderzocht. Planning is om bij aanvang van de test 25% van het bouw- en sloophout te vervangen door RDF en dit halverwege de test te verhogen naar circa 50%. Specifieke aandachtspunten tijdens de test zijn:

- De kwaliteit van het gevormde synthesesgas;
- De mate van vervuiling van de gaskoeler;
- De mate van optreden van agglomeratie in de vergasser;
- De chemische samenstelling van de ontstane assen.

Tijdens deze test is bijna 2400 ton RDF vergast. Tijdens de test zijn de volgende wijzigingen en aanpassingen doorgevoerd:

Brandstofmix:

- Op 6 februari 2013 is het eerste RDF bijgemengd (via noodverlading) tot bijna 20 gew.%. Na 2 dagen is "via de normale route" RDF bij het bouw- en sloophout gemengd (ongeveer 20 gew.%). Na ongeveer 100 ton RDF ontstond snelle gaskoelervervuiling en is de installatie uit bedrijf genomen en gereinigd.
- Herstart van de RDF test op 7 april 2013, na enkele weken houtvergassing, via normale brandstoflogistiek (totaal ongeveer 100 ton RDF). Wederom snelle gaskoelervervuiling en installatie uit bedrijf genomen om te reinigen.
- Vanaf 10 december 2013 is de RDF test hervat, in eerste instantie met ongeveer 8 gew.% RDF bijmenging, vervolgens oplopend tot bijna 20 gew.% RDF. In deze periode zijn geen noemenswaardige problemen geconstateerd, ook geen (snelle(re)) gaskoelervervuiling. In december is ongeveer 200 ton RDF meegestookt.
- Herstart op 27 januari 2014 met 100% bouw- en sloophout – start met bekende brandstof na stilstand.
- Gevolgd door ruim 2 dagen op 20 gew.% RDF – opbouwen van RDF percentage.
- Vervolg: 40 gew.% RDF gedurende 3 dagen.
- In maart 2014 is, na een stilstand van 3 weken, de test met 40% RDF voortgezet gedurende 10 dagen. In figuur 17 staan globaal de geloste brandstof naar de opslagsilo en de verbruikte brandstof weergegeven voor 2014.

Vergassertemperatuur:

- Na de deelttest in april 2013 en de geanalyseerde gaskoelervervuiling is geconcludeerd dat de vergassertemperatuur verlaagd dient te worden om de vervuilingssnelheid te verminderen.
- Diverse (software)wijzigingen uitgevoerd om de vergassertemperatuur instelbaar te maken tussen 700 en 900°C.
- Vanaf september 2013 zijn deze wijzigingen geïmplementeerd, in bedrijf gesteld en getest met bouw- en sloophout.
- Vergassertemperatuur stapsgewijs verlaagd van 840°C naar 750°C.

Brandstof-/luchtverhouding:

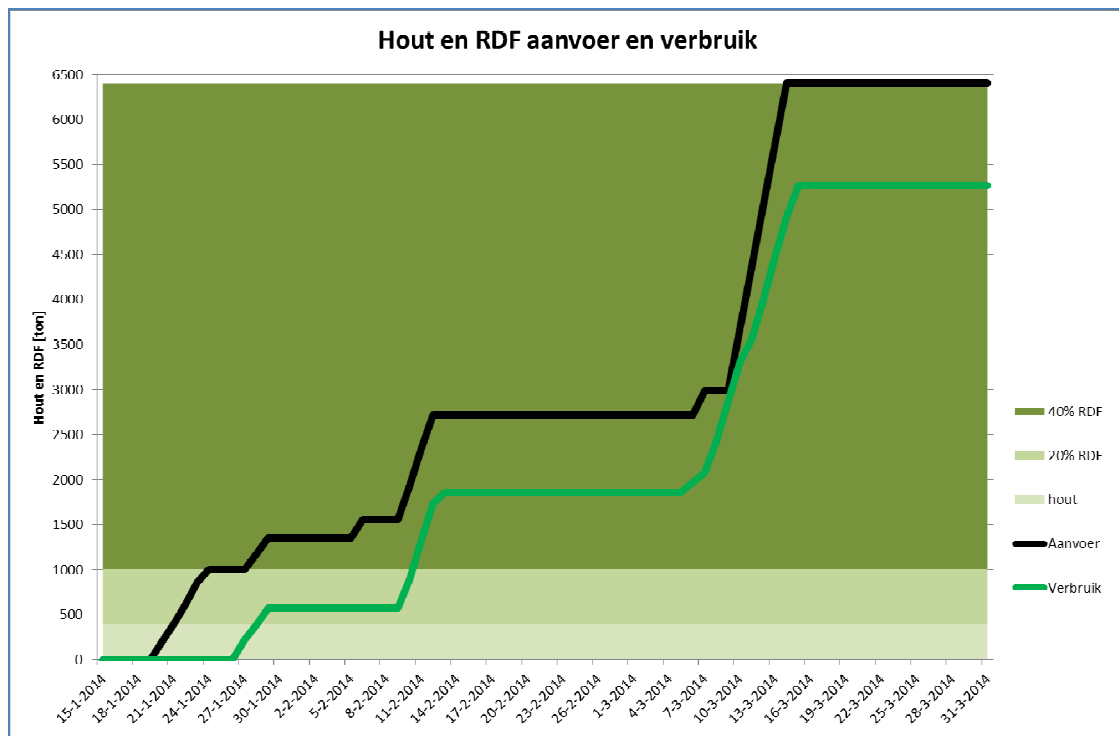
- Aanpassing van curve voor hout i.v.m. hogere percentage RDF en lagere vergassertemperatuur – verbeteren regeling.

Bodemasafvoer verhoogd:

- Ingestelde begrenzingen voor houtvergassing verwijderd i.v.m. hogere asgehalte van RDF t.o.v. hout.
- Diverse (software)wijzigingen waaronder stoomdrukregelparameters.

RDF opslag:

- Door onderbrekingen van de test i.v.m. gaskoeler lekkages en extra gaskoelerreinigingen en noodzakelijke (grotere) installatiemodificaties is de aangeleverde RDF voor test 1 tijdelijk buiten op het terrein in gestapelde balen opgeslagen.



Figuur 17. Brandstofmix aanvoer en verbruik.

Resultaten:

Brandstofhoeveelheid en vergassingsuren in 2014: in totaal is er 5685 ton brandstof vergast, waarvan 3717 ton bouw- en sloophout en 1968 ton RDF, in 302 vergassingsuren. In de gehele test 1-fase is tot nu toe bijna 2400 ton RDF meegestookt.

Vergassingsproces:

- Vergassertemperatuur is stapsgewijs verlaagd naar 750°C om gaskoelervervuiling te verminderen. Dit heeft een positief effect gehad op de gaskoelervervuilingssnelheid, zie december 2013: zonder problemen tot 20 gew.% RDF meegestookt. Zoals in de periode februari-maart 2014 bleek, luistert dit zeer nauw (geringe overschrijding van de ingestelde temperatuur gedurende korte tijd leidt al tot versnelde vervuiling) en is bij hogere RDF percentages een (extra) aanpassing van de brandstof-luchtverhouding nodig.
- Zandtoevoer: voor RDF is slechts 1/4 tot 1/3 van de zandverversing voor houtvergassing nodig.

- Bodemas: deze is bij 40 gew.% RDF meestoken tot 50% hoger dan voor houtvergassing; dit komt door het hogere aspercentage van RDF, waarvan t.o.v. hout een groter deel bodemas wordt. Het bodemasafvoersysteem zit hiermee nagenoeg aan zijn grens; voor verdere verhoging van het RDF percentage zal dit waarschijnlijk aangepast moeten worden.
- Vliegias: de hoeveelheid (vlieg)as, die met het geproduceerde gas de vergasser verlaat is hoger dan voor hout, ondanks het feit dat een groter aandeel van RDF as bodemas wordt; het aandeel onverbrand in het vliegias is gelijk aan dat voor houtvergassing.
- Stikstofverbruik is brandstofonafhankelijk en gelijk aan 100% houtvergassing.

Gaskoelervervuiling:

- Deze is beperkt door de lagere vergassertemperatuur (max. 750°C); hiermee kan 15 tot 20 gew.% RDF meegestookt worden.
- Percentages RDF groter dan 20 gew.% veroorzaken ook bij de verlaagde vergassertemperatuur een versnelde gaskoelervervuiling, voornamelijk veroorzaakt door het hogere (vlieg)as gehalte van het geproduceerde gas. Hiervoor is een (grotere) gaskoelerm modificatie nodig (verwijderen van een deel van de VO-bundels om een grotere doortocht te creëren).
- De gastemperatuur na de gaskoeler blijft laag, op ongeveer 400°C, wat lager is dan bij houtvergassing, ondanks de vervuiling en mede dankzij de lagere vergassertemperatuur.

Dubbeltcycloon (bij 40 gew.% RDF):

- Het totale aanbod van vliegias (totale vliegas hoeveelheid in het geproduceerde gas) is hoger dan bij houtvergassing.
- Vliegiasafvoer is gelijk aan die bij houtvergassing.
- De hoeveelheid vliegias/stof in het gas naar Amer 9 is hoger dan bij houtvergassing (zie resultaten ECN metingen bij gassamenstelling).
- Uit de laatste twee punten blijkt dus dat afscheidingspercentage van de dubbeltcycloon lager is dan bij hout en ongeveer 50% bedraagt.

Gassamenstelling:

Op 13 maart 2014 heeft ECN diverse metingen uitgevoerd (bij 40 gew.% RDF meestook); hieronder puntsgewijs een aantal belangrijke resultaten.

- Stof gehalte: 36,7 g/Nm³ (droog) = 23,2 g/Nm³ (nat); dit is hoger dan bij 100% houtvergassing.
- Stookwaarde (o.b.v. gasanalyse): 5,6 MJ/Nm³ (droog, excl. C in stof) = 4,3 MJ/Nm³ (nat, incl. C in stof), dit is ruim 10% hoger dan bij 100% houtvergassing..
- Zware metalengehalte:
 - In 2006 is door VROM in de Circulaire 'Gereinigd gas uit B-hout' het kwaliteitscriterium voor het gereinigde gas vastgelegd. Daarin is dit kwaliteitscriterium als volgt geformuleerd: 'De concentratie aan zware metalen (som van As+Co+Cr+Cu+Mn+Ni+Pb+Sb+V) bedraagt maximaal 30 mg/MJ. Deze som van de zware metalen is genormeerd op de totale energie-inhoud van de brandstof.
 - Ook tijdens de RDF test/ECN metingen is deze som van zware metalen bepaald bij 40% RDF meestook. Dit zware metalen gehalte komt onder de 20 mg/MJ uit, specifiek op 13 maart: 19,3 mg/MJ.

Vervolg:

Globaal worden de volgende vervolgstappen voorzien:

- Optimaliseren van de brandstoflogistiek.
- Gaskoeler – modificatie – VO bundels van bovenste verdamper verwijderen.
- Bodemasafvoer – capaciteit vergroten.
- Parameterinstellingen in regelingen/software wijzigingen bij hoge(re) RDF percentages.

5.5.3 WP 3 Koelen + stofverwijdering

Uit de door HoSt uitgevoerde inventarisatie van bestaande kennis en ervaring komen de volgende belangrijkste punten naar voren:

Gaskoeling:

- In een drietal installaties van HoSt op relatief kleine schaal (3-5 MW_{th}) is de technologie bewezen betreffende afkoeling van syngas tot een temperatuur van 450–550 °C met behulp van een gas/lucht koeler (pijp in pijp), voor diverse brandstofsoorten. Positieve langdurige resultaten zijn hierbij bereikt voor de brandstoffen kippenmest en zonnebloemvliesjes. Tevens zijn positieve resultaten bereikt in kortere meerdaagse testcampagnes met brandstoffen als RDF en beendermeel. Het koelerconcept is vanwege start/stop bedrijf in de gerealiseerde

installaties nog niet volledig bewezen in volcontinu bedrijf (8000 uur/jaar). Ervaringen geven echter veel vertrouwen dat ook dit realiseerbaar is (er is geen vervuiling of verminderde warmteoverdracht in de tijd geconstateerd). Gezien het relatief lage teer dauwpunt, dat wordt gerealiseerd bij vergassing van kippenmest, zijn de langdurige positieve ervaringen ten aanzien van koelervervuiling met deze brandstof wellicht wat minder relevant.

- In diverse installaties van leverancier Foster Wheeler wordt een syngas/lucht koeler (eveneens pijp in pijp) succesvol toegepast voor afkoeling van het syngas tot een temperatuur van circa 650-750 °C, voor een reeks brandstoffen (RDF, afvalhout, industrieel afval).
- In de vergassingsinstallatie in Geertruidenberg worden serieuze problemen ondervonden met vervuiling van de gaskoeler welke is uitgevoerd als stoomketel (met diverse pijpenbundels in de gasstroom). Het lijkt er momenteel wel op dat de koeler verkeerd is ontworpen/gedimensioneerd en dat de keuze van een lagere vergassingstemperatuur de problemen kan reduceren.
- Door Metso is in Lahti een stralingskoeler toegepast bestaande uit gladde pijp/membraanwanden voor productie van heet water op een druk van 160 bara (met RDF als brandstof). Het syngas wordt hierbij afgekoeld tot een temperatuur van circa 400 °C. Uit communicatie met betrokkenen bij dit project, komt naar voren dat ook hier vervuiling van de koeler plaatsvindt en on-line/off-line reiniging benodigd is, maar dat deze problematiek niet in de weg staat, dat de installatie momenteel reeds circa 7000 uren per jaar wordt bedreven.
- Voor testen met een 5% zijstroom van de 80 MW_{th} Lahti (1) vergasser en de 3 MW_{th} proefinstallatie van Foster Wheeler, worden positieve resultaten gepresenteerd door de leverancier en VTT, voor afkoeling van syngas tot 350-450 °C met behulp van watergekoelde pijpenbundels (temperatuur onbekend). De temperatuur van het water werd hierbij dusdanig hoog ingesteld dat teercondensatie werd vermeden. Reiniging vond plaats met behulp van 'spring hammers'. De brandstoffen bij deze testen betroffen RDF, afvalhout met RDF en stro.

