

## Afsluttende rapport vedr. filtrering af forgasnings-gas basseret på restprodukter.

### 1.1 Projektdetaljer:

<b>Projekttitel:</b>	<i>Konstruktion af filtersystem til rensning af forgasnings-gas basseret på restprodukter.</i>
<b>Projektnummer:</b>	J.nr. 64018-0628
<b>Ansøgningsrunde:</b>	Ansøgningsrunde 7. sep. 2018
<b>Bevillingsgiver:</b>	EUDP
<b>Projektansvarlig:</b>	Dan Filip Christiansen – <i>GGC-Tech.</i>
<b>CVR-nummer:</b>	38371592
<b>Underleverandør:</b>	DTU- Lyngby.

1.2 Kort beskrivelse af projektmål og resultater.

1.3 Arbejdspakker og ændringer undervejs.

1.4 Projektmål.

1.5 Projektresultater.

1.6 Brug af projektresultater.

1.7 Konklusion og perspektiver.

### Bilagsliste (fortroligt):

Bilag 1.

Billedmateriale.

Bilag 2.

Rapport fra DTU-Lyngby vedr. testresultater.

Bilag 3.

Korrespondance vedr. perspektiver og muligheder;

3.1 (kilde; Jenbacher)

3.2 (kilde; Århus Universitet og Seges)

3.3 (kilde; Haldor Topsøe)

## 1.2 Kort beskrivelse af projektmål og resultater.

*The purpose of the project is to; develop, build and test a filter system that can process product gas from a gasification process based on residual products, thus preparing this gas for subsequent use. In addition, the filter system must be self-cleaning, so that continuous operation for long periods is possible. As there is no existing product that meets the above requirements, the design, the manufacture and testing of a usable filter system is a necessity for the Combi-gasifier to be scaled up. It should be emphasized that the filter technology is also likely to be applicable to other types of process gas. As stated later in this rapport, the project goal was achieved.*

Formålet med projektet er at; udvikle, bygge og afprøve et filtersystem, der kan behandle produktgas fra en forgasningsproces, således denne gas klargøres til efterfølgende anvendelse. Ud over dette skal filter-systemet være selvrensende, således kontinuerlig drift i lange perioder er muligt. Da der ikke findes et eksisterende produkt der modsvarer ovennævnte krav, er design, fremstilling samt afprøvning af et brugbart filter-system, en nødvendighed for at *Kombi*-forgasseren kan opskales. Det skal understreges at filterteknologien sandsynligvis også vil kunne finde anvendelse til andre typer af procesgas. Som det fremgår senere i den rapport blev projektmålet opnået.

## 1.3 Arbejdspakker, projektføreløb og ændringer undervejs.

Formål - Projektets mål og konkrete bidrag	Succeskriterier –	Resultater og leverancer [	Arbejdspakker, Aktiviteter, milepæle
Design af filtersystem:	Beregninger og design gennemføres.	Når et komplet sæt tegninger af filter-systemet foreligger.	Arbejdspakke 1
Fremstilling af filtersystem:	Filteret bygges.	Filteret kan testes.	Arbejdspakke 2
Afprøvning af filtersystem:	Funktionstest udføres med udtag af gas-prøver.	Gasprøver analyseres på DTU og analyse-rapport udfærdiges.	Arbejdspakke 3

Vedr. arbejdsplan 1;

Arbejdsplanen er generelt forløbet som planlagt. Design- og konstruktionsfasen er blevet gennemført og selvom filteranlægget er blevet ændret 2 gange undervejs i processen, er der kun oparbejdet en moderat forsinkelse. Årsagen til ændringerne var en revurdering af den våde del af filtersystemet, der med fordel kunne forenkles og samtidig gøres mere effektiv. Det oprindelige design bestod af en roterende filterdug på en trommel. Da dette system blev afprøvet, viste det sig at opholdstiden, altså den tid hvor gassen er i kontakt med filterelementet, blev for kort og at rensningseffekten dermed var dårlig. Det blev forsøgt at omvikle tromlen med et tykkere lag af filterdug, men uden at det ønskede resultat kunne opnåes. Derfor blev det besluttet at re-designe dette komponent. Forskellige muligheder blev forsøgt med fokus på effektivitet samt driftssikkerhed, og det endelige design blev et vådfilter med klart defineret opholdstid, maksimal rensningseffekt og med minimalt trykfald. Da denne konstruktion samtidig ville være selvrensende og have et minimalt materialeforbrug, var det et oplagt valg. Dermed opnåede vi dels, en mere driftssikker- og dels en mindre resursekrævende konstruktion. Helt overordnet har det været målsætningen at opnå maksimal rensning af produktgassen og samtidig sikrer at det samlede forgasningsanlæg kun minimalt blev påvirket mht. økonomi, kompleksitet og drift.

Vedr. arbejdspakke 2;

Blev gennemført som planlagt. Filterne blev bygget og integreret i den eksisterende prototype af Kombi-forgasseren. Derudover blev kølepumpe, væsekøler samt div. rør og slanger indkøbt og integreret. En gasmåler blev ligeledes anskaffet, da det nu med en ren produktgas ville være muligt måle gasmængden, og dermed effekt fra prototypen.

Vedr. arbejdspakke 3;

Der blev fra medio august gennemført driftsforsøg med forskellige restprodukter. Både pelleteret kyllingemøg og pelleteret fiberfraktion fra biogasproces og specielt granuleret spildevandsslam blev forgasset. Netop spildvands-slam har under forsøg på DTU Risø vist at indeholde en betydelig mængde svovl der under forgasning konverterer produktgassen med svovlbrente. Filtersystemet performede fint under alle driftsperioderne og umiddelbart kunne det konstateres at sodpartiklerne blev fuldstændig opfanget. Dette kunne iagttages på anlæggets flare, der nu brænder med en usynlig flamme og kun et kraftigt varmemilmer, indikerer en betydelig varmeudvikling.

Primo september blev selve forsøgskørslen gennemført og div. gas- og tjæreprøver blev udtaget. Disse blev bragt til DTU i Lyngby for analyse.

## 1.4 Projekt mål.

Med udgangspunkt i de allerede opnåede driftserfaringerne med *kombi*-forgasseren, er det derfor hensigten at designe og efterfølgende fremstille et filtersystem der umiddelbart kan anvendes på forgasningsanlægget. Afprøvning af funktionen vil foregå ved at gennemføre driftsperioder med forgasning af forskellige rest-produkter. Under disse tests vil der blive udtaget et antal på 10 - 15 gasprøver i TEDLAR-gasposer, der efterfølgende vil blive analyseret i GC-MS samt SPA- analysator på DTU. Med analyser af gassens indhold før – under og efter filtrering, vil filtersystemets funktion og effektivitet kunne fastslås. Da gasprøver også vil blive udtaget ved forskellige drifts-situationer, vil den optimale filtreringsmetode for de enkelte brændsler ligeledes kunne fastlægges. Med et sådant filtersystem vil udviklingen af *Kombi*-forgasseren kunne færdiggøres og en opskalering iværksættes. Udover gasprøverne vil der også blive udtaget et antal prøver med CHROMABOND NH<sub>2</sub>-pipetter for analyse af tjære-komponenter. Dette for at fastslå den nedre grænse for temperatur i forgasserens hot-sektion, altså den temperatur, der sikrer at specielt de tunge tjæreforbindelser omdannes til gas, og dermed bidrager til produktgassens brændværdi.

Det nyskabende i dette filter er at alle funktioner er samlet i et system, der er designet specifikt til rensning af forgasningsgas baseret på restprodukter. Derved forenkles det samlede anlæg betydeligt samtidig med at anlægsomkostningerne reduceres tilsvarende. Yderligere bevirker opbygningen af filtersystemet at filtreringsevnen let kan ændres og tilpasses forskellige behov alt efter hvilket restprodukt der skal forgasses.

Det er målsætningen at kunne producere en gas baseret på restprodukter, der er så ren at den umiddelbart kan anvendes som brændstof i en gasmotor. Den øvre grænseværdi for svovlindhold i biogas der anvendes til motordrift, er typisk 200 ppm (kilde; *Jenbacher*). Derudover skal gassen være fri for urenheder, så som sod og støv. Yderligere skal brændværdien være på et tilstrækkeligt niveau, hvilket vil sige ca. 4,5 MJ/Nm<sup>3</sup> og derover. (kilde; *Nissens Energy a/s*). Brændværdien på produktgassen fra *Kombi*-forgasseren vil typisk ligge på ca. 6 MJ/Nm<sup>3</sup> (jf. *Risø*-test), og vil kunne hæves yderligere ved overgang til ren oxygenblæst forgasning, så med et effektivt filtersystem vil motordrift baseret på forgasning af restprodukter i vores forgasser-teknologi være en både bæredygtig og oplagt mulighed.