Stofafvangst:

- In de installaties van HoSt is stofafvangst met behulp van cyclonen na een afkoeling tot 450-550 °C succesvol gedemonstreerd voor de brandstoffen kippenmest en zonnebloemvliesjes en gedurende kortere testcampagnes met andere brandstoffen. Het afvangst rendement is afhankelijk van de brandstofsoort beperkt tot 85- 95%. Het vermoeden bestaat dat de meeste alkali metalen met het stof worden verwijderd, dit is echter nog niet met metingen onderbouwd.
- In Geertruidenberg is stofafvangst met behulp van cyclonen op een temperatuur van 300-500 °C succesvol aangetoond.
- In testinstallaties van VTT en in een zijstroom van Lahti zijn succesvol testen uitgevoerd met stofafvangst van syngas met behulp van hoge temperatuur filters, gekoppeld aan additieveninjectie. Bijna volledig worden verwijderd: chloor, alkali, metalen (behalve onder andere Hg).
- Eerste ervaringen met de 160 MW_{th} installatie van Metso in Lahti geven vertrouwen in het concept van stofafvangst met hoge temperatuur filters op een temperatuur van circa 400 °C, bij toepassing van de brandstof RDF. Uit ervaringen met deze installatie komt naar voren dat met name in/uit bedrijfsname op dit moment nog problematisch is (verbranding van koolstof), waarbij verdere optimalisatie benodigd is.
- In de hoge druk CFB installatie in Varnamo zijn na slechte ervaringen met keramische filters (scheurvorming) uiteindelijk goede ervaringen opgedaan met een metaal filter bij een temperatuur van 350-400 °C (Ref. 10).

Keuze voor uit te werken concepten in WP 4 (september 2014):

In een gezamenlijke meeting in september 2014 zijn door de werkgroep de volgende concepten geselecteerd voor verdere uitwerking in WP 4:

Tabel 3. Uit te werken concepten voor MBM, paper rejects en RDF en stof afvangstopaties en koelers

Stofafvangst	MBM	Paper Rejects	RDF
Geen	A	A	-
Cycloon	C	A, B, C	-
Filter	-	C	B

KOELERS:

A – stookgas/lucht

B – Waterpijp convector

C – Waterpijp straling

B,C: heet water of verzadigde stoom

+ 1 MILENA concept, dus totaal nu 9 concepten

Deze keuze is gemaakt op basis van de volgende overwegingen:

- De grootste markt wordt vooralsnog gezien voor RDF achtige brandstoffen. Zowel HoSt als Essent zijn momenteel actief met concrete projecten, waarbij de inzet van een RDF type brandstof wordt overwogen (paper reject betreft een specifiek type RDF brandstof). Met deze achtergrond is besloten de meeste variaties in concepten te onderzoeken voor de brandstof paper rejects.
- Interessant is te weten of een installatie, waarbij stof uit syngas wordt verwijderd, voordelen biedt boven een concept, waarbij in het geheel geen stof wordt verwijderd.
- Indien een cycloon wordt toegepast dan zal vanwege een beperkt reinigingsrendement (60-90%) nog steeds een hoeveelheid stof aan de ketel worden toegevoerd. Naast de investeringskosten voor de stofverwijdering/opslag/handling zal tevens het energetisch rendement van de installatie afnemen.
- Indien een keramisch filter wordt toegepast, dan kan vrijwel alle stof uit het syngas worden verwijderd en zullen tevens chloor (met additieve injectie), diverse metalen en alkali metalen uit het syngas kunnen worden verwijderd. Verwijdering van chloor biedt ook weer mogelijkheden om een hogere stoomtemperatuur te selecteren, met als gevolg een hoger stoomcyclus rendement.
- Beide reinigingstechnieken zullen resulteren in een verschillend concept ten aanzien van investeringskosten, operationele kosten en elektrisch rendement. Tevens is van belang dat verwijdering van stof met een cycloon als commerciële technologie kan worden beschouwd welke met zekerheid kan worden toegepast. Verwijdering van stof met behulp van een keramisch filter lijkt zich momenteel nog in een laatste fase van ontwikkeling te bevinden.
- Ten aanzien van de concepten voor gaskoeling geldt dat een uitgebreide vergelijking van deze concepten uitgevoerd zal worden voor slechts 1 situatie (paper rejects, stofverwijdering met cycloon), ten einde het aantal concepten te beperken. De algemene conclusies uit deze evaluatie zullen in grote lijnen ook geldig zijn voor de overige concepten. Tevens is besloten dat bij toepassing van convector/straling koelers zal worden uitgegaan van productie van heet water of verzadigde stoom (te bepalen door NEM, afhankelijk van het ontwerp van de stoomcyclus en ketel). Een gas/lucht koeler zal worden ingezet bij de concepten zonder stofafvangst, omdat in deze situatie het syngas minder ver (of niet) moet worden afgekoeld, zodat ook de dimensies van deze koelers beperkt kunnen blijven.

- Voor de brandstof MBM is besloten een vergelijking te maken met de brandstof paper rejects voor slechts 2 kansrijke en commercieel beschikbare concepten: een concept zonder stofafvangst en een concept met stofafvangst in een cycloon.

Keuze voor uit te werken concepten in WP 5 (januari 2015):

Voor het maken van een procesontwerp is ook een parametertabel gemaakt, welke aangeeft welke parameters belangrijk zijn voor het ontwerp. In appendix A, is de parametertabel weergegeven.

In een gezamenlijke vergadering in januari 2015 zijn door NEM de resultaten gepresenteerd van het ketelontwerp voor de verschillende geselecteerde concepten. Uit de evaluatie komt onder andere naar voren dat het ketelontwerp voor een concept, waarbij stof wordt verwijderd met cyclonen niet veel anders wordt dan een concept, waarbij in het geheel geen reiniging plaats vindt.

Om deze redenen is besloten voor WP 5 de opties met cycloon niet verder te evalueren. Om toch een vergelijking te kunnen maken wat betreft de verschillende koelopties, is er voor gekozen om deze koelopties te beschouwen in combinatie met het filter. Tevens is na uitgebreide discussie besloten ook een evaluatie te maken van een convectieve gaskoeler uitgevoerd als stoomoververhitter. In dit geval zal (beter) voorkomen worden dat de koeler vervuild raakt en kunnen tevens hogere stoomcondities worden gerealiseerd. Door NEM zal worden bekeken of een dergelijke oververhitter niet te groot zal worden.

De gekozen concepten voor uitwerking in WP 5 zijn samengevat in Tabel 4.

Tabel 4. Gekozen concepten voor uitwerking in WP 5.

Stofafvangst	MBM	Paper Rejects	RDF
Geen	A	A	-
Cycloon	-	-	-
Filter	-	A, B, C	B

KOELERS:

A – stookgas/lucht

B – Waterpijp convectie (oververhitting of verdamper)

C – Waterpijp straling

+ 1 MILENA concept, dus totaal nu 9 concepten

Gedetailleerde gassamenstelling na koeling en stofafvangst + opgave massa en energiebalans:

De geproduceerde data uit WP 1 en de inzichten uit WP 2 wat betreft koeling en stofafvangst zullen gebruikt worden om voor drie geselecteerde brandstoffen een gedetailleerde gassamenstelling op te geven voor de ketel, zodat op basis van deze samenstelling het verdere systeem ontworpen kan worden.

5.5.4 WP 4 Ketelconfiguratie

In WP 3 zijn de concepten geselecteerd welke verder worden uitgewerkt in WP 4.

Ontwerp overwegingen:

Voor de ketel en de daarop volgende rookgasreiniging zijn twee basisontwerpen gemaakt: een voor de cases zonder keramisch filter en een voor de cases met een keramisch filter.

Proces ontwerp voor cases zonder filter:

Het stookgas, dat niet is gereinigd, is rijk aan stof (koolstof en as) en allerlei schadelijke componenten, zoals chloor. Door deze samenstelling zijn er een groot aantal ontwerpkeuzes gemaakt, welke van belang zijn voor een robuust ontwerp met een lange levensduur van de installatie.

Ketelontwerp:

De potentiële problemen, die een rol spelen in het ketelontwerp zijn:

- Hoge temperatuur corrosie door hoge concentraties van chloorhoudende componenten in het gas
- Hoge slijtage van keteldelen door schurende werking van het stof in het gas.
- Vervuiling van de vuurhaard en de drukdelen door stof, alkali componenten en het hoge chloorgehalte.
- Lage temperatuur corrosie door condensatie van zwavelzuur op de economizer.

Het probleem van hoge temperatuur corrosie in ketels wordt hoofdzakelijk veroorzaakt door chlorides en alkali-chloride zouten. In de vuurhaard wordt corrosie hoofdzakelijk veroorzaakt door chloor. Corrosie van de oververhitterbundels wordt veroorzaakt door alkali zouten (alkali-chloride zouten) met een relatief laag smeltpunt. Door de stoomcondities aan te passen kan worden voorkomen dat er een plakkerige laag van ascomponenten op de verwarmde oppervlakken komt. Een lagere stoomdruk en temperatuur leiden tot een lagere metaalwandtemperatuur. Dit zorgt voor een kleinere kans op het kleven van ascomponenten op het verwarmde oppervlak. Daarnaast moet de rookgastemperatuur voldoende laag zijn, voordat het gas het convectieve deel van de ketel ingaat. Dit laatste maakt, dat de ascomponenten in het rookgas minder zullen kleven of zelfs een vaste vorm hebben.

De geselecteerde stoomdruk is 40 bar en de stoomtemperatuur is 400°C. Daarnaast is de vuurhaard zo groot gemaakt, dat de rookgassen met een temperatuur van ongeveer 650°C de oververhitter in gaan. Dit gaat hand in hand met de eis van 2 seconden verblijftijd boven 850°C in de vuurhaard ter voorkoming van de vorming van dioxines en furanen. Een eis die voortkomt uit de Industrial Emissions Directive (2010/75/EU).

Het rookgas verlaat de ketel met een temperatuur van 200°C. Dit heeft twee redenen:

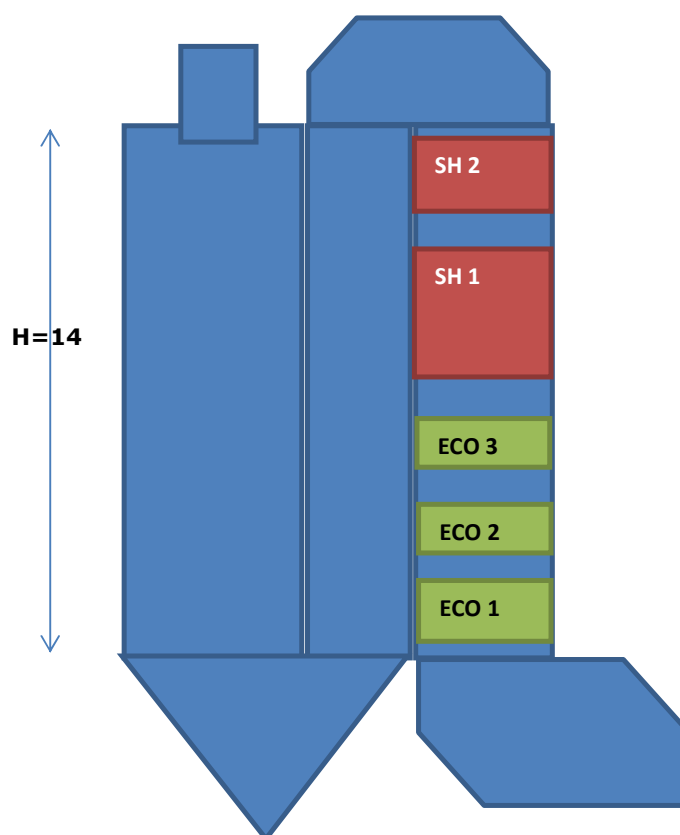
1. Voorkomen van condensatie van zwavelzuur op de economizer pijpen.
2. Een hogere temperatuur is wenselijk voor de NO_x verwijderingsinstallatie, die later in het proces wordt gebruikt.

Door de grote hoeveelheid stof in het gas, zijn enkele maatregelen nodig om problemen te voorkomen. Een van die maatregelen ligt in de brander, deze moet zo worden uitgelegd, dat er geen ruimtes zijn waar het stof kan ophopen. Daarnaast mag het gas niet in direct contact met koude oppervlakken komen. De teercomponenten kunnen op de koude oppervlakken condenseren, waardoor een kleverig oppervlak ontstaat. Dit kleverige oppervlak zal leiden tot de aangroei van stof, wat tot blokkades kan leiden. Dit is te bewerkstelligen door de lucht en het gas zolang mogelijk gescheiden te houden.

Een andere maatregel is het toepassen van gladde pijpen in de ketel met relatief grote tussenruimtes. Dit voorkomt de ophoping van stof en eventuele brugvorming tussen pijpen door het stof. Daarnaast is er een hopper nodig in de bodem van de ketel om stof af te kunnen voeren. Voor de verwijdering van vervuilingen van de ketelpijpen is een kogelregeninstallatie voorzien.

Een kogelregeninstallatie laat een grote hoeveelheid kleine kogeltjes door de ketel vallen. De kogeltjes worden samen met het as uit de ketel gehaald. De kogeltjes worden uit het as gezeefd en dan terug naar boven in de ketel geleid. Andere opties voor ketelreiniging zouden kunnen zijn: sonisch reinigen of schokreiniging (explosies). Kogelregen is geselecteerd, omdat dit een online methode is waarvan is bewezen dat deze goed werkt.

In Figuur 18 is een schets gegeven van de ketel voor verontreinigd gas.



Figuur 18. Schets van de ketel voor verontreinigd gas.

De ketel is uitgevoerd met 2 dakbranders. In de vuurhaard wordt het gas verbrand, waarna het rookgas wordt afgekoeld in een lege trek, waar het van beneden naar boven stroomt. Daarna komt het gas in het convectieve deel van de ketel. Hier stroomt het gas van boven naar beneden. Dit laatste is ook nodig vanwege de kogelregeninstallatie. Anders zouden de kogeltjes gefluidiseerd kunnen worden, wat de werking niet zou bevorderen. Aan de onderkant van de convectieve sectie verlaat het gas de ketel.

Rookgasreiniging:

De rookgassen, die de ketel verlaten bevatten kleine hoeveelheden HCl, SO_x en NO_x. Om aan de emissie-eisen van de Industrial Emission Directive (2010/75/EU) te voldoen, moeten de concentraties van deze componenten worden gereduceerd. Voor de verwijdering van HCl en SO_x wordt een ontzwavelingsinstallatie gebruikt en voor de verwijdering van NO_x wordt een Selectieve Katalytische Reductie (SCR) proces gebruikt. Eerst wordt het gas ontzwaveld en daarna wordt pas de NO_x verwijderd. Dit omdat het zwavel en het stof in het gas schadelijk zijn voor de katalysator van het SCR proces.

Ontzwaveling:

Ontzwaveling van rookgassen kan op verschillende manieren. Er zijn droge en natte methoden, elk met hun eigen voor- en nadelen. Door de hoge uitlaattemperatuur van de ketel zijn de natte methoden geen optie voor de ontzwaveling. Ook omdat deze hoge temperatuur moet worden behouden voor de later volgende SCR installatie.

Droge ontzwaveling gebeurt door het injecteren van poedervormige absorptiemiddelen in het rookgas en daarna het filteren van het rookgas met een doekenfilter installatie. Na het injectiepunt voor de absorptiemiddelen bevindt zich vaak een reactor, waar de absorptie wordt bevorderd. Het doekenfilter scheidt de absorptiemiddelen en het stof van het rookgas. Een deel van het afgescheiden vaste materiaal wordt hergebruikt als absorptiemiddel. Als absorptiemiddelen kunnen worden geselecteerd: natriumbicarbonaat of calciumhydroxide. Natriumbicarbonaat is beter geschikt voor de toepassing bij hogere temperaturen. Met deze methode worden zowel zwavel als chloor uit het rookgas verwijderd.

Naast natriumbicarbonaat wordt er ook wat actief kool geïnjecteerd om eventuele dioxines en/of furanen af te vangen.

SCR:

Na de ontwaveling wordt het rookgas opgewarmd tot 250°C in twee stappen. In de eerste stap wordt het rookgas opgewarmd in een kruisstroomwarmtewisselaar. Het verwarmende medium is het rookgas, dat de SCR installatie verlaat. Na deze warmtewisselaar wordt het rookgas verder opgewarmd met verzadigde stoom uit de stoomdrum. Als het rookgas 250°C is wordt er een kleine hoeveelheid ammonia ingespoten. Na een mengruimte wordt het rookgas door katalytische blokken geleid; hierin wordt NO_x omgezet in water en stikstof. Door deze installatie na de ontwaveling te plaatsen zullen er geen problemen optreden door katalysator de-activatie, omdat alle gevaarlijke componenten voor de katalysator al zijn verwijderd. Deze techniek is de meest effectieve methode voor de verwijdering van NO_x. Nadat het rookgas door de katalysatorblokken is gegaan, wordt het gekoeld in de kruisstroomwarmtewisselaar.

De rookgassen worden gekoeld door er condensaatwater mee op te warmen. Met behulp van een zuig en trek ventilator wordt het rookgas naar de schoorsteen geleid. De zuig en trek ventilator zorgt ervoor dat de ketel opereert op onderdruk. Het balanspunt ligt in de vuurhaard van de ketel.

Andere componenten:

Stoom geproduceerd in de ketel (40 bar, 400°C) wordt geëxpandeerd in de stoomturbine. De stoomturbine heeft een aftap. De aftap wordt gebruikt voor stoom naar de ontluchter. Verzadigde stoom verlaat de stoomturbine op een temperatuur van 40°C (0.07385 bar). Een luchtgekoelde condensor wordt gebruikt om de stoom te condenseren. Het condensaat wordt opgewarmd met warmte uit rookgas alvorens het naar de ontluchter wordt geleid met behulp van een condensaat pomp. Na de ontluchter wordt het voedingswater met behulp van een voedingswaterpomp naar de ketel gepompt. In appendix B is het proces stromingsdiagram weergegeven.

Procesontwerp voor cases met keramisch filter:

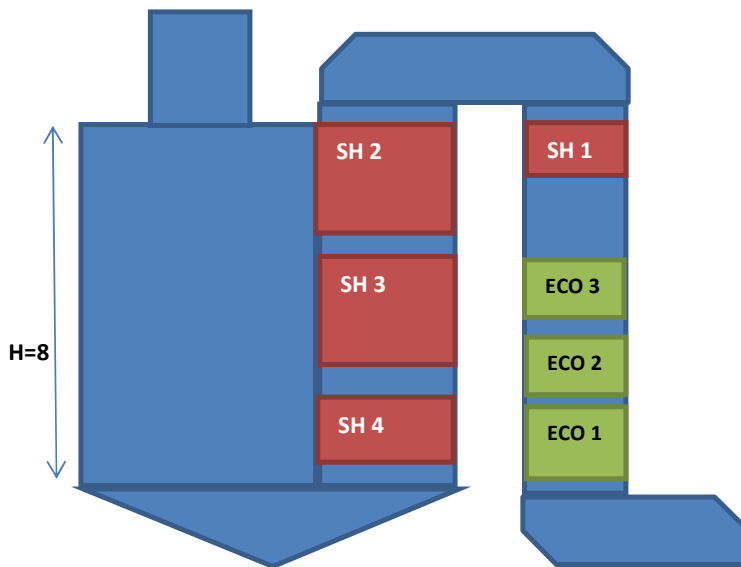
Het stookgas, dat eerst is gereinigd bevat heel weinig stof en ook het chloorgehalte is heel erg laag. Dit komt doordat er poedervormige absorptiemiddelen voor het filter zijn geïnjecteerd, welke chloor absorberen. Deze middelen zijn samen met het stof uit het gas verwijderd door het keramisch filter. Hierdoor kan het ketel ontwerp compacter worden dan voor het niet gereinigde gas. Ook de rookgasreiniging kan iets anders benaderd worden, waardoor er iets minder apparatuur nodig is. Het nadeel van het gereinigde gas is dat er geen koolstof in het gas aanwezig is, waardoor de warmte capaciteit lager uitvalt.

Ketelontwerp:

Door het schone stookgas is het mogelijk om de ketel erg compact te maken en om een hoge stoomdruk en temperatuur te produceren. De gekozen stoomdruk is 120 bar en stoomtemperatuur is 540°C. Hierdoor zal er meer elektriciteit kunnen worden geproduceerd. De vuurhaard zal wel moeten voldoen aan de verblijftijd van 2 seconden boven 850°C, vanwege de Industrial Emission Directive (2010/75/EU). Dit bepaalt de afmetingen van de vuurhaard. Waar mogelijk worden gevonde pijpen toegepast (SH1 en ECO's in Figuur 19). De afstand tussen de pijpen is kleiner dan bij de ketel voor niet gereinigd gas. In het temperatuurgebied rond de 400°C in de ketel wordt een SCR geplaatst. Bij deze temperatuur is een SCR het meest effectief en het meest compact. De SCR bestaat uit een ammonia-injectiegrid en katalysatorblokken. Ammonia wordt geïnjecteerd en na enige afstand volgen de katalysator blokken, waar de NO_x wordt omgezet in water en stikstof.

De rookgassen verlaten de ketel met een temperatuur van ongeveer 160°C. Dit laatste om boven de condensatietemperatuur van zwavelzuur te blijven. Deze temperatuur is ook ideaal voor de ontwaveling die na de ketel volgt. De ketel heeft geen reinigingsinstallatie nodig.

In Figuur 19 is een schets van de ketel gegeven.



Figuur 19. Schets van de ketel voor schoon stookgas

Ook deze ketel is uitgevoerd met twee dakbranders en het gas wordt verbrand in de vuurhaard. Daarna keert het gas om en gaat de eerste convectieve trek (?) in. Na deze trek gaat het gas de tweede convectieve trek in. Hier bevindt zich tussen de oververhitter en de economizer de SCR voor de verwijdering van NO_x . Het gekoelde rookgas verlaat deze trek aan de onderkant.

Rookgasreiniging:

Gelijk aan de cases zonder keramisch filter wordt het gas ontwaveld in een droge ontwavelingsinstallatie. Ook hier wordt gebruik gemaakt van natriumbicarbonaat als absorptiemiddel. Het enige verschil is dat de installatie opereert op 160°C in plaats van 200°C . Na de ontwavelingsinstallatie wordt het rookgas verder gekoeld door condensaat op te warmen. Daarna wordt het rookgas via een zuig en trek ventilator naar de schoorsteen geleid.

Andere componenten:

Stoom geproduceerd in de ketel (120 bar , 540°C) wordt geëxpandeerd in de stoomturbine. De stoomturbine heeft een aftap. De aftap wordt gebruikt voor stoom naar de ontluchter. Verzadigde stoom verlaat de stoomturbine op een temperatuur van 40°C (0.07385 bar). Een luchtgekoelde condensor wordt gebruikt om de stoom te condenseren. Het condensaat wordt opgewarmd met warmte uit rookgas alvorens het naar de ontluchter wordt geleid met behulp van een condensaatpomp. Na de ontluchter wordt het voedingswater met behulp van een voedingswaterpomp naar de ketel gepompt.

In appendix C en D zijn de processtromingsdiagrammen weergegeven voor respectievelijk de keramische filter cases en de MILENA case .

Massa en energiebalansen:

Voor de verschillende cases zijn ketelprestatietabellen gemaakt, welke zijn te vinden in appendix E en F. Op basis van deze tabellen zijn massa- en energiebalansen opgesteld voor de verschillende cases. Hiervoor is het computerprogramma Cycle-Tempo gebruikt. Dit computerprogramma is speciaal ontwikkeld door de Technische Universiteit Delft voor de evaluatie van thermische cycli. De stromingsschema's hiervan zijn gegeven in appendix G.

De consumptie van benodigde absorptiemiddelen is berekend op basis van de hoeveelheid van de componenten in het gas en de bijpassende stoichiometrie. Samen met de gegevens uit de flowsheets heeft dit geleid tot de lijsten voor in- en output gegeven in appendix H.

Stookgaskoelers:

Drie verschillende stookgaskoelers worden geëvalueerd in deze studie:

1. Gaskoeler, zoals geleverd door HoSt.
2. Stoom gevoede convectiekoeler.

3. Stralingskoeler.

Voor de convectiekoeler en de stralingskoeler zijn ontwerpen gemaakt.

Convectiekoeler:

Als alternatief voor een stookgaskoeler op basis van lucht of verdamping van water wordt een oververhitter onderzocht. Het voordeel is dat de teren vanwege de hogere temperaturen niet condenseren. Een probleem kan hoge temperatuur corrosie zijn.

Tabel 5. Stookgas eigenschappen.

	vol.%	gew.%			750°C	600°C	
CO	19.5	18.975		Warmtecapaciteit c _p	kJ/(kg.K)	1.59	1.52
H ₂	6.7	0.466		Dichtheid ρ	kg/m ³	0.035	0.393
CO ₂	5	7.646					
H ₂ O	11.1	6.944					
C _x H _y	4.6	15.987					
NH ₃	4.6	2.398					
N ₂	48.9	47.585					
H ₂ S/COS	0.06	0.07					

Tabel 6. Warme zijde: gas

debiet	ϕ_m	kg/s	12.8
Inlaattemperatuur	$T_{gas,in}$	°C	750
Uitlaattemperatuur	$T_{gas,uit}$	°C	588
Gemiddelde warmtecapaciteit	$c_{p,gas}$	kJ/(kg.K)	1.55
Warmte = $\phi_m * c_p * dT$	Q_{gas}	kW	3214

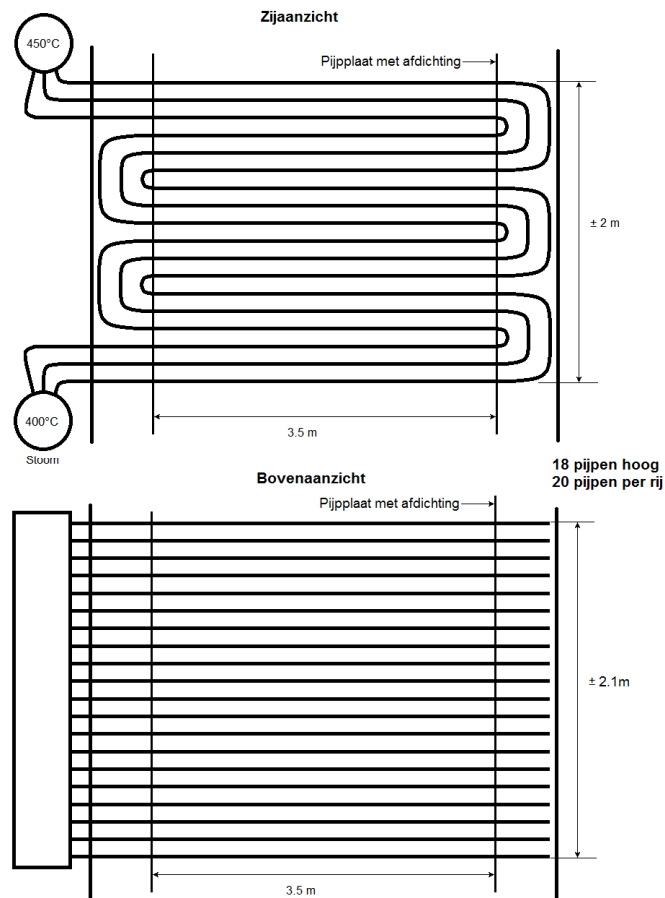
Tabel 7. Koude zijde: stoom

debiet	ϕ_m	kg/s	27
Inlaattemperatuur	$T_{gas,in}$	°C	400
Uitlaattemperatuur	$T_{gas,uit}$	°C	450
Gemiddelde warmte capaciteit	$c_{p,gas}$	kJ/(kg.K)	2.37
Warmte = $\phi_m * c_p * dT$	Q_{gas}	kW	-3196

Afmetingen:

Zie schets voor details (Figuur 20):

Gaspad lengte: 3.5 m
 Gaspad breedte: 2.1 m
 Minimaal benodigde hoogte: 2 m (afhankelijk van inspectie en eventuele reiniging)
 Gassnelheden om de pijpen: 12 m/s
 Pijpdiameter: 50.8 mm
 Inlijn opstelling
 Steek tussen de pijpen: 100 mm (vierkant)



Figuur 20. Schets convectiekoeler.