Ud over motordrift er det den langsigtede målsætning at opnå en renhed der vil gøre det muligt at anvende produktgassen til katalytisk fremstilling af biobrændstof. Dette vil kræve en produktgas, der er helt fri for svovl, tjærerester og andre urenheder. Derudover skal gassen have et minimalt indhold af nitrogen og CO<sub>2</sub>. Yderligere skal forholdet mellem hydrogen og CO være optimalt (jf. bilag 3), hvilket vil sige 2 til 1. (2H<sub>2</sub> + CO = CH<sub>3</sub>OH). Da forgasningsgas normalt har en ligelig kemisk fordeling mellem CO og hydrogen, vil det være nødvendigt at tilføre gassen hydrogen før en katalytisk konvertering til f.eks. biomethanol. Dette kan gøres med kendt teknologi ved

hjælp at elektrolytisk fremstilling af brint på basis af overskudsstrøm fra vindenergi. Derved vil vores forgasningsteknologi kunne supplere vindenergien ved produktion af el (gasmotor) i de perioder, hvor vinden ikke blæser, og med produktion af flydende biobrændstof i de perioder hvor der er en overproduktion af elektricitet fra vindenergi.

Det er derfor også målsætningen med dette projekt at opnå et overblik over behov, muligheder samt resultater, der på sigt vil kunne gøre det muligt at konvertere restprodukter, via vores proces i kombination med katalyse, direkte til flydende biobrændsel. Dette vil åbne muligheden for produktion af bæredygtigt brændstof til den del af transportsektoren hvor elektrisk fremdrivning ikke er en mulighed.

## 1.5 Projekterestater.

Som det fremgår af analyseresultaterne (bilag 2), er det ved hjælp af filtersystemet, muligt at opnå en signifikant reduktion i produktgassens indhold af hydrogen sulfid  $H_2S$ . Jf. tidligere gennemført test på Risø blev  $H_2S$ -niveauet i rå-gassen fra portotypen målt til ca. 1.850 ppm under forgasning af spildevandsslam. Analyser af den filtrerede gas viste det var muligt at opnå en 100 % fældning af  $H_2S$  under drift på fiberfraktion og spildevandsslam. Derudover blev alle sodpartikler bundet i det våde filter-systems vaskevand, hvilket udover i analyserne, også kunne iagttages visuelt under afbrænding af den filtrerede gas, hvor flammen i dagslys fremstod usynlig, og kun et kraftigt varmefflimmer indikerede energiomsætning.

Som det også fremgår af bilag 2, indeholder produktgassen en vis mængde carbonylsulfid COS og carbondisulfid  $CS_2$ . Carbonylsulfid COS kan ligesom  $H_2S$  binde sig til vand, men gør det langsomt hvilket sandsynligvis er årsagen til at stoffet er tilstede efter det våde filtersystem. COS vil binde sig til vand væsentligt hurtigere hvis vandet er basisk. Carbondisulfid  $CS_2$  er en brændfarlig væske med et kogepunkt på ca. 45 °C. Da temperaturen i den filtrerede produktgas lå mellem 40 - 50 °C under drift af forgasseren, er det sandsynligt at  $CS_2$  har været delvis på dampform efter filtret og derfor kunne detekteres i GS-analyserne. At der er tendens til at niveauet af COS samt  $CS_2$  er stigende efter det tørre filter, må skyldes en reaktion imellem  $H_2S$  og filtermaterialet (der bla. består af aktivt kul), og at denne reaktion frigøre ovenævnte svovlforbindelser, der dermed bidrager til den samlede mængde. Denne tendens er tydeligst i de gas-analyser, der vedrører forsøget med pelleteret kyllingemøg, men kan også iagttages i de resultater der vedrører pelleteret fiberfraktion. Niveauerne er dog så lave at de ingen betydning har medmindre produktgassen skal bruges i en metallisk katalysator. I så fald vil endnu en våd filterkolonne med stor sandsynlighed fælde de sidste svovlforbindelser, specielt hvis væsken i denne kolonne er basisk og temperaturen holdes under 40 °C.