Materiaal:

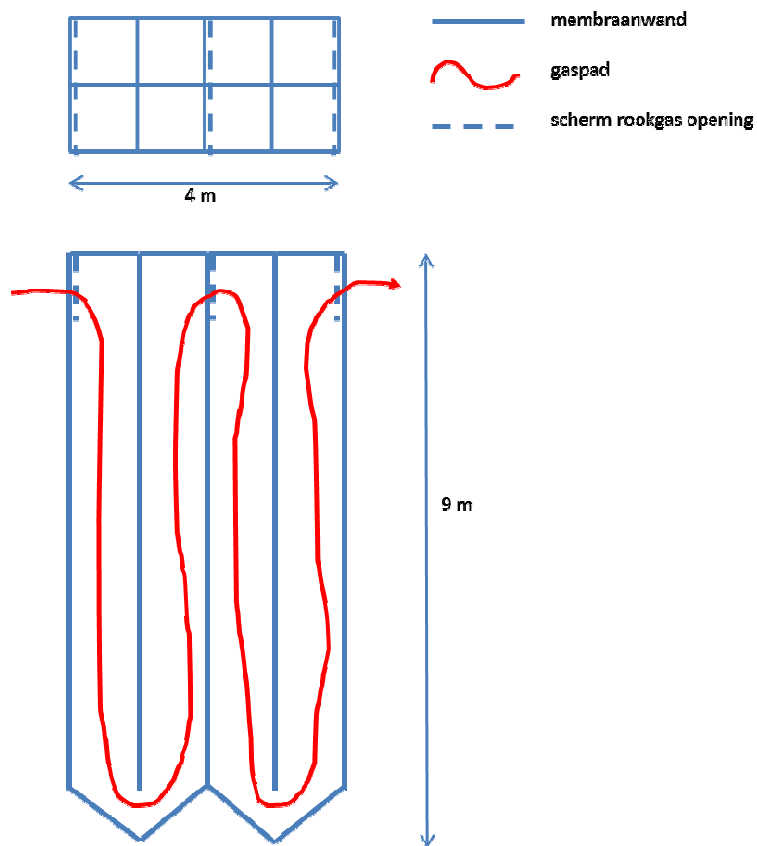
Aangezien er H_2S en COS in het stookgas zitten en sporen Cl in het as zitten kan dit hoge temperatuur corrosie opleveren. De in dit ontwerp uitgerekende wandtemperatuur van de pijpen is maximaal 480°C wat hogere corrosiesnelheden kan geven. Na een kort literatuuronderzoek zou het metaal Sanicro 28 geschikt kunnen zijn voor deze toepassing¹.

Stralingskoeler:

Een alternatief is een stralingskoeler (zie Figuur 21), die op de keteldruk bedreven wordt. De wandtemperaturen zullen ongeveer 250°C worden bij 40 bar stoomdruk, zodat vervuiling als gevolg van teercondensatie op gaat treden. Door de vrije ruimtes groot te kiezen wordt het effect van de vervuiling beperkt. De kans op vervuiling is het grootst bij stofhoudend gas. De gassnelheid in de koeler is 20 m/s en de wandtemperatuur is 265°C (bij een stoomdruk van 40 bar).

¹ In onderstaande link, staat een document, waarin toe te passen materialen zijn onderzocht ten aanzien van corrosie in een syngaskoeler achter een entrained flow vergasser.

http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=s1516-14392004000100009



Figuur 21. Schets stralingskoeler.

Nadeel van dit ontwerp is de noodzakelijke asafvoer. In de filter cases (stoomdruk 120 bar), wordt de stralingskoeler nog groter, doordat er een lagere gastemperatuur (400°C i.p.v. 600°C) gehaald moet worden. Hiervoor is nog een extra omkering nodig. Dit wordt veroorzaakt door de lage stralingswarmteoverdracht beneden de 600°C. De wandtemperatuur is echter hoger, waardoor vervuiling van de wanden minder zal zijn dan bij lagere stoomdruk.

Prijsbepaling:

Op basis van ervaring en het schalen van de benodigde apparaten, zijn prijzen bepaald voor de verschillende onderdelen van de installatie. Deze prijzen voor de te beschouwen cases zijn samengevat in Tabel 8. In **Error! Reference source not found.** zijn de te beschouwen cases (o.b.v. brandstof, stofafvangstkeuze en koelertechnologie) weergegeven. De weergegeven prijzen zijn op basis van turn-key. Alleen de balance of plant en de interconnectie tussen de verschillende onderdelen zijn in deze prijzen niet meegenomen.

Tabel 8. Prijzen voor de verschillen onderdelen in k€ op turn-key basis.

	Casus 1	Casus 2	Casus 3	Casus 4	Casus 5	Casus 6	Casus 7
Gaskoeler				75	200	75	
Gaskoeler (Sanicro 28)				280		280	
Ketel	13.000	13.000	11.500	11.500	11.500	11.500	11.500
Ontzwoeling	2.100	2.100	1.900	1.900	1.900	1.845	2.000
SCR	2.000	1.600	420	420	420	420	420
Stoomturbine generator	4.800	4.800	4.600	4.400	4.400	4.400	4.400
Lucht gekoelde condensor	2.650	2.600	2.400	2.400	2.400	2.400	2.300

Warmte productie:

Tijdens de economische evaluatie is er door de projectgroep besloten om ook warmteproductie mee te nemen in de economische evaluatie. Hierbij is er uitgegaan van stoom af te tappen bij 90°C welke wordt gekoeld tot 40°C. Hierdoor wordt er minder elektriciteit geproduceerd. Deze elektriciteitsderving is bepaald met behulp van een thermodynamische berekening, waaruit een verliesfactor is bepaald. Met deze factor zijn de warmte productie en elektriciteitsproductie bepaald.

5.5.5 WP 5 Economische evaluatie

In WP5 zijn de gegevens uit WP4 verwerkt in een economische evaluatie voor de geselecteerde cases.

Uitgangspunten:

Het aantal bedrijfsuren is geraamd op 6000 uur per jaar. De verwachting is dat de vergassingsinstallatie vaker uit bedrijf gaat voor onderhoud dan bijvoorbeeld een verbrandingsinstallatie. De kosten van de verschillende brandstoffen lopen uiteen. De kostprijs aan de poort van Meat and Bone Meal (MBM) wordt geraamd op 20 euro/ton. Het MBM is voor meer dan 95% organisch. Bij vergassing van MBM en warmtekrachtkoppeling komt dit concept in Nederland in aanmerking voor de SDE+ fase 3 subsidie. Paper rejects daarentegen kan worden ingekocht tegen een negatief tarief. Daar staat echter tegenover dat paper rejects uit ongeveer 50% organisch materiaal bestaat. Dit concept komt in Nederland hierdoor niet in aanmerking voor de SDE+ subsidie. Het tarief van paper rejects is erop gebaseerd dat het materiaal reeds is ontijzerd (ferro's en non-ferro's) en verkleind. De investering voor de voorbewerking is daarom niet meegenomen. RDF heeft geen waarde en komt eveneens niet in aanmerking voor de SDE+ subsidie.

De vergassingsinstallatie valt in de categorie van de Thermische conversie WKK - biomassa >10 MW_e en ≤100 MW_e. De SDE+ subsidie van 0,084 €/MWh is gebaseerd op fase 3 en is gecorrigeerd met 0,023 €/MWh, het voorlopige correctiebedrag voor 2015. De tarieven voor de verbruiksmiddelen zijn gebaseerd op indicaties op basis van de ervaringen van RWE Essent en HoSt.

De tarieven voor verschillende typen as lopen sterk uiteen. Het bodemas uit de vergasser bestaat voor een groot deel uit zand en schone as. Dit materiaal zou als bouw materiaal gebruikt kunnen worden. Ook as zonder koolstof kan eenvoudig verwerkt worden. Echter als het as koolstof bevat stijgen de tarieven voor de verwerking. Verwerkingskosten voor het as met gereageerd bicarbonaat en actief kool zijn het hoogst; hiervoor zijn geen afzetmogelijkheden en het kan alleen gestort worden in de mijnen. In Tabel 9 zijn de afvoerkosten voor verschillende typen as weergegeven.

Tabel 9. Afvoerkosten voor verschillende typen as.

Afvoerkosten		
Bodemas uit vergasser (kan als bouw materiaal gebruikt worden)	€/ton	30
As zonder koolstof	€/ton	30
As met koolstof	€/ton	150
As met gereageerd bicarbonaat en actief kool	€/ton	200

Investeringsraming:

Voor de verschillende componenten zijn investeringsramingen gemaakt. De ramingen zijn gebaseerd op engineeringopdrachten voor vergassingsinstallaties. Tevens is een leverancier voor een keramisch filter benaderd. NEM heeft de investeringsraming voor de koeler, ketel, ontwaveling, filter en denox. bepaald. De investeringen voor E&I, plant control, Balance of Plant, Civiel en Project management (PM), engineering en bouwbegeleiding zijn geraamd op basis van percentages uit ervaring met eerder gebouwde projecten.

De investeringen voor de verschillende concepten variëren van 59,7 miljoen euro tot 68,7 miljoen euro. De investering voor de concepten met stofverwijdering voor het filter zijn hoger door de investering van het keramisch filter van 9,5 miljoen euro. De investering van de Milena vergasser is ongeveer 20% hoger, doordat een combustor is geïntegreerd en er een extra rookgaskoeler en doekenfilter nodig zijn. De investering voor de stookgaskoeler en het keramisch filter zijn voor de MILENA juist weer lager, omdat het stookgasdebiet lager is. In de cases 1 en 2 zijn de investeringen voor de ketel en de stoomcyclus hoger dan bij de cases 3, 4, 5, 6 en 7. In deze cases is het stoomdebiet hoger vanwege de lagere stoomdruk (40 bar ten opzichte van 120 bar). Hierdoor is de investering van de ketel en de stoomcyclus hoger. Tevens zijn bij de cases 1 en 2 de rookgasreiniging met een 1-veld elektrostatisch filter (ESP) uitgebreid. Hierdoor kan schoon vlieggas uit de ketel afgevoerd worden met een storttarief van 30 €/ton in plaats van het storttarief van vlieggas met gereageerd bicarbonaat van 200 €/ton.

Kosten- en batenanalyse:

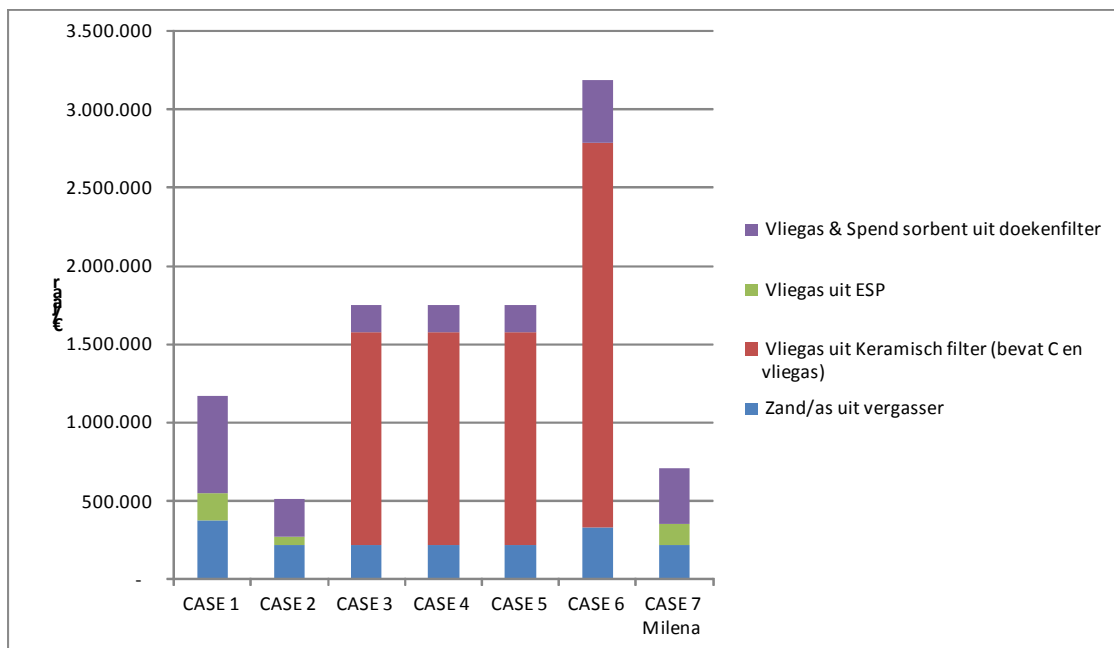
De hoeveelheid zand/as is afhankelijk van de hoeveelheid as uit de te vergassen brandstof. MBM en RDF bevatten meer as dan paper rejects (Tabel 10).

Tabel 10. As en C-gehalte van MBM, paper rejects en RDF.

		MBM	paper rejects	RDF
As	gew.% droog	24,6	12,6	20,5
C	gew.% daf	54,9	63,1	60,2
Koolstofconversie	%	95,0	98,0	96,0

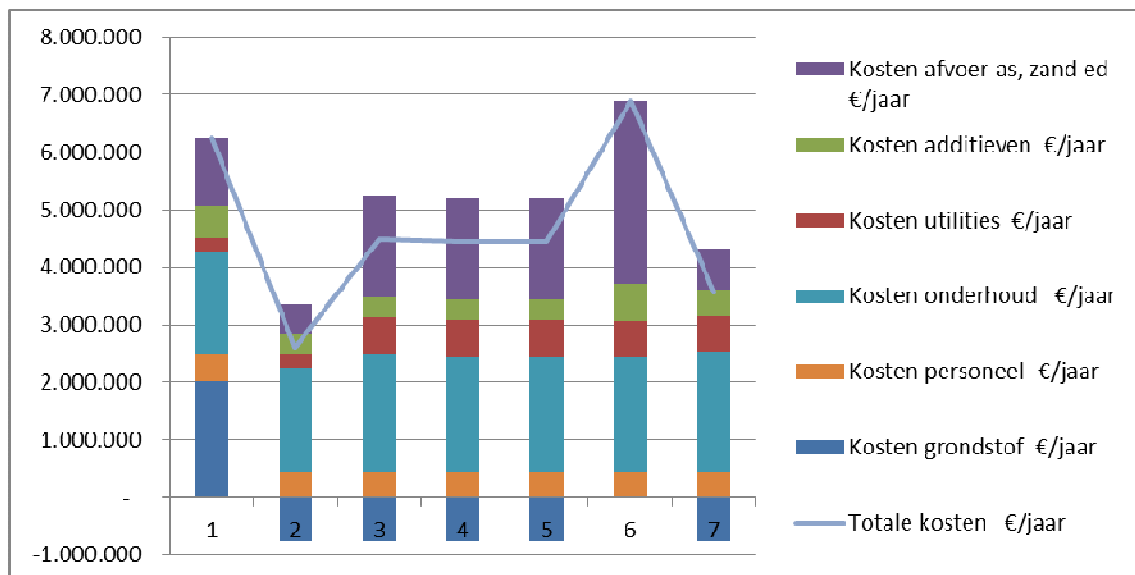
In de cases 1, 2 en 7 wordt geen as met koolstof geproduceerd, maar alle as en koolstof worden in de ketel verbrand of in de combustor (casus 7 Milena). Het as uit de ketel wordt eerst door een elektrostatisch filter (ESP) afgevangen. Vervolgens wordt actief kool en bicarbonaat toegevoerd om de schadelijke componenten te binden. Dit as en het gereageerde actief kool en bicarbonaat (spent sorbent) wordt afgevangen in een doekenfilter. De verschillen in kosten komen voort uit de verschillende asgehaltes van de verschillende brandstoffen en van de geproduceerde hoeveelheden verontreinigingen, waarvoor actief kool en bicarbonaat gebruikt worden.

In de cases 3, 4, 5 en 6 bevat het vlieggas uit het keramisch filter koolstof. Hierdoor zijn de storkosten hoger dan voor de storkosten van vlieggas zonder koolstof. Het storttarief voor as met koolstof is 150 €/ton ten opzichte van 30 €/ton voor vlieggas zonder koolstof. De storkosten voor vlieggas zijn in de cases 3, 4 en 5 hetzelfde. In deze cases wordt een ander type koeler toegepast, hetgeen geen invloed heeft op de as-debieten.



Figuur 22. Stortkosten van de verschillende vliegassen van de cases 1 t/m 7.

Uit Figuur 22 komen de volgende verschillen naar voren, bij de toepassing van een keramisch filter zijn de storkosten van vliegass hoger door het aandeel koolstof en het hogere storttarief. Het verschil in storkosten tussen de cases 1 en 2 komt voort uit het hogere asgehalte van de MBM (24,6%) ten opzichte van paper rejects (12,6 gew.%). Het verschil in storkosten tussen casus 3 (paper rejects) en casus 6 (RDF) komt voort uit het hogere asgehalte voor RDF en de lagere koolstofconversie bij vergassing van RDF. Daarnaast worden operationele kosten met name bepaald door de brandstofeigenschappen, zoals de waarde van de brandstof, het asgehalte en de verontreinigingen. In appendix I zijn de hoeveelheden en kosten voor utilities, grondstof, personeel, onderhoud, additieven en afvoer as en zand weergegeven. In Figuur 23 zijn de operationele kosten samengevat weergegeven.



Figuur 23. Operationele kosten van de cases 1 t/m 7.

Opbrengsten elektriciteit en warmte:

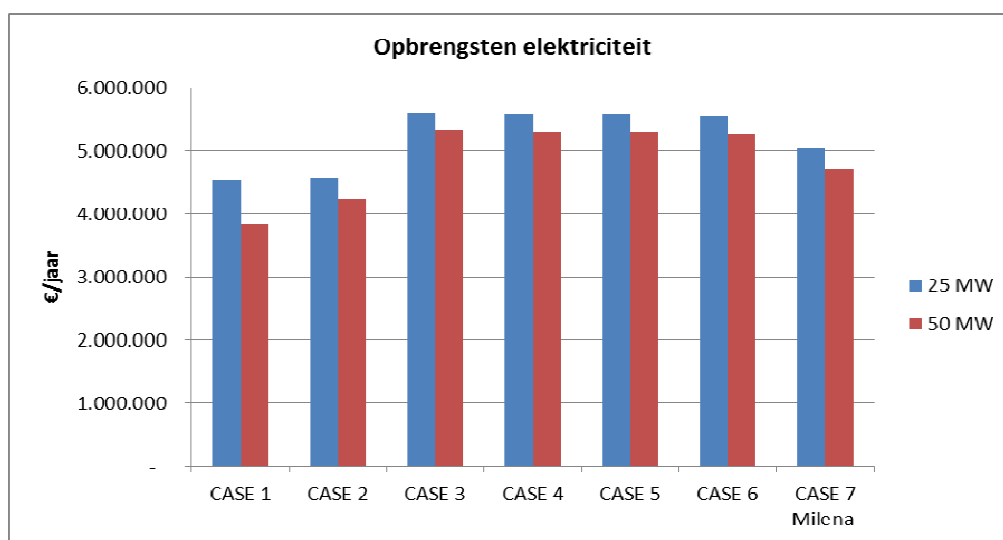
De elektriciteitsproductie is bij drie verschillende warmteproducties bepaald. Bij 100% elektriciteitsproductie wordt de stoom volledig geëxpandeerd en wordt alle warmte weggekoeld door luchtgekoelde condensoren. Bij elektriciteitsproductie bij 100% warmtelevering wordt de stoom

geëxpandeerd naar 0,8 bara en wordt de warmte afgezet op een temperatuur van 90°C. Bij een lagere warmtevraag wordt de stoom verder geëxpandeerd en wordt de overige warmte weggekoeld door een luchtgekoelde condensor. Daarnaast is ook de mogelijkheid bekeken, waarbij niet de volledig beschikbare warmte geleverd wordt, maar beperkt wordt tot 25 MW_{th}. Hiervoor wordt een deel van de stoom afgetapt bij 0,8 bara en wordt de resterende stoom verder geëxpandeerd. Voor de MILENA casus is de ketelberekening gebaseerd op een productie van 25 MW_{th} aan warmte. De 6 MW_{th} warmte, die beschikbaar is uit het rookgas van de MILENA, is buiten beschouwing gelaten en dus niet meegenomen in de economische evaluatie. Indien de 6 MW_{th} wel opgenomen zou worden in de levering van 25 MW_{th} aan warmte zou de ketelberekening wijzigen, zodat er meer elektriciteit opgewekt kan worden bij een levering van 19 MW_{th} warmte uit de ketel (plus 6 MW_{th} uit MILENA maakt 25 MW_{th} in totaal). Dit zou de terugverdientijd wat verkorten. De resultaten zijn weergegeven in Tabel 11.

Tabel 11. Elektriciteitsproductie bij verschillende warmtevragen.

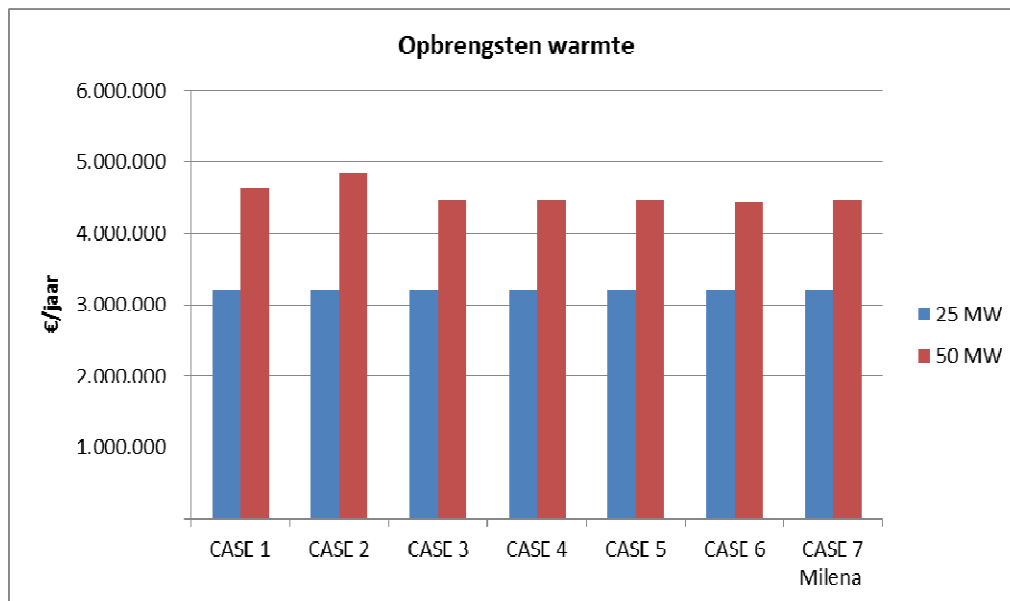
		Casus 1	Casus 2	Casus 3	Casus 4	Casus 5	Casus 6	Casus 7
		MBM	PR droog	PR droog	PR droog	PR droog	RDF droog	PR droog
100% Elektriciteitopwekking	kW _e	22.311	21.694	25.766	25.747	25.747	25.539	23.081
Elektriciteitopwekking bij 100% warmtelevering	kW _e	11.906	14.389	18.685	18.671	18.671	18.521	16.738
100% Warmtelevering @ 90°C	kW _{th}	54.397	56.823	52.425	52.369	52.369	52.036	52.524
Elektriciteitopwekking bij 25 MW _{th} warmtelevering	kW _e	18.859	18.480	22.389	22.369	22.369	22.167	20.490
25 MW _{th} Warmtelevering @ 90°C	kW _{th}	25.000	25.000	25.000	25.000	25.000	25.000	25.000

Uit de resultaten blijkt dat in de cases 3, 4, 5, en 6 de elektriciteitsproductie 3,4 MW_e hoger is, dan bij cases 1 en 2. Dit is ook de verwachting aangezien de stoomdruk en temperatuur in deze cases hoger ligt. Een deel van deze hogere elektriciteitsproductie wordt teniet gedaan door het koolstofverlies van 10 MW_{th}. In casus 7 MILENA komt een deel van de warmte vrij in de rookgassen. Deze warmte wordt niet in stoom omgezet. Hierdoor is de elektriciteitsproductie 2,5 MW_e lager. De elektriciteitsopbrengsten zijn lager bij een hogere warmtevraag (Figuur 24).



Figuur 24. Elektriciteitsopbrengsten bij 25 of 50 MW_{th} van de cases 1 t/m 7.

Afhankelijk van de warmtevraag van de warmteafnemers is een schatting gemaakt voor het aantal vollasturen waarop de warmte geleverd kan worden. Bij een warmtevraag van 52 MW_{th} is gerekend met 3000 vollasturen. Bij een warmtevraag van 25 MW_{th} is gerekend met 4500 vollasturen.

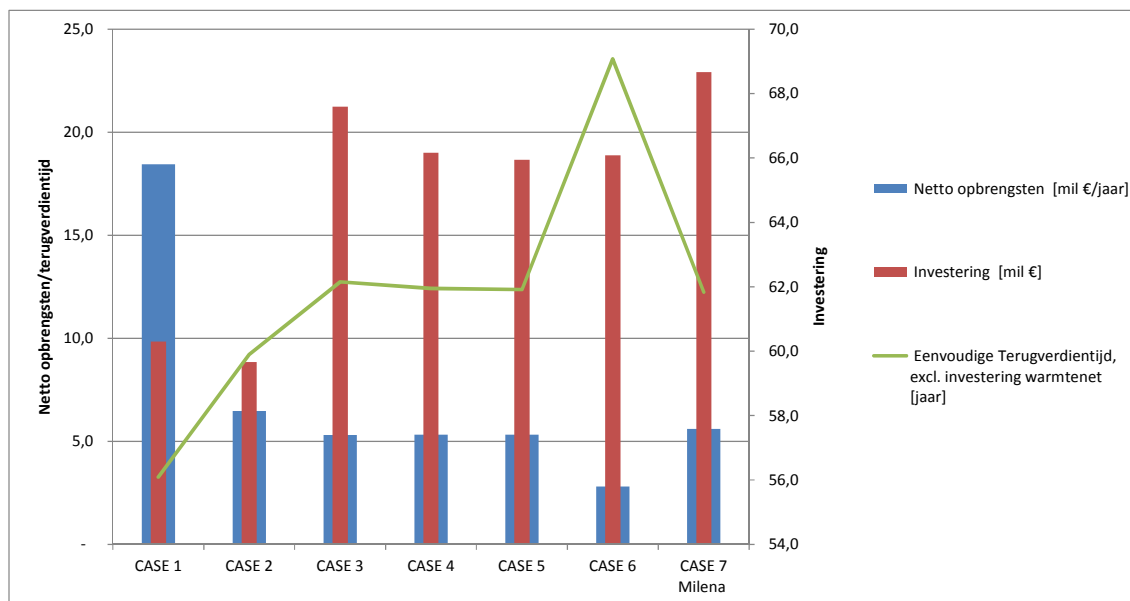


Figuur 25. Opbrengsten warmte bij 25 of 50 MW_{th} van cases 1 t/m 7.

Uit Figuur 25 komt naar voren dat warmtelevering van 50 MW_{th} gunstiger is dan 25 MW_{th} ondanks dat bij 25 MW_{th} meer vollasturen warmte geleverd kan worden.

Terugverdientijd:

De bedragen voor de netto opbrengsten, investeringen en de terugverdientijd zijn gevisualiseerd in Figuur 26.



Figuur 26. Overzicht netto opbrengsten, investeringsbedrag en terugverdientijd voor 50MW_{th}.

Op basis van de economische haalbaarheid kan het volgende geconcludeerd worden:

De terugverdientijd wordt, naast de keuze van technologie, bepaald door:

- Vlieg- en koolstofverwijdering voor de ketel
- Type koeler
- Kosten voor brandstof
- Subsidies
- Asgehalte

- Verontreinigingen in de brandstof.

Vlieggas en koolstofverwijdering voor de ketel:

Er kan geconcludeerd worden dat de stofafvangst van het vlieggas en koolstof voor de ketel niet gunstig is voor de terugverdientijd. De investering in een keramisch filter, het hoge stikstofdebiet voor het reinigen van het filter, de hogere storkosten door afzet van as met koolstof en het verlies in koolstofconversie wegen niet op tegen de hogere opbrengsten van de elektriciteitsproductie bij 120 bar en 540°C. De terugverdientijd van casus 2 (geen vlieggas- en koolstofverwijdering voor de ketel) is 9,2 jaar tegenover een terugverdientijd van 12,7 jaar voor casus 3 (toepassing van een keramisch filter).