Udover analyser for reduktion af svovlforbindelser, havde forsøgsrækken også til hensigt at fastslå den forgasningstemperatur der ville være mest hensigtsmæssig. Dette er værdifuldt at undersøge da en unødvendig høj temperatur kun vil reducere produktgassens brændværdi, ligesom en for lav temperatur ikke vil sikre omsætning af alle tjæreforbindelserne til gas. Som det fremgår af alle gasprøverne, er der tendens til at niveauet af COS og  $CS_2$  er højst ved en temperatur i hotsektion (HS) på 1.050 °C og reduceres ved 1.000 °C i HS. Da analyse af tjærekomponenter ikke indikerer en øget konterminering ved reduceret HS-temperatur, vil de fremtidige driftsparametere for forgasseren naturligvis omfatte en HS-temp. på 1.000 °C. Yderligere kunne det ud fra tjæreanalyserne fastslås at en opholdstid i HS på mellem 3 til 4 sekunder, sikrer en ren produktgas hvor samtlige tunge tjærekomponenter er omsat til gas. Dette bekræfter også de analyseresultater, som blev opnået på DTU-Risø i år 2018 under første test af prototypen. Som det fremgår af rapporten (bilag 2/side 5), er de lette tjæreforbindelser i produktgassen på niveau med DTU's egen 2-trins *Viking*-Forgasser, der betragtes som helt tjærefri. Da dette anlæg kun er designet til alm. træflis og vores anlæg specielt til omsætning af restprodukter, må analyseresultatet anses for fuldt tilfredsstillende.

Under design af filtersystemet har det været målsætningen at konstruere et system, der var selvrensende og således ikke ville påvirke driften af forgasseren. Dette blev til fulde opnået og det kunne konstateres at den samlede trykfald over filterne ikke blev påvirket under de mange timers drift. Ved visuel kontrol af filtermaterialet undervejs i

forsøgsrækken kunne der konstateres en uvæsentlig belægning, og det virkede som om denne belægning kun nåede et vist niveau hvorefter der indtraf en ligevægt imellem opbygning og afvaskning.

Da produktgassen efter filtrering var helt uden partikler, kunne prototypens effekt for første gang måles direkte under drift. Ved at indsætte en konventionel volumetrisk gasmåler, kunne gasmængden aflæses løbende og sammenholdes med den forbrugte mængde infeed. Med en brændværdi på 5,4 MJ/Nm<sup>3</sup> (gas produceret på spildevandsslam) og en aflæst gasmængde på 5.2 m<sup>3</sup>/h, kan effekten beregnes til;  $(5,4 \text{ MJ/ Nm}^3 \times 5.200 \text{ l/h}) / 3.600 = 7,8 \text{ kW}$ . Da forbruget af granuleret spildevandsslam samtidig var ca. 5,1 kg/h og brændværdien er analyseret til 2,2 kWh/kg, kan virkningsgraden beregnes til;  $(7,8 \text{ kWh} / (5,1 \text{ kg/h} \times 2,2 \text{ kWh/kg})) \times 100 = 70 \%$ . Dette må betegnes som et acceptabelt niveau da prototypen er bygget, først og fremmest for at bevise et nyt forgasningsprincip og fordi det nuværende anlæg helt sikkert vil kunne energioptimeres.

## 1.6 Brug af projektresultater.

Med det gennemførte projekt åbner der sig 3 mulige anvendelser af vores produktgas.

1. *Motordrift på forgasningsgas.* Som det fremgår af korrespondance (bilag 3.1) vil vores produktgas efter rensning være særdeles velegnet som brændstof i en konventionel gasmotor. Med den opnåede rensning af gassen vil indholdet af specielt svovlkomponenter ligge langt under den øvre grænseværdi fastsat af motorleverandøren. Ligeledes opfylder gassens brændværdi rigeligt kravene til motordrift også selv om forgasseren på nuværende tidspunkt stadig er delvist luftblæst. Med en fremtidig ren oxygenblæst forgasning vil nitrogeniveauet kunne reduceres hvilket proportionalt yderligere vil forøge brændværdien. Netop med mulighed for fremstilling af el med gasmotor vil vores teknologi kunne supplere de øvrige naturafhængige energikilder lokalt og således sikrer en mere konstant bæredygtig energiproduktion.

2. *Boost af biogasproduktion med forgasningsgas.* Som det fremgår af korrespondance (bilag 3.2), vil det være muligt med vores produktgas at forøge den mikrobielle omsætning i en biogasproces. Dette er interessant da netop biogasanlæg erfaringsmæssigt kun udnytter ca. 50 % af den til anlægget tilførte energi. Rest-energien går tabt i den fiberfraktion der på nuværende tidspunkt spredes på landbrugsarealerne. Med teknologi, der kan omsætte denne energi til en syngas (uden at gødningsværdien går tabt), kan denne gas pumpes tilbage i reaktortankene og booste biometan-produktionen. Derved vil biogasanlæggets samlede udnyttelsesgrad kunne forøges markant. Da fiberfraktionen derudover omdannes til et tørt lagerstabil gødningsprodukt, opnås yderligere en klar logistikmæssig fordel.

3. *Katalytisk fremstilling af biobrændstof.* Som det fremgår af korrespondance (bilag 3.3) kræves en ekstrem ren syngas til den nuværende kat-teknologi. Da processen yderligere involverer et procestryk på (50 – 100 bar), er det essentielt at gassens indhold af brændbare komponenter er maksimalt op-koncentreret af hensyn til den energikrævende kompression. Derudover kræves der et indbyrdes forhold imellem CO og H<sub>2</sub> der gør det muligt kemisk at konstruere brændstof. Alt dette kan imødekommes med tiltag der involverer yderligere rensning, oxygenblæst forgasning samt tilsætning af ekstra hydrogen. Med endnu en rensningskolonne vil det være muligt at reducerer syngassens indhold af konterminanter til et niveau, hvor belastningen på biofilter/katalysator er minimal. Reduktion af nitrogen vil som tidligere nævnt blive imødegået med en oxygenblæst forgasning, og evt. rest-N vil kunne fanges i en konventionel PSA-proces. Ligeledes vil CO<sub>2</sub> kunne fældes i en opgraderingsproces (f.eks. Amin), så op-koncentrering af syngassen bør ikke volde udfordringer. Ligeledes vil det være muligt at berige syngassen med ekstra hydrogen ved hjælp af elektrolyse. Hvis billig vindmøllestrøm anvendes i denne proces, vil det således bliver muligt at konverterer restprodukter til biobrændstof på en vedvarende og bæredygtig måde.

## 1.7 Konklusion og perspektiver.

Det blev eftervist at filtersystemet er i stand til at rense forgasningsgas baseret på restprodukter. Gassens indhold af svovlbrinte blev markant reduceret, til et niveau hvor gassen nu kan anvendes direkte som brændstof til drift af konventionel gasmotor. Derudover blev det påvist at gassens indhold af partikler (PAH) samt tjærefraktioner stort set blev elimineret, hvilket betyder at anvendelse af gassen til proces nu vil være en mulighed. Jf. bilag 3.1 og 3.3 har vi været i dialog med henholdsvis en gasmotor fabrikant, der klart anbefaler at vores gas kan anvendes til motordrift, samt en virksomhed med speciale i katalytisk fremstilling af biobrændstof. Netop fremstilling af flydende brændstof baseret på termisk konvertering af restprodukter er noget som vi meget gerne vil arbejde videre med, og jf. bilag 3.3 er dette en mulighed. som skal afsøges. Det er derfor planen at udbygge vores filtersystem med endnu en kolonne til fjernelse af de sidste svovlkomponenter for herefter at gennemføre forsøg med katalytisk fremstilling af bio-metanol baseret på restprodukter. Derudover er det planen, jf. bilag 3.2, at forsøge med injektion af vores syngas i en biogasproces for på den måde at stimulerer produktionen af biometan. Dette vil blive realiseret dels på basis af den nuværende prototype og dels på basis af et pilot-forgasningsanlæg, som vi allerede nu planlægger bygningen af. Dette pilotanlæg på 150 kW vil tage udgangspunkt i den nuværende prototype (inkl. filter) og vil således blive en ca. 20 X opskalering.