Type koeler:

In

Tabel 12 zijn de verschillen bij toepassing van de verschillende koelers weergegeven. Hieruit blijkt dat er geen grote verschillen tussen de toepassing van de verschillende koelers zijn. De investering voor een conventionele gas/lucht koeler is hoger, waardoor de terugverdientijd langer is. De keuze voor het type koeler zal afhangen van de betrouwbaarheid van de koeler. De verwachting is dat toepassing van een gas/lucht koeler minder risico's van teercondensatie met zich meebrengt. Hierdoor zal de installatie minder vaak uit bedrijf gaan en zal het verschil in terugverdientijd waarschijnlijk kleiner zijn, doordat er meer draaiuren gemaakt kunnen worden.

Tabel 12. Eenvoudige terugverdientijd bij toepassing van verschillende typen koelers.

Type koeler		Casus 3 Lucht/gaskoeler	Casus 4 convectiekoeler	Casus 5 stralingskoeler
Eigen elektrisch verbruik	kW _e	2.513	2.563	2.563
Stoomdebiet	t/h	88	88	88
Elektriciteitopwekking 100% E	kW _e	25.766	25.747	25.747
Elektriciteitopwekking bij 100% warmtelevering	kW _e	18.685	18.671	18.671
100% Warmtelevering @ 90°C	kW _{th}	52.425	52.369	52.369
Aardgasbesparing	Nm ³ /h	5.963	5.957	5.957
Onderhoudskosten	€/jaar	2.027.700	1.984.800	1.978.200
Elektriciteitsopbrengsten "Grijs" tarief	€/jaar	6.000.885	5.996.430	5.996.430
Elektrische kosten eigen verbruik	€/jaar	-678.510	-692.010	-692.010
Warmte opbrengsten o.b.v. NMDA	€/jaar	4.472.275	4.467.498	4.467.498
Netto opbrengsten	€/jaar	5.307.392	5.327.590	5.334.190
Investering	€	67.590.000	66.160.000	65.940.000
Eenvoudige terugverdientijd, excl. investering warmtenet	jaar	12,74	12,42	12,36

Kosten voor brandstof:

De brandstof MBM heeft een kostenpost van 2 miljoen euro, terwijl voor het verwerken van paper rejets opbrengsten gegenereerd worden van 0,75 miljoen. RDF heeft geen waarde.

Subsidies:

Bij het verwerken van een brandstof, waarbij het aandeel biomassa groter is dan 95%, kan in Nederland SDE+ subsidie aangevraagd worden. Voor het vergassen van MBM kan hiervoor subsidie worden verkregen. Doordat zowel warmte als elektriciteit geleverd worden, is het subsidietarief gunstig. Hierdoor is de terugverdientijd 3,3 jaar bij 50 MW_{th} warmtelevering. Indien de subsidie zou wegvallen, stijgt de terugverdientijd (met of tot) 27 jaar. Het effect van deze SDE+ fase 3 subsidie is enorm.

Tabel 13. Subsidie SDE+ bij MBM.

Warmtevraag		25 MW _{th}	50 MW _{th}
SDE + 2015	€/jaar	14.080.752	16.216.342

5.5.6 WP 6 Projectleiding en kennisdisseminatie

De resultaten van het project zijn op verschillende manieren gedissemineerd via conferenties en via spin-out van de resultaten in de dagelijkse bedrijfsvoering van de partners:

- In oktober 2014 heeft RWE Essent een presentatie gegeven op een conferentie bij het Swedish Gas Technology Center met als titel: *Amer Gasifier: Process redesign, operational results and developments for alternative fuels*. In deze presentatie is de Amer vergasser beschreven, de historie en als laatste de resultaten van het vergassen van hout en RDF.
- In juni 2015 heeft ECN een poster gepresenteerd op de European Biomass Conference, met als titel: *Gasification of low-value feedstocks at laboratory and commercial scale*. Middels deze poster werden de resultaten van lab tot grote schaal gepresenteerd voor drie brandstoffen en de positieve uitkomsten van minder koelervervuiling na verlaging van de vergassingstemperatuur. Het werk is gepubliceerd in de conferentieproceedings en wordt mogelijk gepubliceerd in het Biomass & Bioenergy Journal.
- In september 2015 zal ECN een presentatie geven op de European Biomass to Power conference in Berlijn. Het onderwerp van de presentatie zal zijn: *Gasification of low-value feedstock and how to keep in control of the fouling issues*.
- In November 2015 zal ECN op de International conference on thermochemical biomass conversion science in Chicago een presentatie geven met de titel: *Use of promising additives for alkali capture in waste gasification*. In deze presentatie zullen de positieve resultaten bij het gebruik van o.a. Halloysiet besproken worden. Naast de presentatie zullen er proceedings gepubliceerd worden en zal ECN een *virtual video tour* laten zien van de Bioenergy faciliteiten.

Naast de bovengenoemde kennisdisseminatie zijn de resultaten sinds 2014 toegepast in diverse ECN projecten:

- Voor diverse ECN projecten met klanten zoals Koninklijke Dahlman en POSCO zijn succesvolle resultaten geboekt met afvalvergassing op labschaal met een lagere vergassingstemperatuur en het gebruik van Halloysiet als additief voor alkaliopvangst.
- Dahlman heeft een ETI project, dat in de laatste fase van financial close zit: 24 MW_{th} (RDF) MILENA – OLGA – GT systeem, waarbij een lagere vergassingstemperatuur wordt toegepast.
- Voor 2015 staat een pilot MILENA experiment bij ECN gepland (plastic: PE/PP afval) in opdracht van POSCO.
- Een afvaardiging van de Lahti 2 centrale is bij RWE Essent op bezoek geweest om de problemen met het vergassen van RDF/hout te bespreken. De vergassingstemperatuur is voor de Lahti 2 870°C. Een van de voorstellen is om de vergassingstemperatuur te verlagen naar 750°C en men was onder de indruk van de behaalde resultaten bij de Amer vergasser van RWE Essent. N.a.v. het bezoek heeft ECN het artikel opgestuurd, waarin de resultaten van de lab en grote schaal experimenten worden besproken.

5.6 Discussie & conclusies

Het vergassen van asrijke brandstoffen wordt vaak gezien als een risico vanwege de onbekende interacties van de mengsels. Uit de brandstofselectie zijn RDF, paper rejects en diermeel gekozen als laagwaardige brandstoffen op basis van de criteria prijs, beschikbaarheid, corrosie, vervuiling, agglomeratie, askwaliteit, emissies, logistiek en goedkopere verwerking.

Vergassingstemperatuur, vochtgehalte van de brandstof en additieven beïnvloeden in grote mate de uitstoot van chloor en (aard)alkalimetalen naar de gas- en vaste fase. Een verlaging van de vergassingstemperatuur van 850°C naar 750°C levert de volgende resultaten op:

- De kwantitatieve verdeling van chloor wijzigt in minder chloor in het gas en het fijnstof en meer chloor in het cycloonas en bodemas. Minder zouten (b.v. CaCl₂) zijn aanwezig in de gasfase.
- De deposieten op de gaskoeler zijn bij 850°C harde r, dichter en deels gesmolten. Bij 750°C zijn de deposieten poreuzer en makkelijker te verwijderen van de gaskoeler.

- Deze resultaten zijn consistent voor zowel de lab als grote schaal (80MW_{th}) experimenten met hout en RDF.

Grote schaal experimenten bij RWE Essent hebben aangetoond dat een verlaging van de temperatuur significant minder vervuiling oplevert voor houtvergassing: voor het eerst in tien jaar bedrijfsvoering GEEN toename van de vervuiling. Bij mengsels met 10-20% RDF werd eveneens geen vervuiling waargenomen, maar tijdens een langduriger test met 40% RDF trad uiteindelijk wel vervuiling op in de gaskoeler. De vervuiling is echter niet plakkerig en makkelijker te verwijderen. De afstand tussen de warmtewisselende oppervlakken van de koeler is te klein om langdurig zonder vervuiling te kunnen draaien, maar de koeler heeft voldoende capaciteit om een aantal van de warmtewisselende platen te kunnen verwijderen, zodat de steek tussen de platen groter wordt en er minder vervuiling zal optreden. Deze modificatie is overeenkomstig het plan nog binnen dit project uitgevoerd, maar kon helaas niet meer worden getest. Bij de toekomstige bedrijfsvoering zal het effect in de praktijk kunnen worden vastgesteld.

Een hoger vochtgehalte van de brandstof leidt tot een hoger gehalte aan chloor in de gasfase, in de vorm van HCl. Dit is een indicatie dat niet alleen de temperatuur, maar ook het vochtgehalte van de brandstof de HCl formatie kan beïnvloeden tijdens het vergassingsproces, en daarmee de samenhangende problemen (afzettingen, fouling, corrosie). Deze hypothese is niet getoetst. Een experiment met paper rejects met hoger en lager vochtgehalte zou uitsluitsel kunnen geven, maar was binnen dit project niet meer mogelijk.

Het gebruik van halloysiet en poederkoolvlieggas als additief in de vergasser leidt tot het afvangen van de (aard)alkalimetalen in de vorm van aluminosilicaten. Deze aluminosilicaten hebben een zeer hoog smeltpunt en gaan nauwelijks over in de gasfase, waardoor de vervuiling van de gaskoeler verminderd wordt. Aangezien er verschillende soorten halloysiet bestaan resteert de vraag welk type halloysiet voldoende actief is en een zo laag mogelijke prijs heeft.

Een slimme selectie van brandstofvoorbewerking (zoals drogen) samen met de vergassercondities kunnen de problemen die geassocieerd worden met laagwaardige brandstoffen verminderen. Een vergassingstemperatuur van ~750°C blijkt een goede trade-off te zijn tussen koolstofconversie, cold gas efficiency, teergehalte/samenstelling en verdeling van chloor in de vaste stof- en gasfase.

Voor de selectie van cases voor de ketelconfiguraties is geconcludeerd dat het toepassen van een cycloon geen voordeel oplevert ten opzichte van het niet reinigen van het gas voor de ketel. Dit komt door het hoge chloorgehalte en de lage zwavel tot chloor verhouding. Hierdoor is de kans op hoge temperatuur corrosie door chloor aanzienlijk en moet het ontwerp daarop worden aangepast. Voor de ketel en de daarop volgende rookgasreiniging zijn twee basis ontwerpen gemaakt: een voor de cases zonder keramisch filter en een voor de cases met een keramisch filter. Het keramische filter verwijdert stof, char en chloor uit het gas. Nadeel van het filter is dat er een koolstof bevattende afvalstroom ontstaat. Voordeel is dat de ketel op hogere stoomcondities (540°C en 120 bar versus 400°C en 40 bar) bedreven kan worden. De ketel voor gereinigd gas is compacter, er kunnen pijpen met vinnen worden gebruikt en er is geen online reiniging van de verwarmde oppervlakken nodig. De kosten voor de ketel voor gereinigd gas zijn circa 10% lager dan de ketel voor ongereinigd gas. Daar staat tegenover dat er geïnvesteerd moet worden in een heetgasfilter.

Vanwege de subsidie op groene elektriciteit en warmte zijn de cases voor 100% elektriciteit, elektriciteit + 25 MW_{th} warmte en elektriciteit + 50 MW_{th} warmte economisch geëvalueerd. Warmtelevering van 50 MW_{th} + elektriciteitslevering levert meer opbrengsten op dan de 25 MW_{th} + elektriciteit casus of de 100% elektriciteit casus, ondanks dat bij 25 MW_{th} meer vollasturen warmte geleverd kan worden. Stofafvangst van het produktgas (vlieggas, koolstof en chloor) voor de ketel is niet gunstig voor de terugverdiensijd. De investering in een keramisch filter, het hoge stikstofdebië voor het reinigen van het filter, de hogere storkosten door afzet van as met koolstof en het verlies in koolstofconversie wegen niet op tegen de hogere opbrengsten van de elektriciteitsproductie bij 120 bar en 540°C. Er zijn geen grote verschillen tussen de toepassing van de verschillende koelers. De investering voor een conventionele gas/lucht koeler is hoger, waardoor de terugverdiensijd langer is. De keuze van het type koeler zal afhangen van de betrouwbaarheid van de koeler. Bij het verwerken van een brandstof, waarbij het aandeel biomassa groter dan 95% is, kan in Nederland SDE+ subsidie aangevraagd worden. Voor het vergassen van MBM kan hierdoor subsidie worden verkregen. Doordat zowel warmte als elektriciteit geleverd worden, is het subsidietarief gunstig. Hierdoor is de terugverdiensijd 3,3 jaar bij 50 MW_{th} warmtelevering. Indien de subsidie zou wegvallen, stijgt de terugverdiensijd (tot of met) 27 jaar. Het effect van deze SDE+ fase 3 subsidie is enorm.

Vervolg op dit project:

- Additieven (halloysiet) hebben interessant gedrag laten zien bij afvalvergassing: significante vermindering van fouling na de vergasser. Er bestaan diverse soorten halloysiet (mate van voorbewerking), aanvullende experimenten zijn nodig om de meest efficiënte (werking & prijs) variant te bepalen.
- Diverse projecten (2004-2015) van ECN, HoST e.a. hebben geleid tot het projectvoorstel Smart Blends (programma HER). Smart Blends gaat over kostenbesparing over de hele keten (input, O&M en output) voor biogene (alternatieve) mengsels, zoals slib, mest, agro residuen, slachtafval enz.

6 Uitvoering van het project

6.1 De problemen (technisch en organisatorisch) die zich tijdens het project hebben voorgedaan en de wijze waarop deze problemen zijn opgelost;

Er hebben zich geen problemen voorgedaan en de samenwerking, openheid en gedrevenheid van de partners was zeer goed. Er heerste een prima sfeer en de partners waren altijd beschikbaar voor antwoorden op vragen en verzoeken.

6.2 Toelichting op wijzigingen ten opzichte van het projectplan;

Er is niet noemenswaardig afgeweken van het projectplan.

6.3 Toelichting op de verschillen tussen de begroting en de werkelijk gemaakte kosten.

Er is geen noemenswaardig verschil tussen de begroting en de daadwerkelijk gemaakte kosten.

6.4 Toelichting wijze van kennisverspreiding

De resultaten van het project zijn op verschillende manieren gedissemineerd via conferenties en via spin-out van de resultaten in de dagelijkse bedrijfsvoering van de partners:

- Oktober 2014: Swedish Gas Technology Center met als titel: *Amer Gasifier: Process redesign, operational results and developments for alternative fuels.*
- Juni 2015: European Biomass Conference met als titel: *Gasification of low-value feedstocks at laboratory and commercial scale.*
- September 2015: European Biomass to Power conference: *Gasification of low-value feedstock and how to keep in control of the fouling issues.*
- November 2015: International conference on thermochemical biomass conversion science in Chicago met de titel: *Use of promising additives for alkali capture in waste gasification.*

Voor meer informatie, zie hoofdstuk 5.5.6.

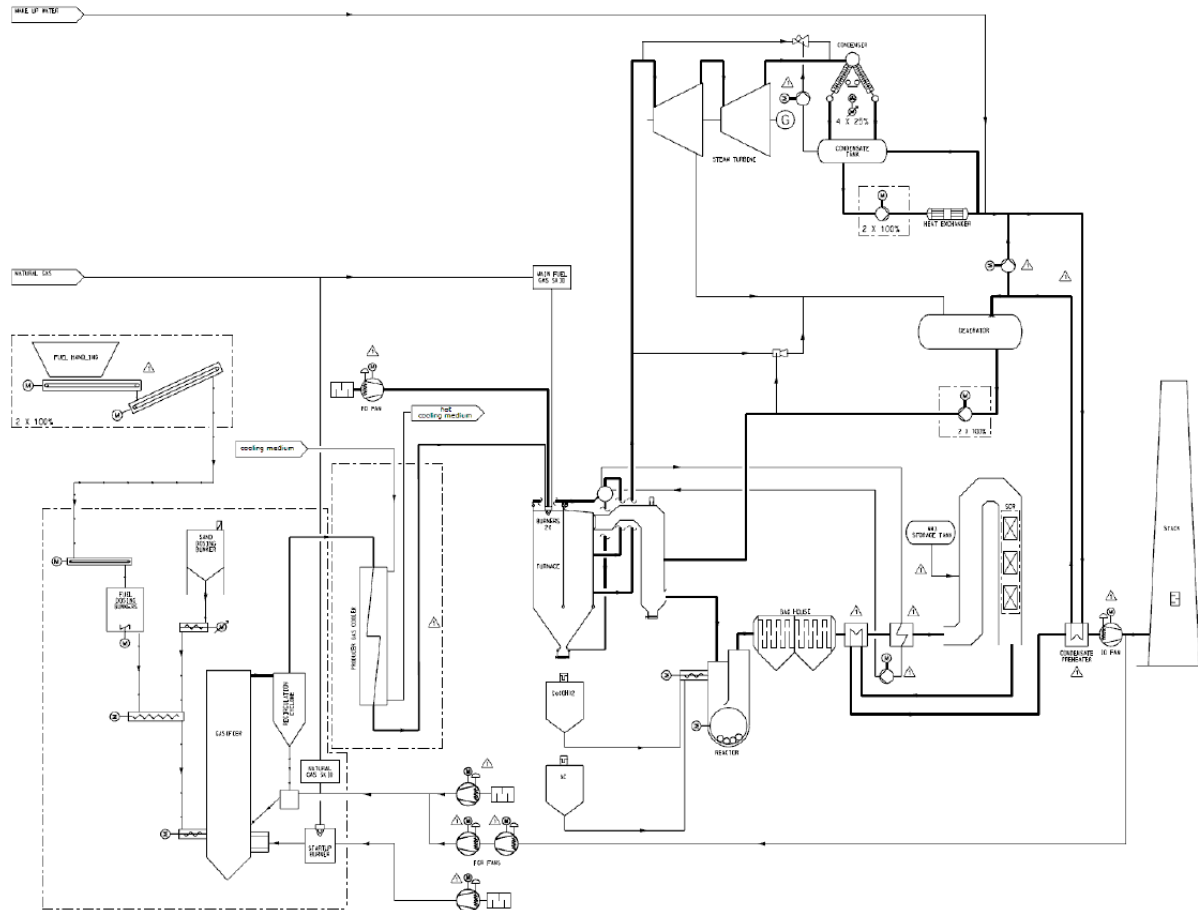
7 Appendix

7.1 Appendix A Parameter tabel

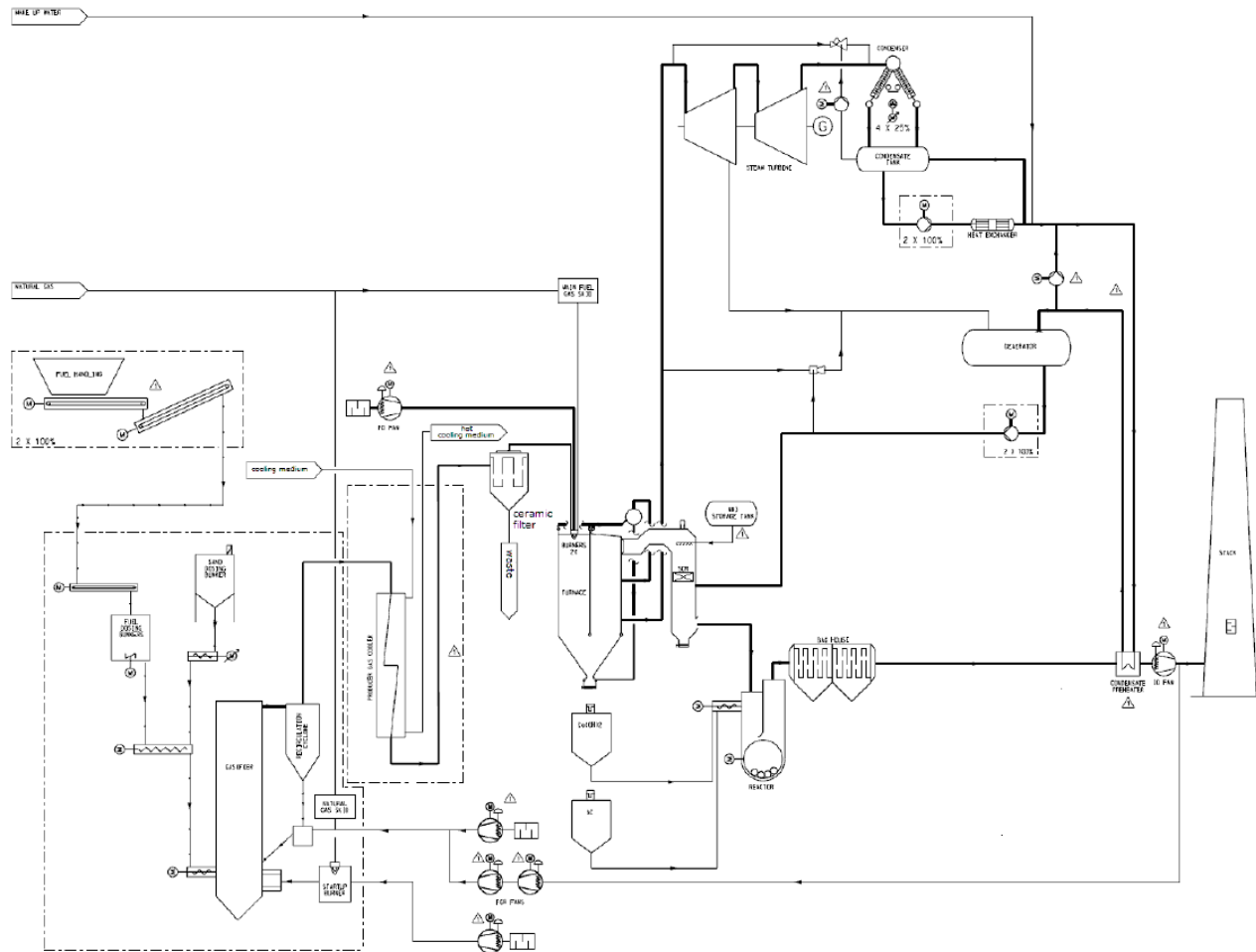
	Burner	Boiler			Flue gas cleaning
		Furnace	Convective part	Boiler total	
Important aspects	Inlet temperature <700°C	Residence time > 2 s	Na content	S/Cl >2, preferably S/Cl>4	N content producer gas + burner type
	Inlet pressure >25 mbar(g)	Temperature > 850°C	K content	Dust load	S content producer gas
	Calorific value should give $T_{ad}=1200^{\circ}\text{C}$	Halogenated organic content, expressed as Cl < 1%*	Zn content	Avoid Hg and V	Cl content producer gas
No producer gas cleaning	Air preheating required		Pb content	Modular design	Hg content producer gas
	Inlet temperature <700°C	Hopper to avoid ash build up	Bare tubes	Low steam parameters (40 bar, 400°C)	De-NO _x at end of process
	Inlet pressure > 25 mbar(g) Sticky ashes could be problematic	Wall cleaning system	Wide pitch of tubes Cleaning system	Relative large boiler Low cycle efficiency	
Intermediate cleaning (cyclones)	Inlet pressure > 25 mbar(g)	Hopper to avoid ash build up	Bare tubes	Intermediate steam parameters (65 bar, 480°C)	De-NO _x at end of process
		Wall cleaning system	Cleaning system	Low cycle efficiency	
Intensive cleaning (filters)	Inlet pressure > 25 mbar(g)	No hopper required	Finned tubes	High steam parameters (120 bar, 540°C)	De-NO _x in boiler
		No cleaning system	No cleaning system	Compact design Relative high cycle efficiency	S content producer gas

*) This applies to overall thermal treatment so both the gasifier and boiler, see Industrial Emissions Directive (2010/75/EU) article 42. In case Cl > 1%, the combustion chamber should be above 1100°C with a residence time of 2 seconds.

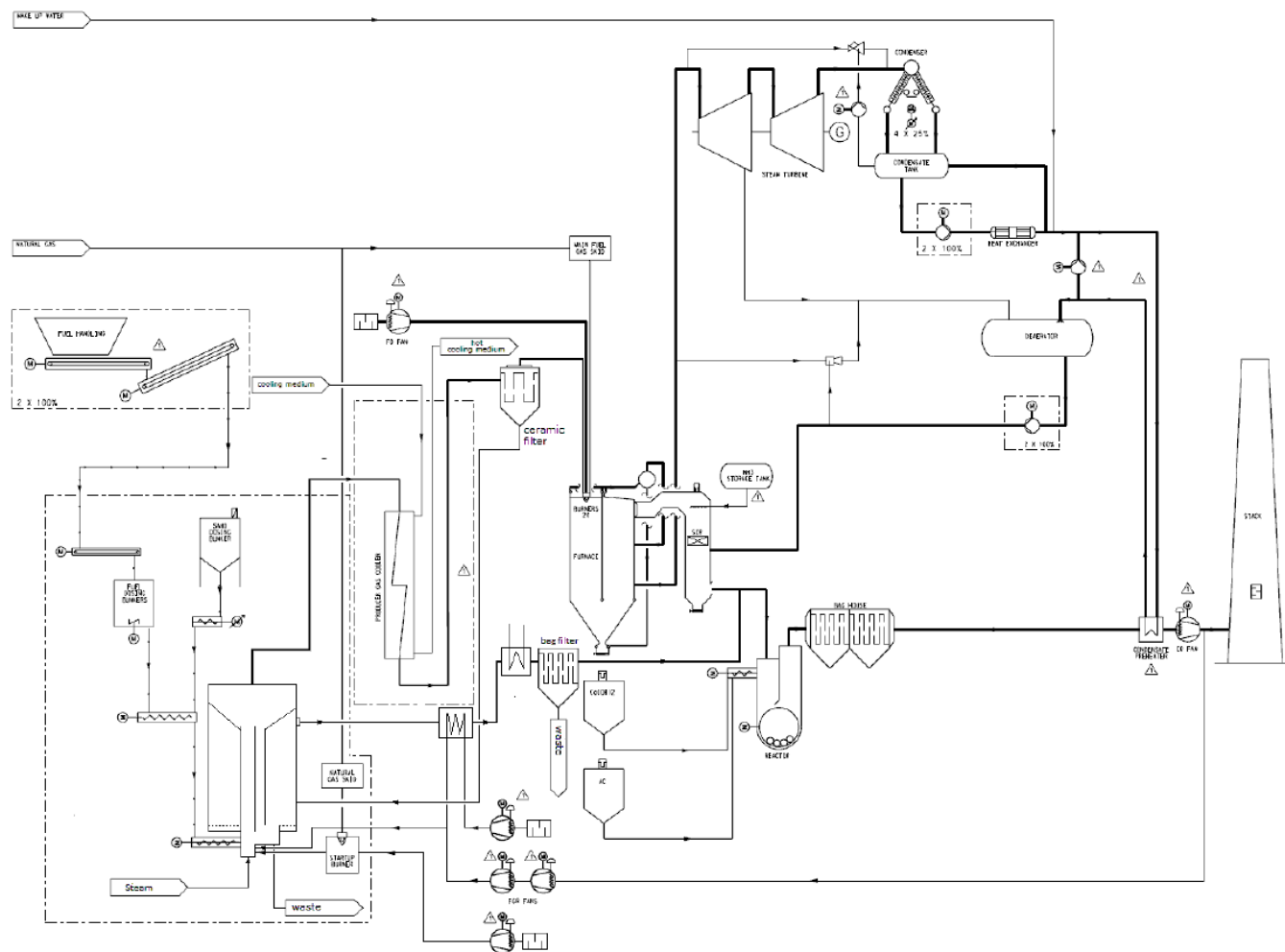
7.2 Appendix B PFD vuil gas



7.3 Appendix C PFD vuil gas



7.4 Appendix D PFD MILENA



7.5 Appendix E Prestatietabel vuil gas



Doc. no:
Project: Vergassing laagwaardige brandstoffen
Client:
Date: 18-Mar-16
Revision: 2
Remarks: Ongereinigd gas

Case	-	MBM1 A-Raw gas	PR1 A-Raw gas	
Air temperature	°C	20	20	
Air humidity	%	60	60	
Ambient air pressure	bar	1.013	1.013	
Combustion Air and Fluegas				
Combustion Air flow	Nm3/hr	71,300	65,100	
Combustion Air temperature	°C	150	110	
Excess Air	%	25	25	
Fluegas flow	Nm3/hr	103,000	112,500	
Fluegas composition				
O2	vol%	2.9	2.4	
O2 - dry	vol% dry	3.3	3.0	
N2	vol%	71.1	64.4	
Ar	vol%	0.6	0.5	
CO2	vol%	13.0	11.6	
H2O	vol%	12.3	21.1	
As flow	kg/s	0.684	0.1	
Particulates	g/Nm3	23.9	2.8	
Acid Dewpoint	°C	135	125	
Fuel				
Fuel	-	Syngas MBM	Syngas PR1	
Fuel temperature	°C	600	600	
Fuel LHV	MJ/Nm3	5.9	3.8	
Density	kg/Nm3	1.133	1.059	
Fuel flow	Nm3/hr	36,400	52,600	
Fuel Heat input (on LHV)	MW	60	55	
Sensible Heat of fuel	MW	8	17	
Fuel	-	Char+Ash	Char+Ash P	
Fuel temperature	°C	600	600	
Fuel LHV	MJ/kg	10.0	29.3	
Fuel flow	kg/hr	3,240	1,040	
Fuel Heat input (on LHV)	MW	9.0	8.5	
Sensible Heat of fuel	MW	0.7	0.2	
Total Fuel Heat input	MW	77	80	
Steam at Terminal Point				
Flow	kg/hr	98,100	95,700	
Pressure	bar	40	40	
Temperature	°C	400	400	
Spraywater to Desuperheaters	kg/hr	2,100	3,200	
Water temperatures				
Feedwater	°C	125	105	
Inlet Economiser	°C	150	150	
Outlet Economiser	°C	197	196	
Steam temperatures				
Inlet Primary Superheater	°C	259	258	
Outlet Primary Superheater	°C	330	337	
Inlet Secondary Superheater	°C	309	304	
Outlet Secondary Superheater	°C	401	401	
Fluegas temperatures				
Adiabatic gas temperature	°C	1724	1616	
Temperature at H = 12 m below roof	°C	807	797	
Temperature Inlet 2nd pass	°C	658	645	
Temperature Inlet Superheaters	°C	658	645	
Temperature Inlet Economisers	°C	286	288	
Temperature outlet Economisers	°C	199	202	
Feedwater pressure				
Steam drum	bar	46	46	
Feedwater at Inlet Economiser (PREL.)	bar	> 53	> 54	
Fluegas velocities				
Furnace mean vertical velocity	m/s	7.0	7.4	
Superheaters (maximum)	m/s	4.6	5.0	
Economisers (maximum)	m/s	3.2	3.6	
Heat Balance (Reference Temp. 15 °C)				
Gross Heat Input	MW	81.3	82.5	
Radiation & Convection Loss	MW	1.0	1.0	
Heat absorbed	MW	73.2	73.6	

7.6 Appendix F Prestatietabel schoon gas



Doc. no:
Project: Vergassing laagwaardige brandstoffen
Client:
Date: 18-Mar-16
Revision: 1
Remarks: gereinigd gas

Case	-	PR6 A- Filter	PR7 B- Filter	PR8 C- Filter	RDF B- Filter	PR_Milena C- Filter
Air temperature	°C	20	20	20	20	20
Air humidity	%	60	60	60	60	60
Ambient air pressure	bar	1.013	1.013	1.013	1.013	1.013
Combustion Air and Fluegas						
Combustion Air flow	Nm ³ /hr	62,500	62,500	62,500	63,500	64,700
Combustion Air temperature	°C	350	30	30	30	200
Excess Air	%	30	30	30	30	25
Fluegas flow	Nm ³ /hr	110,200	110,200	110,200	101,800	90,700
Fluegas composition						
O ₂	vol%	2.7	2.7	2.7	3.0	2.9
O ₂ - dry	vol% dry	3.5	3.5	3.5	3.6	4.0
N ₂	vol%	63.9	63.9	63.9	66.8	61.1
Ar	vol%	0.5	0.5	0.5	0.6	0.7
CO ₂	vol%	11.0	11.0	11.0	11.7	9.3
H ₂ O	vol%	21.9	21.9	21.9	17.9	26.0
As flow	kg/s	0.000	0.0	0.0	0.0	0.0
Particulates	g/Nm ³	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Acid Dewpoint	°C	128	128	128	140	132
Fuels						
Fuel	-	Syngas PR1	Syngas PR1	Syngas PR1	Syngas RDF	Syngas PRM
Fuel temperature	°C	400	400	400	400	400
Fuel LHV	MJ/Nm ³	3.9	3.9	3.9	4.7	6.5
Density	kg/Nm ³	1.059	1.059	1.059	1.076	0.923
Fuel flow	Nm ³ /hr	52,600	52,600	52,600	43,200	27,900
Fuel Heat input (on LHV)	MW	55	55	55	56	50
Sensible Heat of fuel	MW	11	11	11	9	6
Fuel	-	Tar	Tar	Tar	Tar	Tar
Fuel temperature	°C	400	400	400	400	400
Fuel LHV	MJ/kg	41.8	41.8	41.8	41.8	41.8
Fuel flow	kg/hr	400	400	400	360	680
Fuel Heat input (on LHV)	MW	4.6	4.6	4.6	4	8
Sensible Heat of fuel	MW	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1
Total Fuel Heat input	MW	70	70	70	69	64
Steam at Terminal Point						
Flow	kg/hr	87,700	78,500	78,500	77,700	76,500
Pressure	bar	120	120	120	120	120
Temperature	°C	540	540	540	540	540
Spraywater to Desuperheaters	kg/hr	5,700	5,500	5,500	4,400	2,600
Water temperatures						
Feedwater	°C	125	125	125	125	125
Inlet Economiser	°C	150	150	150	150	150
Outlet Economiser	°C	235	245	245	235	224
Steam temperatures						
Inlet Primary Superheater	°C	356	359	359	354	347
Outlet Primary Superheater	°C	400	410	410	398	382
Inlet Secondary Superheater	°C	400	409	409	398	382
Outlet Secondary Superheater	°C	500	510	510	495	471
Inlet Tertiary Superheater	°C	435	438	438	438	438
Outlet Tertiary Superheater	°C	540	540	540	540	540
Fluegas temperatures						
Adiabatic gas temperature	°C	1572	1441	1441	1529	1647
Temperature at bottom furnace	°C	889	842	842	856	873
Temperature Inlet Superheaters	°C	887	842	842	856	868
Temperature Inlet Primary Superheaters	°C	468	468	468	459	440
Temperature Inlet Economisers	°C	375	375	375	370	361
Temperature outlet Economisers	°C	158	160	160	157	155
Feedwater pressure						
Steamdrum	bar	127	125	125	125	125
Feedwater at Inlet Economiser (PREL.)	bar	> 127	> 126	> 126	> 126	> 126
Fluegas velocities						
Furnace mean vertical velocity	m/s	7.6	7.2	7.2	6.8	6.3
Superheaters (maximum)	m/s	14.6	14.1	14.1	13.2	11.8
Economisers (maximum)	m/s	10.5	10.5	10.5	9.6	8.4
Heat Balance (Reference Temp. 16 °C)						
Gross Heat input	MW	78.0	70.7	70.7	69.5	67.8
Radiation & Convection Loss	MW	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
Heat absorbed	MW	71.3	63.9	63.9	63.2	62.2

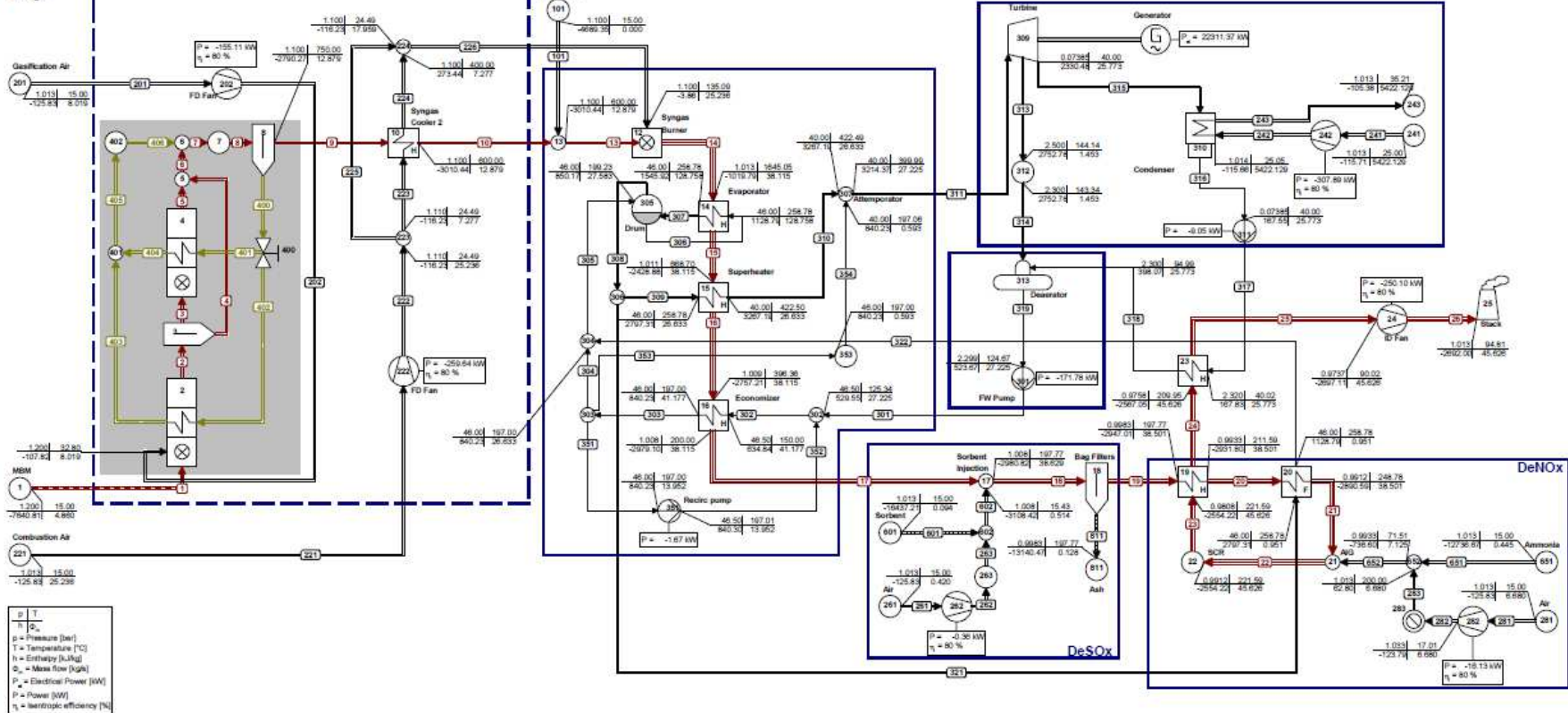
7.7 Appendix G Massa- en energiebalansen

Cycle-Tempo 5.0 (Build 481)

NEM Energy bv, TKI Vergassing laagwaardige brandstoffen

Case 1: MBM, 100%, $T_{in} = 400$ degC, $p_{in} = 40$ bar, reheaf SCR

Design



7.8 Appendix H In- en output tabellen



Utility list
Case 1, MBM, koeling optie A, geen reiniging

Incoming stream				
Lot #	Description	Nominal Value	Capacity Maximum Value	Unit
	Meat and Bone Meal	16805	18486	kg/h
1	meat and bone meal (dry)	16805	18486	kg/h
	Natural gas	71	5750	Nm ³ /h
2	Start-up burner	0	750	Nm ³ /h
3	Gas burners (pilot/start-up)	71	5000	Nm ³ /h
	Electricity	2893	4559	kW
2	Gasification island	625	1440	kW
3	Gas-fired boiler	460	560	kW
4	Flue gas desulfurization	350	450	kW
5	Low Temperature SCR	640	750	kW
6	Steam Turbine and ACC	330	400	kW
7	Balance of Plant	450	900	kW
8	PCS	15.0	15.0	kW
9	Support systems switchgear	21.0	42.0	kW
12	Miscellaneous	2.0	2.0	kW
	Sand	262	800	kg/h
2	CFB Bed material	262	800	kg/h
	Water	983	4915	kg/h
2	Gasification island	0	0	kg/h
7	Demin water plant	983	4915	kg/h
	Process Air	73302	81010	Nm ³ /h
2	Gasification air	?	?	Nm ³ /h
2	Sealpot gasifier air	?	?	Nm ³ /h
3	Combustion air	71300	78000	Nm ³ /h
3	Shot cleaning	2000	3000	Nm ³ /h
5	Vaporization air	2	10	Nm ³ /h
	Instrument Air	440	1311	Nm ³ /h
2	Gasification island	250	350	Nm ³ /h
3	Gas-fired boiler	100	150	Nm ³ /h
4	Flue gas desulfurization	17	25	Nm ³ /h
5	Low Temperature SCR	3	6	Nm ³ /h
6	Steam Turbine and ACC	50	750	Nm ³ /h
7	Balance of Plant	20	30	Nm ³ /h
	Plant Air	250	300	Nm ³ /h
4	Back pulse installation	250	300	Nm ³ /h
	Sodium Bicarbonate	229	350	kg/h
4	Sorbent injection	229	350	kg/h
	Activated carbon	32	50	kg/h
4	Sorbent injection	32	50	kg/h
	Ammonia (25%)	504	600	kg/h
5	Ammonia injection grid	504	600	kg/h
	Nitrogen	22	114	Nm ³ /h
2	Gasification island	20	50	Nm ³ /h
3	Gas-fired boiler	0	60	Nm ³ /h
4	Activated carbon silo	2	4	Nm ³ /h

Outgoing streams				
Lot #	Description	Nominal Value	Capacity Maximum Value	Unit
	Waste sand/ash	2081	8000	kg/h
2	Waste sand/ash from gasifier	2081	8000	kg/h
	Ash	2656	6000	kg/h
2	Fly ash gasifier	0	0	kg/h
3	Fly ash boiler	1158	2500	kg/h
4	Ash from bag filter	1498	3500	kg/h
	Waste water	983	4915	kg/h
3	Blown down water	983	4915	kg/h
	Electricity	14799	14799	kW
6	Generator	14799	14799	kW
	Heat	54397	54397	kW
6	Extraction @ 90°C	54397	54397	kW

Net power output	11905.89	10239.89	kW
Net electrical efficiency	14.88	12.80	%
Total output	66303	64637	kW
Total efficiency	82.88	80.80	%

Optional				
Lot #	Description	Nominal Value	Capacity Maximum Value	Unit
	Ash	2656	6000	kg/h
2	Fly ash gasifier	0	0	kg/h
3	Fly ash boiler	1158	2500	kg/h
4	ESP	984	2125	kg/h
4	Ash from bag filter	514	1375	kg/h